

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Моделювання процедури пошуку комірки стільникової мережі 5G

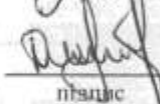
Затверджено наказом ректора Хмельницького національного університету від «15» серпня 2021 р. № 102.
2. Строк подання студентом ДРТР. 2021069.01.05.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-20-2


підпис

М.С. Шпірук
Ініціали, прізвище

Керівник: канд. техн. наук, доц.


підпис

Д.А. Макаришкін
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.


підпис

В.В. Мартинюк
Ініціали, прізвище

9 12 2021 р.

Хмельницький, 2021

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень *другий (магістерський)*

Галузь знань *17 – Електроніка та телекомунікації*

Спеціальність *172 – Телекомунікації та радіотехніка*

Освітня-професійна програма *Телекомунікації та радіотехніка*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

Мерзичук В.В.

« 2 » вересня 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Шнірук Максим Степанович

1. Тема роботи: Моделювання процедури пошуку комірки стільникової мережі 5G

керівник роботи Макаришкін Денис Анатолійович, к.т.н, доцент

Затверджено наказом по університету від «25» серпня 2021р. № 102.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 01.12.2021р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: дослідження процедури пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління, дослідження моделей відновлення символів і фреймів

Об'єкт дослідження: процес приймання сигналу, пошук первинного і вторинного сигналів синхронізації.

Предмет дослідження: методи та засоби встановлення синхронізації мобільного абонента з базовою станцією.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Основні відомості про системи зв'язку п'ятого покоління. Будова систем зв'язку п'ятого покоління. Виявлення та ідентифікація базових станцій систем зв'язку 5G. Моделювання процедури пошуку комірки базової станції

Завдання отримав

Науковий керівник

Мерзичук В.В.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Основні відомості про системи зв'язку п'ятого покоління.....	9
1.1 Витоки виникнення систем зв'язку п'ятого покоління.....	9
1.2 Інтеграція різних технологій радіодоступу	12
1.3 Підвищення енергетичної ефективності пристроїв.....	13
1.4 Зміна бездротових підключень в епоху 5G.....	18
1.5 Створення мережі інтернету речей.....	21
1.6 Інтеграція технологій радіодоступу та ущільнення мережі.....	25
Висновки до першого розділу.....	34
2 Будова систем зв'язку п'ятого покоління.....	35
2.1 Архітектура базових станцій систем зв'язку п'ятого покоління.....	35
2.2 Інтерфейси базових станцій gNB.....	37
2.3 Сценарії міграції від LTE до 5G.....	42
2.4. Структура радіоінтерфейсу мережі 5G-NR	44
Висновки до другого розділу.....	48
3 Виявлення та ідентифікація базових станцій систем зв'язку 5G.....	49
3.1 Постановка завдання.....	49
3.2 Особливості технології систем зв'язку п'ятого покоління.....	51
3.3 Радіомовний канал.....	56
3.4 Контрольний канал.....	58
3.5 Повідомлення SIB1 спільного каналу.....	60
Висновки до третього розділу.....	62
4 Моделювання процедури пошуку комірки базової станції	63
4.1 Модель синхронізації обладнання користувача з сигналами базової станції.....	63
4.2 Сигнали синхронізації.....	70
4.3 Оцінка і корекція точного зміщення частоти.....	73
4.4 Зіставлення з фізичними ресурсами.....	76

	5
4.5 Синхронізація символів і фреймів.....	79
4.6 Сигнал ширококомовного каналу.....	81
Висновки до четвертого розділу.....	82
Висновки.....	83
Перелік джерел посилання.....	84
Додаток А. Презентація.....	86
Додаток Б. Апробація роботи.....	

ВСТУП

Актуальність теми. Бездротові мережі п'ятого покоління (5G) підтримують широкосмуговий зв'язок, високу мобільність, наднизьку затримку і масові послуги підключення. Для виконання цих вимог до послуг значний інтерес викликають діапазони міліметрових хвиль, які мають велику частину невикористаного спектру.

У 5G New Radio (NR) початковий доступ відноситься до процедури, при якій для устаткування користувача (UE) встановлює початкове з'єднання з мережею, що є важливою передумовою для подальшого обміну даними. Першим кроком початкового доступу є пошук мобільним абонентом сигналу синхронізації низхідної лінії зв'язку, тобто первинного сигналу синхронізації (PSS) і вторинного сигналу синхронізації (SSS), для виявлення присутності мобільного абонента і точного часу і частоти системи. NR-PSS служить для надання початкової інформації про синхронізацію і частоту, а NR-SSS призначений для уточнення синхронізації і частоти при набагато меншій неоднозначності часу і частоти. Невдале виявлення може перезапустити процедуру початкового доступу, що призведе до надмірного енергоспоживання і додатковій затримці.

Виявлення NR-PSS виконується в умовах найбільшої невизначеності за часом і частотою і, отже, є найбільш складною частиною процедури початкового доступу. При виявленні NR-PSS слід припускати велике зміщення несучої частоти (CFO). Підвищена несуча частота робить зміщення частоти надзвичайно великим, а втрати на трасі і втрати проникнення більш значними для міліметрових хвиль. Отже, дуже важливо вибрати стійку форму сигналу для NR-PSS.

Постає завдання дослідження алгоритму процедури пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління, визначення залежності кореляції для трьох значень послідовностей первинного сигналу синхронізації (PSS) $N_{ID}^{(2)}$ від зміщення частоти на вході приймача і визначення максимуму кореляції

PSS на одній з послідовностей. Це дозволяє визначити ідентифікатор комірки обладнання користувача. Також важливо визначити модель відновлення синхронізації символів і фреймів у системі QPSK, що порушена через змінну помилку синхронізації.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є дослідження процедури пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління, дослідження моделей відновлення символів і фреймів. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз методів встановлення синхронізації мобільного абонента з базовою станцією;
- розглянути і дослідити процедуру пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління;
- дослідити модель системи зв'язку з синхронізацією символів і фреймів.

Об'єкт дослідження – процес приймання сигналу, пошук первинного і вторинного сигналів синхронізації.

Предмет дослідження – методи та засоби встановлення синхронізації мобільного абонента з базовою станцією.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених наукових завдань використовується математичний апарат теорії автоматичної підстройки частоти і фази, встановлення синхронізації символів і синхронізації фреймів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше проведено дослідження процедури пошуку комірки базової станції системи зв'язку п'ятого покоління при різних відношеннях сигнал-шум, дана оцінка зміщенню частоти і часу.
2. Набув подальшого розвитку метод забезпечення синхронізації символів і фреймів системи зв'язку п'ятого покоління.
3. Отримали подальший розвиток методи дослідження енергетичної ефективності систем з багатьма антенами.

Практичне значення одержаних результатів:

Проведене дослідження процедури пошуку комірки базової станції може бути використано при відлагодженні роботи системи зв'язку п'ятого покоління при різних відношеннях сигнал-шум.

Публікації. Результати дипломної роботи магістра опубліковані в одній статті у науковому журналі «Вісник хмельницького національного університету».

Структура та обсяг магістерської атестаційної роботи. Дипломна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та додатків. Дипломна робота магістра має загальний обсяг сторінок, з яких основний зміст викладений на сторінках друкованого тексту, містить рисунків та таблиць. Перелік джерел посилання складається з джерел.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Витоки виникнення систем зв'язку п'ятого покоління

Повсюдно доступне бездротове покриття, яке надає необхідну якість обслуговування, стало, таким чином, початковим завданням при розробці систем 5G. Її рішення дозволило б істотно збагатити повсякденний досвід використання мереж мобільного зв'язку в світі дедалі більшим завантаженням даними, великої кількості підключених абонентських терміналів, а також різноманітних вимог бездротових додатків і послуг. Зокрема, очікувалося, що технології зв'язку 5G дозволять як окремим людям, так і їх спільнотам органічно взаємодіяти один з одним, а також з навколишнім інформаційним полем і всілякими сервісами. Таке початкове бачення передбачало, що «розумний» пристрій користувача зможе взаємодіяти з «розумною» хмарою для надання індивідуального бездротового сервісу.

На жаль, сучасні на той момент системи 4G не мали можливості для надання необхідного повсюдного підключення до мережі. Їм бракувало постійності в швидкостях передачі даних, затримки часто перевершували допустимі, і нерідко траплялися відмови в обслуговуванні через низьку якість бездротового з'єднання і підвищеного рівня інтерференції. У підсумку, наявні радіотехнології були визнані нездатними або ж недостатніми для задоволення цільових вимог, і почався активний пошук нових рішень. Сформована ситуація ускладнювалася в міру того, як мільярди різних пристроїв Інтернету речей підключалися до стільникових систем доступу, змінюючи звичний вигляд мережі Інтернет [2]. Всі ці технологічні проблеми послужили передумовами до створення нових бездротових рішень при розробці технологій 5G.

Досягнення нового рівня якості обслуговування користувачів зажадало ґрунтовних змін як в побудові мережевої архітектури, так і в архітектурі самого абонентського обладнання. Робота за відповідними напрямками швидко набрала швидкість в дослідницькому співтоваристві [3-5].

Відображаючи широке розмаїття всіляких пристроїв і послуг, від мобільного телефону до підключеного автомобіля, треба було взяти до уваги різні альтернативні рішення від нових механізмів доступу до безпроводного спектру і сучасних схем взаємодії між пристроями. При цьому ліцензований спектральний радіоресурс залишався досить обмеженим і дорогим в експлуатації, тоді як традиційні способи підвищення ефективності його використання наближалися до своєї теоретичної межі. У зв'язку з цим істотного приросту продуктивності слід було очікувати від використання неліцензійного і загального спектра, що стало можливим при спільному використанні гетерогенних технологій радіодоступу.

Таким чином, на початку свого бурхливого розвитку технології зв'язку 5G прагнули до виконання вимог:

- істотного збільшення доступної ємності бездротової мережі;
- надання однакового за якістю безпроводного з'єднання;
- підвищення рівня якості обслуговування і користування послугою.

Для досягнення цих перспективних цілей в числі інших були вивчені підходи до інтеграції різних технологій радіодоступу та ущільнення мережі, використанням прямих з'єднань між призначеними для користувача пристроями і надвисоких частот, підвищенню енергетичної ефективності при підключенні пристроїв інтернету речей і мобільних пристроїв. Ці основні напрямки досліджень, що розглядаються нижче коротко, привели до швидкого становленню гетерогенних мереж зв'язку 5G.

Мережі 5G мають перспективну архітектуру систем бездротового доступу (рис. 1.1), засновану на використанні різних малих сот і призначену для задоволення нових вимог по ємності і якості покриття мережі. Такі гетерогенні багат шарові покриття передбачають наявність базового шару

макростільників з додатковими шарами більш щільно розміщених сот меншого розміру, таких як пікосоти, фемтосоти, точки доступу WiFi, тощо. Відповідно, базова станція макромережі служить для забезпечення мережевого підключення і підтримки мобільності терміналів на великих площах, тоді як недорогі малі стільники застосовуються для підвищення якості і ємності стільникового покриття.

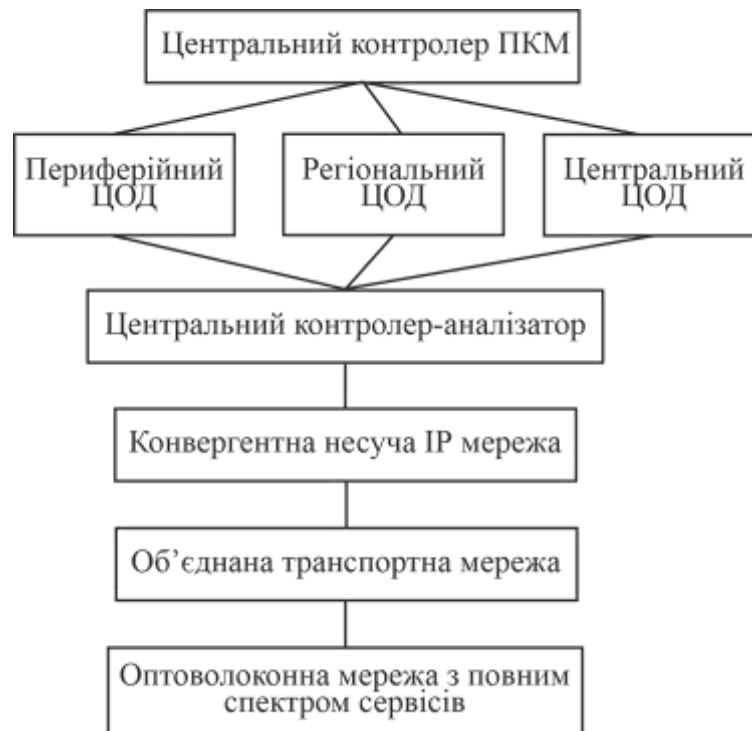


Рисунок 1.1 – Архітектура транспортної мережі 5G (ПКМ – програмно-керована мережа; ЦОД – центр обробки даних)

Мобільні пристрої, оснащені можливостями для встановлення прямого з'єднання [2], можуть також розглядатися в якості одного з шарів в рамках такої ієрархічної гетерогенної структури.

1.2 Інтеграція різних технологій радіодоступу

Поряд із ємністю мережі та швидкістю стільникового з'єднання, рівномірність мережного покриття є важливим фактором, що впливає на якість обслуговування та сприйняття послуг користувачем. Абонентські термінали, розміщені на краю комірки, зазвичай мають бездротове з'єднання нижчої якості через значну віддаленість від базової станції, що обслуговує їх, а також через підвищений рівень інтерференції. Надійність стільникового покриття всередині приміщень також залишається незадовільною. Націлені на забезпечення більш одноманітного та безшовного з'єднання, перспективні системи 5G змушені застосовувати агресивні механізми перевикористання спектрального ресурсу та просунуті засоби керування інтерференцією [8]. Оскільки дані технології були запропоновані порівняно недавно, межі їх застосування в практичних гетерогенних мережах ще не встановлені остаточно. Іншим важливим аспектом є той факт, що стільникові системи в ліцензованому спектрі часто поєднуються географічно з мережами, що функціонують на неліцензованих частотах (наприклад, Wi-Fi).

З іншого боку, сучасні абонентські термінали набувають можливості використання декількох технологій радіодоступу одночасно. Зростання популярності таких пристроїв з підтримкою різних радіотехнологій дозволяє, зокрема, розвантажувати стільникові мережі за допомогою прямих з'єднань між пристроями в неліцензійному спектрі. З урахуванням обмеженої смуги ліцензованих частот зростає необхідність ефективної координації всіляких гетерогенних технологій радіодоступу. У зв'язку з цим розподілені мережі у неліцензованому спектрі можуть скористатися підтримкою з боку централізованих стільникових систем, що використовують ліцензовані частоти.

У міру того як скорочуються зони покриття малих комірок, ефективні радіуси дії стільникових, локальних та персональних мереж доступу починають значною мірою перекриватися. Ця обставина створює можливість

одночасного використання кількох радіотехнологій підвищення якості бездротового зв'язку. Однак такому спільному використанню мереж доступу було приділено значно менше уваги, ніж оптимізації роботи окремих радіотехнологій. Таким чином, інтеграція різних технологій радіодоступу стає важливим напрямом дослідження в мережах 5G, особливо у світлі тенденції до ущільнення стільникового покриття. В результаті бездротові технології ближнього та далекого радіусу дії повинні взаємодіяти більш тісно для досягнення бажаних показників якості обслуговування та сприйняття послуги.

Недавні дослідження спрямовані на вивчення спільного використання кількох технологій радіодоступу для підвищення продуктивності гетерогенних мереж 5G. Зокрема, розгляд ефективних методів управління трафіком, пов'язаних із вибором радіотехнології як на боці абонентського терміналу, так і безпосередньо інфраструктурною стільниковою мережею. Як наслідок, підвищується ефективна швидкість передачі даних та знижується амплітуда її коливань, а середня спектральна ефективність зберігається при цьому на прийнятному рівні. Інтеграція різних технологій радіодоступу в надщільних гетерогенних мережах стає вкрай затребуваним напрямом досліджень не тільки для підтримки багатьох традиційних сценаріїв мобільного зв'язку, але також для забезпечення перспективних додатків Інтернету речей.

1.3 Підвищення енергетичної ефективності пристроїв

Згідно з рядом прогнозів, обсяги мобільного трафіку, що передається бездротовими мережами зв'язку, продовжать суттєво зростати протягом наступних років. Відповідно, розгорнуті в даний час системи широкосмугового доступу будуть схильні до значних перевантажень, викликаних недостатньою ємністю радіомереж і призводять до різкого

зниження якості обслуговування їх користувачів. Однак очікується, що суттєвого приросту в спектральній ефективності вдасться досягти під час використання прямого підключення абонентських пристроїв. Взагалі кажучи, застосування зв'язку «пристрій – пристрій» дозволяє кардинально підвищити рівень перевикористання радіоресурсів у просторі. Зокрема, сусідні абонентські термінали можуть взаємодіяти безпосередньо, без залучення інфраструктури у процес передачі даних.

Взагалі кажучи, використання прямого з'єднання пристроїв у рамках централізованої архітектури стільникової мережі стає новим напрямом для підвищення її спектральної ефективності. При цьому вважається, що за допомогою інтенсивної взаємодії між абонентськими терміналами можна досягти лінійного зростання ємності системи зв'язку зі збільшенням задіяних пристроїв. Ця обставина дозволяє значно підвищити доступну мережну ємність у перспективних системах 5G. Однак цей напрямок досліджень отримав недостатню увагу в наявній технічній літературі. Окремі відомі в цій галузі підходи не враховують належним чином багатьох важливих факторів, таких як реальна архітектура мережі, практичні механізми забезпечення її роботи, а також характеристики бездротового каналу зв'язку.

Зростаюча поширеність мультимедіа-додатків і сервісів, що породжують об'ємні потоки даних, а також більш висока складність конструкції абонентських терміналів, що підтримують декілька технологій радіодоступу, приводять до сукупного значного енергоспоживання пристроїв. Більше того, існує цілий ряд сценаріїв, що включають багато додатків Інтернету речей, в яких тисячі пристроїв підключаються до однієї і тієї ж комірки, де висока енергетична ефективність роботи кінцевого обладнання є визначальною. Необхідність підтримки таких масових послуг створює додаткові проблеми при оптимізації міжмашинної взаємодії. З урахуванням обмеженого зростання ємності акумуляторної батареї, висока енергетична ефективність пристроїв є важливою вимогою в мережах 5G.

У той час як переважна більшість досліджень у розвитку технологій 5G була націлена на підвищення спектральної ефективності, розгляд енергетичної ефективності стає все більш актуальним у тих сценаріях застосування мереж 5G, які орієнтовані на обслуговування терміналів з вкрай обмеженим ресурсом акумуляторної батареї. Це, наприклад, пристрої Інтернету речей і обладнання, що носить. Необхідність забезпечення безперервного бездротового підключення не повинна призводити до швидкого виснаження батареї малогабаритних пристроїв, а збільшення часу їх роботи без підзарядки є важливим практичним завданням. З урахуванням цього обмеження виникають нетривіальні обмінні співвідношення між характеристиками продуктивності окремих пристроїв та мережі загалом.

Характеристики функціонування мереж зв'язку 5G, що відображають зниження енергоспоживання підключених до них пристроїв, як правило, визначаються співвідношенням між досягнутою швидкістю передачі даних і спожитою при цьому потужністю. У зв'язку з цим інтерес представляє розробка нових методів підвищення енергетичної ефективності в системах 5G та проведення відповідної оптимізації. Це стає особливо важливим при здійсненні міжмашинної взаємодії, яка пов'язана з роботою малогабаритного обладнання (сенсори, силові приводи, інтелектуальні вимірювачі, пристрої, що носяться, тощо). Використання пристроїв Інтернету речей стає все більш поширеним у багатьох сферах життєдіяльності, що висуває завдання підвищення енергетичної ефективності такого обладнання на передній план.

З часом обмежений бездротовий спектр став ключовим ресурсом, що застосовується для різних цілей: від економічних і соціальних до наукових та культурних. Однак підходи до управління спектральними радіоресурсами не зазнали значних змін протягом останніх трьох десятиліть, в основному через складність відповідного процесу та недостатню зрілість технологій радіодоступу. Це також пов'язано з необхідністю контролювати багато параметрів радіоспектру, включаючи місце і час його використання, радіочастоти, випромінювану потужність і інтерференцію, що при цьому

виникає. Координація останньої при роботі різних користувачів спектру потребує особливої уваги та завжди залишалася предметом суворого регулювання. Відповідно, відомо багато традиційних методів організації управління спектром [2].

«Командний» спосіб управління спектром. Цей застарілий підхід, що передбачає статичне виділення спектральних радіоресурсів, виник у зв'язку з обмеженнями для історично перших технологій зв'язку.

Тут регулюючий орган виробляє призначення радіочастот деякому користувачу, накладаючи при цьому жорсткі обмеження на їх використання. Приклади такого способу управління спектром зустрічаються в урядовій

та військовій сфері, а також у системах національної безпеки, астрономії та авіації. Звичайно, використання «командного» підходу часто призводило до неефективного використання спектра, викликаючи труднощі у створенні відповідних послуг бездротового зв'язку. Крім того, призначення радіочастот не було засноване на ринкових механізмах через відсутність конкуренції, що призводило до недостатньої економічної ефективності. Традиційно в рамках цього підходу права на володіння спектром видавалися на конкурсній основі та вимагали значного лобювання в органах влади. Останнім часом залучені до цього процесу урядові служби краще розуміють значний ринковий потенціал бездротового спектру і дедалі частіше використовують гнучкіші способи його призначення.

Ексклюзивне користування спектром. Цей спосіб управління спектром заснований на його довгостроковій (порядку 15–30 років) оренді, що закріплює певну смугу частот для використання у чітко обумовлених цілях. Зокрема, ліцензія на користування спектральними радіоресурсами визначає допустимий діапазон частот, область їх використання, а також потужність передачі. В результаті робота з радіоспектром має набору правил, що регламентують максимальний рівень випромінюваної потужності та географічне охоплення території мовлення. Ексклюзивні права на користування спектром дозволяють їх власникам (наприклад, операторам

мобільного зв'язку) використовувати власні механізми управління інтерференцією. Це призводить до можливості гарантувати певний рівень якості обслуговування їх абонентів, але створює високий бар'єр при вході на даний ринок. На відміну від застарілих конкурсів, призначення радіочастот регулюється тут безпосереднім продажем спектру: більшість залучених регламентуючих органів на сьогоднішній день використовує гнучкі ринкові підходи (аукціони) для розподілу підконтрольних їм частотних діапазонів.

Загальне користування ліцензованим спектром. Відповідно до цієї концепції частотні діапазони деякого ліцензованого власника (названого первинним користувачем) можуть бути надані в спільне користування одному або декільком неліцензованим (вторинним) користувачам. Важливо відзначити, що доступ вторинних систем до спектру загального користування може в ряді випадків здійснюватися без оповіщення первинного користувача та вимагає певних заходів захисту з боку останнього, щоб уникнути порушення роботи первинної системи зв'язку. Цей спосіб організації управління спектром породив сплеск робіт, пов'язаний з дослідженням програмно-керованих технологій радіодоступу, когнітивних і адаптивних систем, а також мереж, що перебудовуються (реконфігуруються), з метою збереження бажаних властивостей динамічного доступу до спектру (наприклад, використання смуги захисних інтервалів діапазону аналогового телебачення). Однак принциповим обмеженням такого підходу до управління спектром є неможливість надання вторинними системами зв'язку будь-яких гарантій щодо якості обслуговування їх абонентів у такому спектрі загального користування.

Загальне користування неліцензованим спектром. Коли деяка смуга радіочастот надається у відкритий доступ, жоден з користувачів не може отримати її у своє виняткове розпорядження, оскільки відповідні спектральні радіоресурси мають бути доступними для справедливого загального користування. Прикладами подібних частотних діапазонів є смуги для промислового, наукового та медичного застосування ISM, у яких багато

потенційних користувачів (наприклад, медичні та сенсорні пристрої, мікрохвильові печі, бездротові телефони, мережі WiFi, тощо) отримують спільний доступ до бездротового спектру без додаткових перешкод. Незважаючи на те, що такий нерегульований доступ до радіочастот значно спрощує вихід на відповідний ринок, він також створює ризик виникнення неконтрольованої інтерференції, яка у свою чергу ускладнює забезпечення необхідної якості обслуговування абонентів. Крім того, багато користувачів загального спектру може потрапити в критичну ситуацію, в якій жоден із них не може досягти задовільного результату. Такий результат дуже ймовірний в наш час, коли бурхливе зростання популярності мереж WiFi та використання їх операторами мобільного зв'язку для розвантаження своїх стільникових мереж загрожують якості роботи систем, що функціонують на неліцензованих частотах

1.4 Зміна бездротових підключень в епоху 5G

Для подолання негативних наслідків тривалої фрагментації у способах організації управління спектром, які на сьогоднішній день призводять до вкрай нерівномірної доступності, виникає гостра необхідність у розробці нових механізмів організації доступу до радіочастот загального користування, а також у наданні додаткових спектральних радіоресурсів для потреб систем мобільного зв'язку. Ця обставина стає особливо важливою у світлі неухильного збільшення навантаження на радіочастоти, пов'язаного з зростаючими обсягами мобільного трафіку.

Основними стимулами зростання кількості переданих через мережі зв'язку даних користувача є висока популярність мультимедіа-додатків, широке різноманіття моделей абонентських терміналів, і навіть велике різноманіття ресурсомістких додатків та сервісів. Очікується, що дані чинники лише посилять поточну ситуацію з часом, тобто. в епоху розвитку

технологій 5G необхідними є термінові заходи щодо підвищення ємності мереж доступу та обсягу спектральних радіоресурсів.

Ці та інші обставини, пов'язані зі збільшенням обсягів мобільних даних, викладені у звіті ITU-R M.2370, який містить глобальні прогнози зростання трафіку, зібрані з декількох джерел.

Відповідно, слід очікувати, що навантаження на системи міжнародного мобільного зв'язку ІМТ зросте від 10 до 100 разів з 2020 по 2030 рік, і з нею можуть не впоратися наявні мережі 4G. Як наслідок, підвищення ефективності використання вже доступного системам ІМТ бездротового спектру може бути недостатньо для досягнення необхідних показників продуктивності. Важливим є як призначення нових радіочастот для ексклюзивного використання бездротовими мережами доступу, і ефективніше застосування частот загального користування для потреб операторів мобільного зв'язку.

В результаті обумовлені широким розповсюдженням нових пристроїв і готуються обслуговувати вироблений ними мобільний трафік гетерогенні мережі зв'язку 5G поєднують у собі цілу низку удосконалень та нових функцій, призначених для підвищення продуктивність сучасних бездротових рішень. Вони включають більш тісну інтеграцію різних технологій радіодоступу та ущільнення мережі, використання прямих з'єднань між пристроями для розвантаження стільникової мережі та вкрай високих частот для підвищення швидкості передачі даних, механізми конвергенції з Інтернетом речей і підтримки обладнання, що носить, а також методи передачі із застосуванням масивних багатоантених систем МІМО, технології одночасної передачі та прийому даних та багато інших.

З усіх наведених вище рішень радикальне ущільнення мережі, потужні системи МІМО і зв'язок на дуже високих частотах, тобто, міліметрових хвилях (mmWave) були названі «великою трійкою» технологій 5G. Рішення застосовувати mmWave стає при цьому основним нововведенням у системах

5G і готується забезпечити 20-кратне збільшення продуктивності у межах необхідного 1000-кратного зростання ємності мереж до 2020 року (рис. 1.2).

Це пов'язано з тим, що широкі діапазони достатньо рідко використовуюваного спектра доступні в смузі частот від 30 до 300 ГГц (що відповідає довжині хвилі 1-10 мм), а також меншою мірою від 20 до 30 ГГц.

Однак розширення доступного системам мобільного зв'язку спектрального діапазону бік вкрай високих частот довгий час вважався

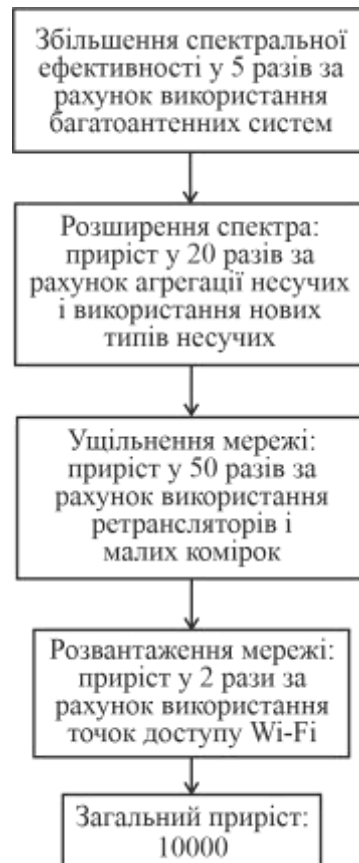


Рисунок 1.2 – Способи збільшення ємності мережі

скрутним через труднощі, пов'язані з поширенням міліметрових хвиль, таких як значні втрати на трасі, низькі коефіцієнти дифракції та проникнення, сильний фазовий шум, а також суттєве поглинання атмосферою та ослаблення у разі дощу, туману або снігу.

Порівняно недавно було показано, що, незважаючи на особливості поширення, вкрай високі частоти можна використовувати для систем зв'язку

наступного покоління в різних діапазонах. Наступний ажіотаж у пошуках нового придатного спектру виявив, що найбільш привабливими частотами є 28-30 ГГц; 71-76 ГГц; 81-86 ГГц і 92-95 ГГц, а також неліцензовані частоти 60 ГГц, які вже давно використовуються системами зв'язку IEEE. Для нової радіотехнології 3GPP, що отримала назву New Radio, цікаві частоти 28, 71–76 і 81–86 ГГц (для розгортання малих комірок і транзитних каналів [3]), тоді як технології IEEE 802.11ad (WiGig) та 802.11ay використовують 60 ГГц (для зв'язку ближнього радіусу дії). До інших систем зв'язку mmWave для застосування в основному всередині приміщень можна віднести IEEE 802.15.3c, WirelessHD і ECMA-387.

1.5 Створення мережі інтернету речей

Технології широкопasmового зв'язку широко використовуються як важлива складова повсякденної життєдіяльності сучасного суспільства і набули практично того ж ступеня важливості, що і водопостачання або електрика. На сьогоднішній день бездротові системи радіодоступу забезпечують широкий діапазон різноманітних послуг зв'язку, від професійних та розважальних мереж до різних промислових застосувань. Подальший розвиток наявних радіотехнологій все більше стимулює прогрес і впроваджується в ринкові сегменти за межами телекомунікаційної сфери, такі як промислова автоматизація, управління виробничими процесами, автомобілебудування, інтелектуальні транспортні системи, енергетика, теле- та радіомовлення, а також охорона здоров'я.

Для прискорення темпів свого економічного та соціального розвитку системи ІМТ наступного покоління мають вирішити нові для них великі завдання:

- підтримка дуже високих швидкостей передачі даних;
- підключення великої кількості пристроїв різних типів;

- забезпечення вищої якості різноманітних послуг зв'язку;
- підвищення економічної доступності та зниження експлуатаційних витрат. Маючи на увазі ці цілі, а також очікуючи зростання обсягів мобільного трафіку на рівні від 10 до 100 разів між 2020 і 2030 роками, Міжнародна спілка електрозв'язку ІТУ поставила за мету визначити перспективи подальшого розвитку систем ІМТ.

Відповідно до цього, основний розвиток специфікацій ІМТ-2020 планується до завершення близько 2020 року, після чого розпочнеться фаза впровадження відповідних технологій. Цікаво згадати, що розвиток системи ІМТ-2000 зайняв загалом 15 років (1985–2000) і спричинив запуск мобільних мереж третього покоління 3G, тоді як розвиток системи ІМТ-Advanced і мобільних мереж четвертого покоління 4G, уклалося в 12 років (2000–2012). З урахуванням подальшого підвищення темпів розробки та скорочення її термінів до 8 років (2012–2020), очікується, що перспективне п'яте покоління 5G широкосмугового мобільного зв'язку значно удосконалив усі аспекти роботи системи від підвищення ефективності використання радіоспектру та механізмів фізичного рівня до підтримки програмно-керованої конфігурації та гнучкого управління мережею.

Як було описано вище, ключові технології «великої трійки», що складають основу новітніх мереж зв'язку 5G, включають подальше ущільнення мережі малими комірками різних розмірів на основі різноманітних технологій радіодоступу для підвищення її ємності, застосування вкрай високих частот (технології mmWave) для подолання дефіциту традиційного бездротового спектру, а також використання масивних багатоантенних схем та технологій з метою підвищення спектральної ефективності передачі. Поєднання подібних рішень має забезпечити досягнення пікової швидкості передачі даних в 10 Гбіт/с.

Наприкінці 2015 року у відповідь на ці жорсткі вимоги комітет 3GPP розпочав активну роботу зі створення нової радіотехнології (New Radio) у рамках системи 5G, яка б змогла функціонувати в діапазоні mmWave без

зворотної сумісності з попередніми рішеннями. Одночасно продовжився розвиток наявної системи LTE-Advanced. За допомогою мережі радіодоступу New Radio, що розробляється 3GPP, перспективні системи 5G отримають можливість обслуговувати широке коло ресурсомістких користувацьких додатків, включаючи служби визначення місцезнаходження абонентів, хмарні та соціальні сервіси, мультимедіа-послуги високої роздільної здатності, додатки віртуальної та доповненої реальності, тощо.

Однак застосування мереж 5G не обмежується сценаріями, орієнтованими на обслуговування людей як користувачів, а передбачає також забезпечити підтримку широкого кола сценаріїв, що включають так звану міжмашинну взаємодію M2M. Відповідно, додаткові та суворіші вимоги виникають щодо затримки, доступності, надійності, масштабованості, вартості та енергетичної ефективності зв'язку для додатків M2M. Наприклад, технології 5G повинні надати затримку на рівні радіодоступу не більше 1 мс і працювати зі швидкостями руху вузлів до 500 км/год. З іншого боку, системи зв'язку наступного покоління забезпечать високу густину підключених пристроїв (до $10^6/\text{км}^2$) із надзвичайно низьким енергоспоживанням.

При виконанні нею всіх заявлених вимог система ІМТ-2020 стане найбільш досконалим засобом для обслуговування різноманітних програм Інтернету речей IoT, побудованого на технологіях міжмашинної взаємодії M2M, і, тим самим, дозволить підключити до мережі велику кількість різних машин, що функціонують при мінімальному втручанні людини. Передбачені таким чином сценарії застосування гетерогенних мереж зв'язку 5G можна умовно розділити на три широкі класи, два з яких містять виключно додатки M2M та Інтернету речей:

- розширений мобільний ширококутовий доступ. Мобільний ширококутовий доступ націлений на обслуговування людей як користувачів, які отримують доступ до різних мультимедіа додатків, послуг та даних. Очікується, що потреба у підтримці цього виду сервісів продовжить зростати, а для їх забезпечення потрібно розширення мережевих

можливостей. У результаті розширений мобільний ширококутовий доступ дозволить здійснити сценарії, в яких зможуть функціонувати нові додатки користувачів з підвищеними вимогами до продуктивності, що передбачають вищу якість сприйняття послуги. Такі сценарії численні і включають як забезпечення покриття мережею великої області простору (wide-area), так і організацію доступу в окремих локаціях (hotspot), які, очевидно, повинні мати різні характеристики. Для окремих локацій, у яких спостерігається висока щільність розміщення абонентів, важливі достатньо високі ємність мережі та швидкість передачі даних, тоді як вимоги підтримки мобільності є не такими строгими, як у випадку покриття великої області. Для такого покриття потрібне безперервне з'єднання навіть при переміщенні абонента з високою швидкістю;

- масова міжмашинна взаємодія. Даний клас сценаріїв характеризується дуже великою кількістю підключених пристроїв, які передають порівняно невеликі обсяги стійких до затримки даних. Потрібно, щоб такі пристрої мали низьку вартість, а також тривалий час роботи без перезаряджання або заміни батареї живлення. Такі умови є типовими для широкого класу об'єктів, що взаємодіють, від нескладних побутових пристроїв до більш просунутих приладів з розширеними можливостями. Прикладами є системи спостереження за інтелектуальними енерго- та сільськогосподарськими системами, підключені сенсори та вимірювачі, силові приводи, мобільні пристрої, камери спостереження, а також автомобілі нового покоління;

- надійна взаємодія із низькою затримкою. Для цього класу сценаріїв характерними є суворі вимоги до показників роботи системи, таких як її пропускна здатність, затримка доставки даних та доступність бездротового з'єднання. Як приклад можна навести бездротові системи контролю промислового виробництва, віддаленого здійснення медичних послуг, розподілу навантаження в інтелектуальних енергосистемах, забезпечення безпеки дорожнього транспорту тощо. Подібні умови функціонування вимагають організації міжмашинної взаємодії в режимі реального часу для,

наприклад, самокерованих автомобілів та безпілотних літальних апаратів, процесів промислового виробництва, оперативного контролю та оптимізації систем транспортної безпеки, роботи служб надзвичайного реагування та ряду інших додатків.

Стрімкий розвиток у зв'язку конвергентної екосистеми 5G-IoT передбачає, що різноманітні підключені пристрої отримають можливість взаємодіяти один з одним за допомогою різних технологій радіодоступу, включаючи ті, які оперують з дуже високими частотами та ширшою смугою пропускання. Для задоволення різноманітних вимог ІМТ-2020 знадобиться узгоджене використання різних радіотехнологій, що включає подальший розвиток LTE-Advanced і системи New Radio комітету 3GPP спільно з різними протоколами доступу сімейства IEEE, такими як поширені мережі Wi-Fi і численні рішення для бездротового зв'язку ближнього радіусу дії.

Такі гетерогенні мережі зв'язку 5G неодмінно зіткнуться з рядом труднощів, пов'язаних, перш за все, з підтримкою просунутих IoT пристроїв з підвищеними запитами до якості обслуговування, у тому числі безпілотних автомобілів і літальних апаратів, а також промислових роботів.

1.6 Інтеграція технологій радіодоступу та ущільнення мережі

Гетерогенні мережі зв'язку 5G побудовані на основі архітектури, яка включає ієрархічну структуру базових станцій з комітками різного розміру, що використовують різноманітні технології радіодоступу. У таких системах абонентські термінали при передачі своїх даних мережній інфраструктурі мають можливість використовувати кілька радіотехнологій одночасно. Зі збільшенням числа таких терміналів на ринку оператори мобільного зв'язку стають більш зацікавлені в ефективному використанні радіоресурсів кількох мереж доступу для збільшення ємності інтегрованої системи зв'язку та підвищення якості з'єднання користувачів. Таким чином, взаємодія між

різними технологіями радіодоступу та можливість ефективного управління ними стають основними особливостями мереж 5G.

Розглядаються різні варіанти інтеграції мереж доступу на прикладі технологій LTE та WiFi. Особлива увага приділяється методам вибору кращої радіотехнології та схем планування радіоресурсів, що функціонують на рівні мережі радіодоступу, які можуть бути реалізовані як на боці абонентських терміналів, так і на боці мережної інфраструктури. Проводиться порівняння традиційних та нових алгоритмів такого управління в рамках гетерогенної системи зв'язку 5G для виявлення переваг підходу з так званим мережевим сприянням, коли абонентські термінали забезпечуються актуальним знанням щодо, наприклад, завантаження мережі радіодоступу.

Запропонована просторово-часова математична модель враховує динаміку абонентського трафіку в часі та розміщення вузлів мережі у просторі, а також узгоджується з результатами імітаційного моделювання.

Вона дозволяє вивчати просунуті алгоритми керування трафіком в гетерогенних мережах 5G, особливо ті, які застосовують мережеву взаємодію для організації ефективної роботи різнорідних радіотехнологій (наприклад, LTE та WiFi) та оперативного вибору кращої мережі доступу. Використовуваний математичний апарат заснований на методах стохастичної геометрії, які об'єднуються тут із підходами теорії масового обслуговування для моделювання просторової взаємодії між вузлами спільно з динамікою їхнього трафіку на рівні сесій у типових умовах функціонування систем 5G.

Крім того, враховується важлива практична тенденція до ущільнення мереж доступу, пов'язана з необхідністю передачі все зростаючих обсягів даних від мобільних абонентів. На відміну від традиційного розвантаження трафіку користувачів із стільникової системи зв'язку в локальну мережу доступу, яка активно застосовувалася в гетерогенних мережах попередніх поколінь, у тісно інтегрованих системах 5G можливе поєднання функціоналу радіотехнологій LTE та WiFi в рамках єдиного модуля доступу. Робота таких

поєднаних систем, особливо для надщільних покриттів малими стільниками LTE-WiFi, що дозволяють абонентському терміналу вести передачу даних по кільком технологіям радіодоступу одночасно, пов'язана зі специфічною просторово-часовою динамікою.

Розвиток мобільного зв'язку в епоху 5G потребує принципових змін у мережній інфраструктурі, а також в архітектурі абонентських терміналів (UE), які при цьому починають враховувати контекст їхнього використання.

Вважається, що найбільш доцільним методом подолання дефіциту радіоресурсів у мережах 5G в порівнянні з мережами попередніх поколінь стає розміщення малих комірок з базовими станціями для більш високої щільності покриття. Завдяки відносно коротким каналам радіозв'язку використання малих комірок дозволяє досягти підвищених швидкостей передачі даних, а також знизити енергетичні витрати на передачу по лінії вгору, особливо в умовах міської забудови.

Однак розміщення базових станцій з більш високою густиною для збільшення ємності мережі приводить до зростання складності управління інтерференцією, збільшення вартості розгортання мережі та додатковим витратам для підтримки її працездатності. При цьому на сьогоднішній день ліцензований радіоспектр є дуже обмеженим і тому дорогим ресурсом, а традиційні методи підвищення ефективності його використання наближаються до своїх теоретичних меж. Навіть при виділенні додаткового радіоспектру для послуг мобільного зв'язку відповідні радіочастоти залишаються сильно фрагментованими та вимагатимуть застосування різних технологій радіодоступу RAT. Таким чином, виникає гостра необхідність у координуванні різнорідних технологій радіодоступу для підвищення ємності мережі зв'язку.

Як наслідок стає актуальним поєднувати гетерогенні технології радіодоступу у більш складну інтегровану мережу зв'язку, а також розробляти методи ефективного використання радіоресурсів, які доступні в різних спектральних діапазонах та асоційовані з різнорідними технологіями

радіодоступу. Зокрема, очікується, що суттєвий приріст ємності можна отримати за рахунок побудови гетерогенної архітектури мережі, яка могла б агрегувати ліцензований та неліцензований спектральний радіоресурс. Наприклад, абонентські термінали, що підтримують одночасну роботу кількох технологій радіодоступу, можуть використовувати доступ до неліцензованого діапазону частот для розвантаження інфраструктурних стільникових з'єднань.

На сьогоднішній день, у міру зменшення зон покриття базових станцій, ефективні області обслуговування стільникових, локальних та персональних мереж доступу починають значною мірою перекриватися. Це створює передумови до одночасного використання кількох технологій радіодоступу для покращення якості зв'язку. Передбачається, що таке інтелектуальне використання багатьох радіотехнологій дозволить досягти підвищеної ефективності щодо низки показників, що включають просторове, часове та частотне рознесення, координування інтерференції, завантаження мережі, тощо. У перспективних мережах п'ятого покоління радіотехнології ближнього та далекого радіусу дії можуть бути використані спільно в процесі тісної взаємодії між абонентським терміналом та мережею зв'язку, а також безпосередньо між самими терміналами для досягнення вищої якості обслуговування абонентів.

Як наслідок, зростає необхідність у координуванні спільної роботи різних технологій радіодоступу та очікується, що використання багатьох радіотехнологій у сукупності з відповідними засобами координування на боці абонентських терміналів та мережної інфраструктури стануть невід'ємною характеристикою систем зв'язку нової генерації. Зокрема, розподілена локальна мережа у неліцензійному діапазоні частот WLAN може сприяти централізованій функції управління, яка розміщена на боці стільникової системи зв'язку. Це дозволяє проводити ефективне встановлення з'єднання користувача з мережею за наявності альтернативних технологій радіодоступу і, таким чином, підвищувати продуктивність

системи, а також покращувати надійність з'єднань. Розглядаються завдання вибору кращої технології радіодоступу та планування радіоресурсів в інтегрований мережі зв'язку, і виявлення відповідного приросту продуктивності. Подальші дослідження зосереджені на спільній роботі різних технологій радіодоступу у межах гетерогенної системи зв'язку. В якості прикладу розглядається взаємодія точок доступу локальної мережі WLAN із малими сотами мобільного оператора в контексті організації відповідної архітектури системи зв'язку та з'ясування переваг різних форм інтеграції. Мета цього дослідження полягає в аналізі показників ефективності, таких як ємність системи зв'язку та якість з'єднання для користувача.

Слід зазначити, що взаємодія локальних та стільникових систем доступу неодноразово розглядалося в дослідницькій літературі з позицій перемикання між ними, яке називається вертикальним. Комітет зі стандартизації мобільних систем зв'язку 3GPP протягом кількох років був значною мірою залучений до розробки специфікацій, спрямованих на забезпечення ефективної спільної роботи стільникових та локальних мереж. Створення таких специфікацій проводилося в рамках кількох напрямів роботи, які мали на меті більш тісну інтеграцію між двома типами систем. Вони включають рішення для довіреного доступу WLAN до послуг 3GPP, організацію безшовної мобільності між технологіями 3GPP та WLAN, а також розробку функціоналу для виявлення та вибору мережі доступу ANDSF. В той час, як раніше підходи дозволяли забезпечувати нещільну взаємодію 3GPP та WLAN на рівні опорної мережі (ядра мережі), починаючи з 3GPP Release 12, велася робота з організації більш тісної взаємодії лише на рівні мережі радіодоступу RAN [2].

Така активність пов'язана з необхідністю підвищення якості обслуговування у неліцензованому діапазоні частот відповідно до вимог мобільних операторів, які прагнуть таким чином збільшити надійність з'єднань Wi-Fi. У свою чергу, комітет зі стандартизації локальних мереж

WLAN розгорнув роботу зі створення специфікацій HotSpot 2.0, а також ініціював новий напрямок з розробки систем WLAN підвищеної ефективності у рамках робочої групи IEEE 802.11. Таким чином, актуальним є дослідження рішень щодо інтеграції 3GPP та WLAN на рівні RAN, що дозволяють досягти більш оперативного координування між радіотехнологіями стільникових та локальних мереж доступу. Нижче описуються можливості забезпечення такої взаємодії та відповідні інтелектуальні алгоритми, а також досліджується їх вплив на показники якості зв'язку абонента та характеристики роботи системи в цілому. При цьому різняться підходи, які ухвалюють рішення про управління інформаційними потоками, які функціонують на боці абонентських терміналів та системи зв'язку відповідно.

Розглядається важливе завдання вибору кращої радіотехнології на прикладі гетерогенної системи зв'язку, що включає в себе стільникову та локальну мережу доступу. Передбачається, що локальна мережа WLAN є частиною інтегрованої системи HetNet, яка розміщена та управляється деяким мобільним оператором. На основі механізмів, розроблених комітетом зі стандартизації 3GPP, стільникова інфраструктура забезпечує інтелектуальне сприяння у процесі управління інформаційними потоками. Управління здійснюється на основі допоміжної інформації (наприклад, місце розташування абонента, вимоги до якості обслуговування, вимірювання інтерференції та завантаження найближчих мереж WLAN, тощо), яка надходить від абонентських терміналів на спеціалізований керуючий модуль, розташований на боці стільникової інфраструктури. Цей модуль рекомендує абонентським пристроям ту чи іншу радіотехнологію та подальше викладення спрямовано на вивчення взаємодій у аналізованій системі.

Нижче розглядається несумісне розміщення малих комірок з базовими станціями LTE і точок доступу WiFi, а також не передбачається наявність прямого інтерфейсу взаємодії між стільниковою та локальною мережею доступу. Інший тип розміщення, побудований на суміщених LTE-WiFi

модулях і має на увазі більш тісну інтеграцію відповідних мереж буде розглянуто в наступному розділі. Тут же передбачається архітектура гетерогенної мережі з інтеграцією на рівні RAN, що має у своєму розпорядженні необхідні динамічні механізми вибору мережі радіодоступу. Наводиться приклад аналізу системи для передачі даних по лінії вгору, що є більш цікавим для дослідження випадок у зв'язку з підвищеною складністю обліку радіоінтерференції.

Основна новизна пропонованого підходу полягає у явному обліку динаміки трафіку лише на рівні сесій абонентського пристрою. Це значною мірою розширює попередні результати для статичних (насичених) вхідних потоків. Нова сесія, що являє собою, наприклад, потік даних реального часу з деякими мінімальними вимогами щодо швидкості передачі, виникає у абонента випадковим чином і закінчується після закінчення свого обслуговування. Відповідно, кількість активних сесій змінюється згодом, що можна називати динамікою трафіку лише на рівні сесій. Аналіз такої наближеною до практики системи є актуальним завданням, але пов'язаний з низкою складнощів. У зв'язку з цим підходи до дослідження подібних динамічних мереж зв'язку значно менш поширені в літературі у порівнянні з методами аналізу насичених систем.

Кожна сесія в динамічній системі зв'язку, являє собою потік даних, викликаний відправкою файлу, встановленням віддаленого з'єднання або ініціюванням мультимедіа - передачі. Для моделювання таких сесій, породжених наявністю багатьох незалежних абонентських терміналів, широко застосовуються пуассонівські процеси. Історично проведення моделювання на рівні сесій було характерним для провідних мереж зв'язку. Розширюючи область застосування таких постановок для бездротових систем, необхідно додатково враховувати взаємне розміщення абонентських терміналів та модулів мережевої інфраструктури. Подібні підходи, що полегшують спільний облік динаміки трафіку та розміщення вузлів, мало вивчені в літературі, що обумовлює новизну запропонованої нижче моделі.

На сьогоднішній день загальновідомо, що взаємне розташування вузлів гетерогенної мережі значною мірою визначає її підсумкову ефективність. Дійсно, через нерегулярне розміщення терміналів та інфраструктури спостерігається високий рівень нерівномірності характеристик, яка може бути врахована у явному вигляді за допомогою спеціальним чином підбраного випадкового процесу. Наприклад, розташування абонентських терміналів на площині можуть бути породжені деякою реалізацією стохастичного потоку точок. Об'єднання моделей випадкового розміщення вузлів та динаміки їх трафіку дозволяє принциповим чином змінити підхід до аналізу потужності прийнятого сигналу та радіоінтерференції. При цьому можуть використовуватись методи стохастичної геометрії, яка широко застосовувалася для аналізу загальносистемних характеристик випадкового розміщення абонентських терміналів та модулів мережної інфраструктури.

Використання стохастичної геометрії (тобто статистичного моделювання просторової взаємодії) набуло в останні десятиліття значну популярність, що пов'язано з необхідністю аналізу загальносистемної ефективності, усередненої за результатами багатьох просторових реалізацій. Порівняно нещодавно подібні методи були успішно застосовані для дослідження сучасних стільникових технологій зв'язку, починаючи з традиційного розміщення макросот і аж до надщільних покриттів малими (гетерогенними) комірками з базовими станціями. Побудови стохастичної геометрії зазвичай ґрунтуються на розгляді деякого випадкового точкового процесу на площині або у просторі для проведення статистичного моделювання, наприклад, розташування абонентських терміналів та подальшого аналізу аспектів, пов'язаних із щільністю розміщення терміналів, потужністю передачі, втратами при поширенні радіохвиль та інтерференцією.

За відсутності конкретної інформації щодо розташування абонентських терміналів, найпростішим способом моделювання їх розміщення на площині є використання рівномірного розподілу в цільовій замкнутій області. Такий

характер розташування пов'язаний із застосуванням однорідного пуассонівського точкового процесу, який передбачає незалежне

і рівномірне розміщення деякого числа точок у межах цієї області. Більш складним і реалістичним підходом до моделювання є використання біномного процесу, який породжує фіксовану кількість точок у заданій області, а також пуассонівського кластерного процесу, що дозволяє точкам групуватися у певних локаціях. Зрештою, також виділяють так звані процеси твердого ядра, які виходять просіюванням пуассонівського процесу таким чином, щоб забезпечити певну мінімальну відстань між точками.

Просторово-часовий підхід, що пропонується тут, дозволяє провести дослідження взаємодії стільникових та локальних мереж доступу на рівні сесій і, зокрема, розглянути управління трафіком та вибір (призначення) кращої радіотехнології. Відповідно, у наступному підрозділі вводиться нова модель інтегрованої гетерогенної мережі доступу та потім проводиться аналіз загальносистемних показників її ефективності.

Розглянемо модель гетерогенної мережі доступу, яка включає покриття макро- і піко-стільників, а також множину точок доступу (ТД) WLAN, які називають шарами. Далі йдуть основні припущення запропонованої моделі. Розглядається один (типовий) макростільник радіусом R з базовою станцією (БС), яка розміщена у її геометричному центрі. Також передбачається наявність кількох піко-БС та ТД WLAN. Таким чином, макростільник отримує назву макрошару, тоді як безліч пікосот і покриття

ТД WLAN називаються пікошаром і шаром WLAN відповідно. Кожна ТД/БС аналізованої системи зв'язку може обслуговувати абонентські термінали, що передають дані по лінії вгору. Розглянутий тип трафіку відповідає сесіям реального часу з мінімальною необхідною швидкістю передачі даних r_0 . На основі наведених специфікацій 3GPP передбачається використовувати фрагменти бездротового спектру, що не перетинаються, для розміщення трьох описаних вище шарів. Як наслідок, робота абонентських терміналів в рамках одного шару не інтерферує з передачею у інших шарах.

При цьому підключені як до шару WLAN, так і до піко-шару термінали використовують радіоресурси спільно (з урахуванням відповідної інтерференції), тоді як у макрошарі інтерференція не розглядається.

Висновки до першого розділу

Абоненти систем зв'язку мають потребу в надійному бездротовому підключенні, а також в доступі до широкого кола сучасних мультимедійних додатків. Це вимагає перспективних напрацювань для забезпечення потрібної швидкості передачі даних для надання послуг високої якості. Повсюдно доступне бездротове покриття, яке надає необхідну якість обслуговування, стало початковим завданням при розробці систем 5G. Таке початкове бачення передбачало, що «розумний» пристрій користувача зможе взаємодіяти з «розумною» хмарою для надання індивідуального бездротового сервісу.

Системи зв'язку 5G мають перспективну архітектуру систем бездротового доступу, засновану на використанні різноманітних малих комірок і призначену для задоволення нових вимог по ємності і якості покриття мережі.

2 БУДОВА СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

2.1 Архітектура базових станцій систем зв'язку п'ятого покоління

Базові станції (gNB) формують мережу радіодоступу мобільного зв'язку 5-го покоління (NR Radio Access). Конструктивно кожна базова станція представляла собою велику залізну шафу, висотою 1,5-2 метра, яку встановлюють в кондиційованих приміщеннях. Від базової станції до антен, які розміщують на вежах, стовпах, тощо, прокладалися радіочастотні фідери (перетином 7/8 дюйма або більше - в залежності від протяжності траси).

Близько 10 років тому виробники почали випуск так званих розподілених базових станцій, на основі яких в даний час побудовані мережі мобільного зв'язку 2G-GSM, 3G-UMTS і 4G-LTE більшості операторів зв'язку. Така базова станція включає в себе базовий блок (або BBU - Baseband Unit), які розміщуються «на землі», і декілька радіомодулів (або RRU), що розміщуються поблизу антен стільникового зв'язку. BBU і RRU пов'язані між собою оптичним кабелем, поверх якого реалізується інтерфейс CPRI (Common Public Radio Interface). Радіомодуль здійснює аналого-цифрове / цифро-аналогове перетворення, підсилення і фільтрацію сигналу, формування радіочастотного тракту. Стек протоколів взаємодії базової станції з призначеним для користувача терміналом і базовою станцією з ядром мережі, а також алгоритми обробки сигналів реалізуються базовим блоком (BBU). BBU по суті являє собою невеликий сервер, який може бути встановлений або в телекомунікаційній стійці (якщо існує якийсь виділене приміщення), або в кліматичній шафі на даху будівлі, або безпосередньо на стовпі / радіощоглі для BBU зовнішнього (outdoor) виконання.

Наступним кроком розвитку архітектури побудови базових станцій стала концепція хмарних BBU або «Cloud BBU», яка полягала у відмові від локальних BBU, що розміщуються на об'єктах БС, і перенесення їх

функціональності на віртуалізовані ресурси потужних серверів, розміщених в центрах обробки даних (ЦОД). Дана концепція за рахунок централізації ресурсів дозволяє підвищити надійність і ємність базових станцій, одночасно знизивши витрати на їх експлуатацію. Однак вона не знайшла істотного застосування через високі вимоги до характеристик CPRI каналів:

- допустима затримка (RTT) - 5мкс;
- допустимий рівень бітових помилок - 10-12;
- стабільність частоти - 0.002ppm
- пропускна здатність для 4G-LTE в смузі 20МГц в залежності від кількості потоків - до 10G (в цьому випадку вимоги до пропускної здатності CPRI для мереж 5G в смузі 400МГц можуть вирости до 400G).

Архітектура базових станцій gNB мережі мобільного зв'язку 5-го покоління, яка пропонується 3GPP, являє собою подальший розвиток базових станцій і «Cloud BBU». gNB включає в себе центральний модуль gNB-CU (gNB Central Unit) і один або декілька розподілених модулів gNB-DUs (gNB Distributed Unit). 3GPP визначає 8 можливих опцій поділу функцій між CU і DU (рис. 2.1). При цьому опція 8 відповідає класичній (існуючій) схемі побудови розподіленої базової станції.

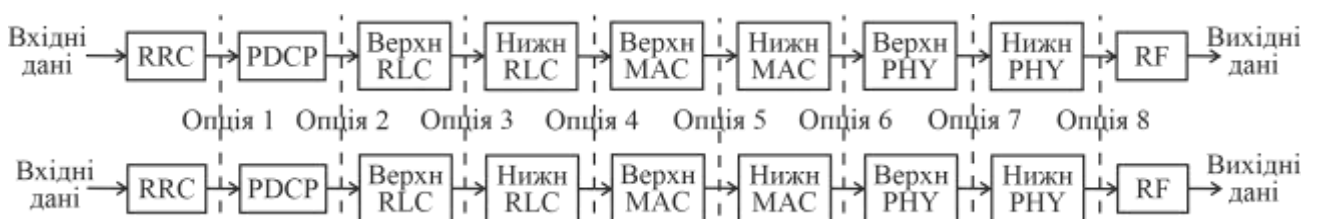


Рисунок 2.1. – Будова розподіленої базової станції

Основні функції, що реалізуються на тих чи інших рівнях, описані нижче. Рекомендація 3GPP TS 38.401 V15.0.0 визначає архітектуру побудови базової станції, засновану на 2-ій опції поділу функцій. В цьому випадку RRC і PDCP реалізуються в центральному модулі (gNB-CU), а RLC, MAC і

фізичний рівень - в розподіленому (gNB-DU). Взаємодія між gNB-CU і gNB-DU відбувається за інтерфейсом F1.

Виробники мають можливість проектувати базові станції, вводячи додаткові площини поділу, виділяючи радіоблок з розподіленого модуля за допомогою інтерфейсу F2 (відповідно до опції 7), а також розносячи PDCP користувачького трафіку і рівня управління, як показано на рисунку 2.2.

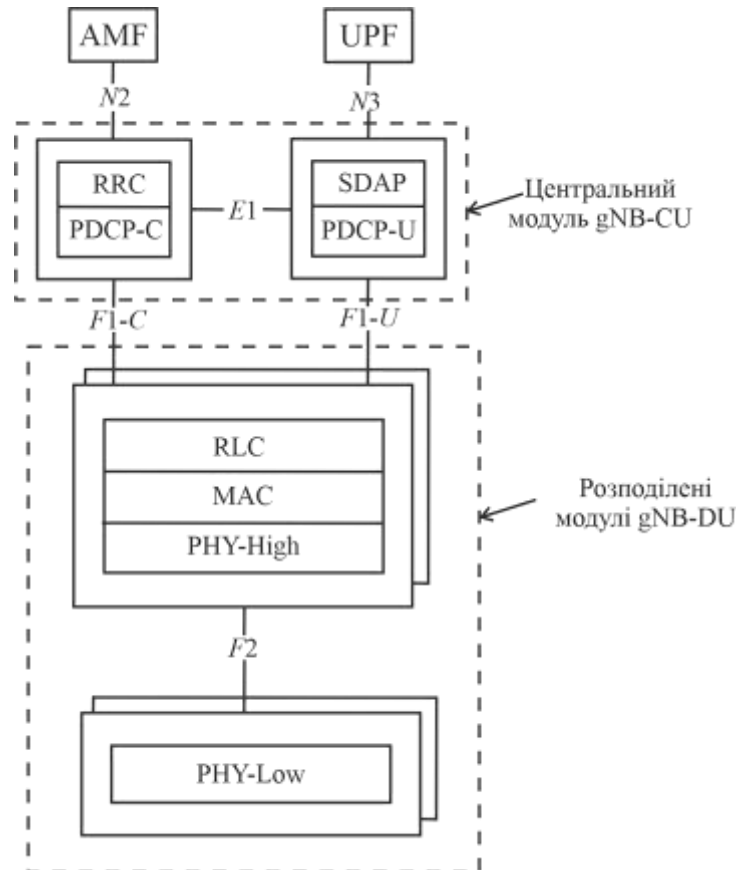


Рисунок 2.2 – Модель базової станції

Очікується, що інтерфейси F1 і F2 будуть стандартизовані 3GPP, що дозволить використовувати gNB-CU і gNB-DU від різних виробників.

2.2 Інтерфейси базових станцій gNB

3GPP визначає наступні інтерфейси gNB:

- N2 - інтерфейс площині управління між gNB і модулем управління доступом та мобільністю ядра мережі 5GC (AMF). Є розвитком інтерфейсу S1-C мереж 4G-LTE;

- N3 - інтерфейс площині призначеного для користувача трафіку між gNB і модулем передачі користувацького трафіку ядра мережі 5GC (UPF). Є розвитком інтерфейсу S1-U мереж 4G-LTE;

- Xn - інтерфейс між базовими станціями gNB;

- X2 - інтерфейс між gNB і eNB мережі LTE.

Функція управління доступом і мобільністю (AMF) 5G отримує всю інформацію, пов'язану з підключенням і сеансом, від призначеного для користувача устаткування (UE) (N1 / N2), але відповідає тільки за вирішення завдань управління підключенням і мобільністю.

Розглянемо стек протоколів мережі радіодоступу. Структури стека протоколів мережі радіодоступу площині призначеного для користувача трафіку (User Plane) і площині управління (Control Plane) показані на рис. 2.3.

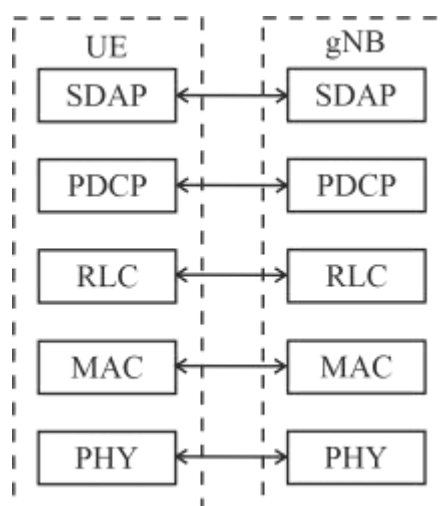


Рисунок 2.3 – Структура стека протоколів мережі радіодоступу

Всі повідомлення, що відносяться до управління сеансом, пересилаються через еталонний інтерфейс N11 в функцію управління сеансом (SMF).

Перерахуємо основні функції, які реалізуються на різних рівнях:

1. RRC (Radio Resource Control) - протокол управління радіоресурсами.

Основні функції протоколу управління радіоресурсами:

- передача інформації для управління;
- управління з'єднанням за радіоресурсами;
- управління механізмами міжтехнологічної мобільності (inter-RAT mobility);
- проведення відповідних вимірювань і складання звітності;
- передача повідомлень сигнального трафіку, який не належить до радіоз'єднання (NAS - Non Access Stratum).

Ключові зміни в порівнянні з рівнем RRC інтерфейсу S1 мереж LTE пов'язані з введенням нового RRC стану (RRC INACTIVE), покликаною мінімізувати сигнальний обмін для окремих класів постійно підключених до мережі пристроїв, а також з реалізацією механізму передачі частини системної інформації (SIB3..n) не в широкомовних, а в призначених каналах.

2. SDAP (Service Data Adaptation Protocol) - є новим рівнем, вперше введеним в 15-му релізі 3GPP. Реалізується в рамках інтерфейсу NG-U мереж, побудованих на базі ядра NGCN при взаємодії з базовими станціями E-UTRAN (ng-eNb).

Забезпечує реалізацію фреймворка архітектури управління якістю (QoS), включаючи:

- маркування висхідних і низхідних пакетів даних відповідними параметрами QFI (QoS Flow ID);
- мапінг між потоками даних з відповідними параметрами QoS і віртуальними каналами (DRB - data radio bearer).

При цьому на боці терміналу користувача (UE) в UL каналі можливі дві схеми мапінга - явна (пакети маршрутизуються у потрібний віртуальний

канал на підставі QFI), або не явна (UE здійснює маппинг UL пакетів за результатами аналізу параметрів відповідних пакетів DK каналу).

3. PDCP (Packet Data Convergence Protocol) - протокол об'єднання пакетних даних.

Основні функції, що реалізуються на рівні PDCP:

- передача даних користувача і даних площини управління;
- нумерація пакетів даних;
- шифрування;
- відновлення порядку проходження даних, видалення дублікатів;
- дублювання пакетів даних для підвищення надійності передачі;
- маршрутизація пакетів «розщеплених» віртуальних каналів (split bearer) в режимі dual connectivity (тільки для пакетів даних, призначених для користувача);
- стиснення заголовків протоколів верхнього рівня відповідно до методу ROHC - Robust Header Compression (тільки для пакетів даних, призначених для користувача);
- видалення пакетів даних після закінчення таймера discardTimer (тільки для пакетів даних, призначених для користувача).

Ключові зміни в порівнянні інтерфейсу S1 мереж 4G наступні:

- перенесення з рівня RLC на рівень PDCP функції відновлення порядку проходження пакетів даних, що з одного боку спрощує реалізацію механізму розщеплення віртуальних каналів (split bearer) в режимі Dual Connectivity з іншого - дозволяє на більш ранній фазі виконувати операції дешифрування і контролю цілісності пакетів даних з порушенням послідовності, що надходять з мережі – це може зменшити величину затримки;
- реалізація можливості дублювання даних на PDCP рівні в рамках концепції подвійного підключення (Dual Connectivity).

4. RLC (Radio Link Control) - управління радіозв'язком

RLC може функціонувати в одному з трьох режимів:

- прозорий режим передачі (transparent mode, TM);
- передача без підтвердження (unacknowledged mode, UM);
- передача з підтвердженням (acknowledged mode, AM).

Основні функції, що реалізуються на рівні RLC:

- передача пакетів, які формуються рівнем, розміщеним вище (PDCP PDU);
- незалежна від рівня PDCP нумерація пакетів даних;
- сегментація і де-сегментація пакетів даних (тільки в режимах AM і UM);
- виявлення і корекція помилок передачі RLC PDU методом автоматичного запиту повторної передачі - ARQ (тільки в режимі AM);
- виявлення дублювань RLC PDU (тільки в режимі AM);
- видалення пакетів даних за запитом рівня PDCP, що знаходиться вище - RLC SDU discard (тільки в режимах AM і TM).

При цьому функцію сегментації / де-сегментації умовно відносять до підрівня Low-RLC, інші - до High-RLC.

5. MAC (Medium Access Control) – контроль доступу до середовища

Основні функції, що реалізуються на рівні MAC:

- мапінг між логічними і транспортними каналами;
- мультиплексування MAC SDU, що належать одному або декільком логічним каналам, в транспортні блоки (TB), що передаються на фізичний рівень;
- демультимплексування MAC-PDU, які отримані в транспортних блоках від фізичного рівня,
- динамічний розподіл ресурсів з урахуванням пріоритетів користувачьких терміналів (UE) і логічних каналів, а також звітів про інтерференції - функції менеджера розкладів (scheduler);
- виявлення і корекція помилок передачі MAC PDU методом гібридного автоматичного запиту повторної передачі - HARQ.

При цьому функцію, що реалізує метод HARQ, умовно відносять до подуровня Low-MAC, інші - до High-MAC.

6. Фізичний рівень

На фізичному рівні виконуються функції, перераховані в таблиці 2.1. При цьому частина функцій (в залежності від опції поділу) умовно відносять до підрівня Low-PHY, інші - до High-PHY.

Таблиця 2.1 – Функції фізичного рівня

Функції на фізичному рівні		Відносимо до опції Low-PHY		
		7-1	7-2	7-3
Низхідна лінія зв'язку	- обчислення ЦНК			
	- каналне кодування			
	- перемеження і вирівнювання швидкості			
	- скремблювання			X
	- модуляція		X	X
	- розподіл за потоками		X	X
	- попереднє кодування		X	X
	- розподіл за елементами ресурсів	X	X	X
	- обернене швидке перетворення Фур'є	X	X	X
	- вставка циклічного префікса	X	X	X
Висхідна лінія зв'язку	- видалення циклічного префікса	X	X	X
	- швидке перетворення Фур'є	X	X	X
	- об'єднання даних з елементів ресурсів	X	X	X
	- об'єднання даних з декількох потоків		X	X
	- демодуляція		X	X
	- дескремблювання			X
	- відновлення даних після перемеження			
	- каналне декодування			

2.3 Сценарії міграції від LTE до 5G

Найбільш затребувана операторами зв'язку стратегія розгортання 5G буде полягати в тривалому спільному існуванні мереж 4-го і 5-го поколінь при максимальному використанні існуючої інфраструктури, вузлів і

мережевих елементів у мережі 5-го покоління. Це дозволить операторам модернізувати свої мережі не революційно, а поступово (еволюційно), з одного боку зберігаючи інвестиції в будівництво мереж LTE і широку зону радіопокриття мереж LTE, з іншого - надавати клієнтам нові послуги, що базуються на технології 5G в тих зонах, де ці послуги користуються попитом.

З метою реалізації даної стратегії 3GPP запропонував декілька можливих сценаріїв (або опцій) впровадження 4G (LTE) і 5G (NR). Всі опції розділені на дві групи:

- Standalone (SA) - передбачають використання тільки однієї технології радіодоступу (LTE або NR - New Radio);

- Non-Standalone (NSA) - використання і LTE і NR, що спрощує розгортання мереж 5G на початковому етапі.

Для розгортання 5G за сценарієм Non-Standalone необхідна модернізація базових станцій мережі 4G-LTE до рівня eLTE (або enhanced LTE) з метою підтримки розширеного функціоналу взаємодії з базовими станціями 5G (gNb). Стандартизація даного сценарію (в рамках релізу 15 3GPP) була завершена в січні 2018 р.

Важливим аспектом для реалізації Non-Standalone опцій є концепція подвійного підключення (Dual Connectivity), специфіковані 3GPP в релізі 12, і має на увазі підключення користувачьких терміналів (UE) в стані RRC_CONNECTED одночасно до двох базових станцій (Master eNb і Secondary eNb). Ключова відмінність Dual Connectivity від агрегації частот полягає саме в підключенні до двох різних базових станцій, пов'язаних за допомогою X2 інтерфейсу. Ці базові станції знаходяться, в загальному випадку, на різних сайтах.

При цьому можливі дві схеми реалізації:

- split bearer - в цій схемі на PDCP рівні потік призначених для користувача даних (user plane) віртуального каналу розщеплюється на два підпотоки в напрямку Master eNb і Secondary eNb відповідно;

- switch bearer - в цій схемі потік призначених для користувача даних (user plane) може комутуватися або в напрямку Master eNb, або в напрямку Secondary eNb (без агрегації).

Реалізація Non-Standalone накладає додаткові вимоги до складності користувацьких терміналів (UE), включаючи забезпечення одночасної роботи двох модемів, збільшений розмір буфера прийому і додаткове навантаження на процесорні ресурси рівня PDCP для відновлення порядку проходження пакетів (в разі режиму MCG split bearer). Також потрібно відзначити, що для опцій 3, 4, 7, 8 вноситься додаткова затримка в передачу пакетів для трафіку користувача за рахунок використання інтерфейсу Xx.

2.4 Структура радіоінтерфейсу мережі 5G-NR

Розглянемо нумерологію, що використовується в системах зв'язку п'ятого покоління. У 5G-NR використовуються OFDM піднесучі з різною шириною спектра - 15кГц, 30кГц, 60кГц, 120кГц і 240кГц, як показано в таблиці 2.2. (на відміну від мереж LTE, де використовується стандартна ширина спектра піднесучої, що дорівнює 15кГц).

Таблиця 2.2 - Нумерології для мереж зв'язку п'ятого покоління

U (нумерологія)	$\Delta F = 2^u \cdot 15$ [кГц]	Циклічний префікс
0	15	Нормальний
1	30	Нормальний
2	60	Нормальний, Розширений
3	120	Нормальний
4	240	Нормальний

Використання різних нумерологій відкриває широкі можливості для гнучкого налаштування поведінки мережі при наданні тих чи інших послуг,

наприклад, для додатків критичних до рівня затримок (URLCC), доречно використовувати піднесучі з широким спектром при меншій тривалості символу, і навпаки, при передачі трафіку широкосмугового доступу в Інтернет і трафіку низької швидкості для Інтернету речей - використовувати «вузькі» піднесучі.

Розглянемо фреймову структуру, яка полягає у застосуванні структур типу фрейм – підфрейм – слот:

- в 5G-NR передача даних у висхідному (Uplink - UL) і низхідному (Downlink - DL) напрямках організовується на основі фреймів, які мають тривалість $T_f = 10\text{мс}$;

- кожен фрейм ділиться на 10 підфреймів, тривалістю $T_{sf} = 1\text{мс}$ кожен;

- кожен підфрейм ділиться на два півфрейма;

- кожен підфрейм ділиться на слоти (slot); кількість слотів визначається шириною спектра піднесучої (або нумерологією) і становить 1, 2, 4, 8 або 16 слотів (на відміну від мереж LTE-FDD, де використовується єдина структура з двома слотами на кожен підфрейм), як наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Фреймова структура мереж зв'язку п'ятого покоління

U (нумерологія)	0	1	2	3	4
Ширина піднесучої, кГц	15	30	60	120	240
Кількість слотів в підфреймі	1	2	4	8	16
Кількість слотів в фреймі	10	20	40	80	160
Тривалість слоту, мс	1,0	0,5	0,25	0,125	0,0625
Тривалість символу, мкс	66,7	33,3	16,6	8,33	4,17
Тривалість звичайного циклічного префікса, мкс	4,7	2,41	1,205	0,6	0,3
Тривалість розширеного циклічного префікса, мкс	-	-	4,2	-	-

Розглянемо OFDM символи систем зв'язку п'ятого покоління. У 5G-NR кількість OFDM символів, що припадають на один слот, не залежить від нумерології і, за аналогією з мережами 4G-LTE, визначається тільки типом

циклічного префікса: 14 символів для нормального (Normal) і 12 - для розширеного (Extended) префікса.

У 5G-NR розподіл між напрямками передачі (висхідний - UL / низхідний DL канали) здійснюється на рівні символу (на відміну від мереж TD-LTE, де такий розподіл здійснювався на рівні підфрейма), тобто в рамках одного слота частина символів можуть використовуватися для організації UL, а частина - для DL.

Кожен OFDM символ слота може мати тип «downlink» або «D» (низхідний канал), «uplink» або «U» (висхідний канал) і «flexible» або «X» (гнучка конфігурація). У Табл. 3 наведені доступні формати розподілу OFDM символів між висхідним і низхідним напрямками для нормального циклічного префікса (Таблиця 11.1.1-1 3GPP TS 38.213). Процедура конфігурації слотів описана в специфікації 3GPP TS 38.213 (пункт 11.1).

Розглянемо ресурсну сітку систем зв'язку п'ятого покоління. За аналогією з 4G-LTE одиницею частотно-часового ресурсу в мережах 5G-NR є ресурсний блок - RB (Resource Block). Кожному абонентському терміналу на певний період часу для приймання або передачі даних виділяється певна, визначена планувальником системи, кількість ресурсних блоків. Кожен ресурсний блок в частотній області містить $N_{SC}^{RB} = 12$ суміжних піднесучих частот. Ширина смуги частот одного ресурсного блоку залежить від використовуваної нумерології, як показано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Розподіл піднесучих і ресурсних блоків

U (нумерологія)	Піднесуча, ΔF , [кГц]	N_{SC}^{RB}	Ресурсний блок W_{RB}^u , [кГц]
0	15	12	180
1	30	12	360
2	60	12	720
3	120	12	1440
4	240	12	2880

У 5G-NR максимальна допустима ширина смуги частот одного радіоканалу в порівнянні з мережами 4G-LTE збільшилася з 20МГц до 100МГц для блоку радіочастот FR1 і до 400МГц для FR2. Також було зменшено захисний інтервал між двома сусідніми радіоканалами, що призвело до збільшення доступних ресурсних блоків. При цьому ширина захисного інтервалу визначається не тільки шириною частот радіоканалу, но і шириною смуги піднесучої, що може привести до несиметричності захисних інтервалів якщо в рамках одного радіоканалу використовується декілька нумерологій, як показано на рисунку 2.4.

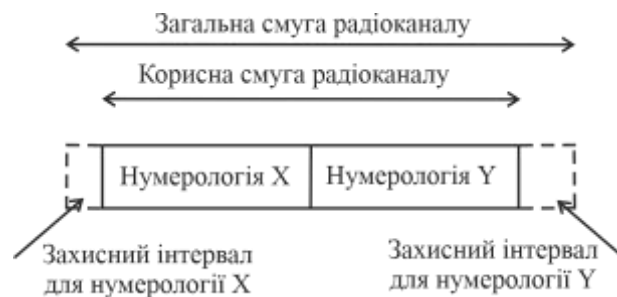


Рисунок 2.4

Можливі варіанти ширини смуги радіочастот одного радіоканалу і відповідна кількість ресурсних блоків для різних блоків і нумерологій наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Смуга частот для різних інтервалів рознесення піднесучих

Рознесення піднесучих, кГц	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц	25 МГц	30 МГц	40 МГц
	FR1						
	N_{RB}						
15	25	52	79	106	133	160	216
30	11	24	38	51	65	78	106
60	-	11	18	24	31	38	51

Висновки до другого розділу

Основними компонентами теми зв'язку 5G є: абонентське обладнання, мережі радіодоступу (RAN), включаючи системи управління, та ядра мережі (5GC), включаючи системи організації спільної роботи. Збільшені функціональні вимоги до пропускної спроможності, затримок і щільності підключення. Якщо раніше базова станція складалася з радіомодуля, який відповідає за прийом і передачу даних, і базового блоку, в якому відбувається обробка даних, то в новій архітектурі функціонал радіомодуля розширився, а функціонал базового блоку поділено на два блоки – розподілений та центральний.

3 ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 5G

3.1 Постановка завдання

Останні роки ознаменувалися появою і активним впровадженням систем стільникового зв'язку п'ятого покоління 5G. Необхідність виявлення несанкціоновано працюючих базових станцій (БС), вирішення питань електромагнітної сумісності, перевірки дотримання частотно-територіального плану вимагає від операторів і служб радіоконтролю інструментів аналізу сигналів базових станцій 5G. Необхідною є розробка процедур приймання і обробки сигналів, необхідного для виявлення та ідентифікації базових станцій 5G при здійсненні радіоконтролю. Для цього необхідне врахування специфіки та особливостей сигнально-кодових конструкцій, характерних для стандарту радіозв'язку 5G, зокрема, особливостей приймання радіомовного каналу, контрольного каналу і виділення системних ідентифікаторів з повідомлення спільного каналу.

В останні десятиліття відбувається інтенсивний розвиток технологій стільникових систем зв'язку, пов'язаний з необхідністю підвищення швидкості передачі даних і наданням користувачам нових сервісів високої якості. На зміну системам другого покоління GSM (Global System for Mobile Communications), IS-95 (Interim Standard 95) прийшли широкосмугові системи третього (UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), cdma2000 (Code Division Multiple Access)) і четвертого (LTE (Long-Term Evolution)) поколінь. Вони орієнтовані в першу чергу на пакетну передачу даних, що дозволило надати абонентам такі нові послуги, як високошвидкісний Інтернет, відеоконференції, мобільне телебачення, тощо. Кілька років тому (2018-2019 р) закінчена розробка стандарту п'ятого покоління стільникового зв'язку (5G). Ці системи мають велику гнучкість і

варіативністю в плані використовуваних значень несучої, ширини смуги і параметрів переданого сигналу. Системи 5G можуть використовувати дві частотні області: FR1 (Frequency Range) - від 410 до 7125 МГц і FR2 - від 24250 до 52600 МГц. Широка смуга сигналу (до 100 МГц - для FR1 і до 400 МГц - для FR2) дозволяє забезпечити більш високу швидкість передачі даних і пропускну здатність системи. Мала довжина пакета обумовлює низьку затримку при передачі сигналу. Основні можливі галузі застосування - зв'язок між машинними пристроями, управління безпілотними транспортними засобами, інтернет речей.

В даний час в багатьох країнах світу почалося розгортання високошвидкісних мереж на основі стандарту 5G. Для планування і експлуатації цих мереж, перевірки відповідності вимог до параметрів передавачів, аналізу зон покриття, перевірки дотримання частотно-територіального плану необхідно регулярно проводити аналіз параметрів радіосигналів базових станцій (БС) 5G.

Існуючі аналізатори сигналів мереж 5G можна розділити на два класи. До першого класу аналізаторів можна віднести портативні спектроаналізатори, що мають невеликий функціонал аналізу сигналів базових станцій 5G. Серед них можна виділити сканери китайської компанії Transcom Instruments [4], приймачі компанії PCTEL [5], російський аналізатор БС 5G VIAVI CellAdvisor 5G CA5000 [6]. Дані аналізатори позиціонуються як пристрої для тестування роботи БС 5G на етапах розгортання і оптимізації мереж, пошуку та усунення несправностей, побудови карти електромагнітної доступності БС. Однак ці аналізатори не забезпечують приймання ідентифікаційних параметрів базових станцій системного рівня, а деякі з них не мають можливості автоматичного пошуку сигналів базових станцій 5G в частотній області. Тому аналізатори першого класу не можуть використовуватися для вирішення завдань радіоконтролю.

До другого класу відносяться повнофункціональні аналізатори спектру та сигналів від провідних світових виробників радіоапаратури, зокрема,

портативні скануючі аналізатори TSMA6 і TSME6 компанії Rohde & Schwarz [7], FieldFox Handheld Analyzer N9917B компанії Keysight [8]. Дані аналізатори забезпечують швидкий цифровий спектральний аналіз і опціональне визначення параметрів радіосигналів різних стандартів, в тому числі 5G. Ці аналізатори зарубіжного виробництва мають високу вартість.

Не зважаючи на велику різноманітність існуючих аналізаторів мереж 5G, що розрізняються за технічними характеристиками і функціональними можливостями, опис принципів їх роботи, єдиного комплексу процедур, необхідного для виявлення та ідентифікації сигналів базових станцій 5G, особливостей приймання і обробки сигналів 5G в науково-технічній літературі відсутня. Існуючі публікації в області приймання сигналів стандарту 5G присвячені приватним питанням: початковому пошуку та частотно-часовій синхронізації [1-4], прийманню радіомовного каналу [5], дослідженню характеристик полярного кодування [6], оптимізації пропускної здатності для багатокористувацького MU-MIMO (Multi User Multiple Input Multiple Output), тощо.

Область розробки алгоритмів приймання сигналів 5G є конкурентною, розроблена загальна процедура обробки сигналу базових станцій 5G у вигляді блок-схем і коротких пояснень без докладного математичного опису. Розглядаються особливості структури сигналу БС 5G, а також приклади виявлення і приймання реального сигналу базових станцій 5G.

3.2 Особливості технології систем зв'язку п'ятого покоління

Область стільникового зв'язку і телекомунікацій, в тому числі мобільного зв'язку нового покоління 5G, є вузькоспеціалізованою. Основою технології 5G систем є OFDM. Потік даних, що передається базовою станцією, розділяється на декілька низькошвидкісних потоків, які передаються на різних ортогональних піднесучих. Це дозволяє

використовувати дуже широку смугу сигналу і, відповідно, отримувати високу швидкість передачі даних, не зменшуючи тривалості символів і зберігаючи міжсимвольні завади на достатньо низькому рівні.

Частотно-часовий ресурс системи складається з сукупності елементарних комірок, кожна з яких представляє собою одну піднесучу одного OFDM символу. Комірки об'єднуються в ресурсні блоки по 12 піднесучих в кожному. Передані дані призначені багатьом абонентам. Кожному абоненту динамічно виділяється певна кількість ресурсних блоків в частотно-часовій області сигналу. Передача інформації різним абонентам виконується в загальному випадку з різною швидкістю (модуляцією і кодуванням). Стандарт 5G підтримує п'ять різних варіантів відстані між піднесучими $\Delta f = 2^\mu \times 15$ кГц, $\mu = 0, 1, 2, 3, 4$.

Сигнал базової станції 5G структурований в часі за фреймам тривалістю 10 мс. Кожен фрейм складається з десяти підфреймів тривалістю 1 мс. Фрейм також може бути представлений у вигляді двох однакових за тривалістю півфреймів. Один фрейм складається з $N_{slot}^{frame} = 2^\mu \times 10$ слотів.

У 5G можливі два типи захисного інтервалу (префікса) для OFDM символів: стандартний - для всіх значень $\mu = \overline{0, 4}$ і розширений - тільки для $\mu = 2$. Для випадку стандартного префікса число символів в слоті дорівнює 14, для випадку розширеного префікса - 12.

Стандарт 5G передбачає два режими дуплекса: частотний (FDD - Frequency Division Duplex) і часовий (TDD - Time Division Duplex). Для режиму FDD всі підфрейми використовуються для передачі як в прямому каналі (від базової станції до абонентських), так і в зворотному каналі (від абонентських станцій до базової) на різних несучих. Для режиму TDD одні підфрейми у фреймі використовують для передачі сигналу в прямому каналі, а інші - в зворотному каналі. Можливі 56 різних конфігурацій фрейму, що відрізняються числом підфреймів, виділених у прямому і зворотному каналах, і їх розподілом у фреймі.

Кожна БС мережі включає в загальному випадку декілька сот, які здійснюють незалежну передачу і приймання даних в межах свого сектора. Сигнали різних комірок мережі передаються одночасно в одному спектральному діапазоні. Кожна комірка характеризується ідентифікатором фізичного рівня, від якого істотно залежать процедури формування сигналу, і системними ідентифікаторами.

Сигнал комірки базової станції 5G включає сукупність різних фізичних каналів та сигналів:

- первинний сигнал синхронізації PSS (Primary Synchronization Signal);
 - вторинний сигнал синхронізації SSS (Secondary Synchronization Signal);
 - радіомовний канал PBCH (Physical Broadcast Channel);
 - контрольний канал PDCCH (Physical Downlink Control Channel);
 - спільний канал PDSCH (Physical Downlink Shared Channel);
 - опорний сигнал DM-RS (Demodulation reference signal),
- а також інші опорні сигнали, які не використовуються для виявлення та ідентифікації.

Первинний сигнал синхронізації необхідний для виявлення сигналу 5G комірки і разом із вторинним сигналом синхронізації визначає ідентифікатор комірки фізичного рівня. Опорний сигнал DM-RS служить для оцінки частотного відгуку каналу при демодуляції, а також частотно-часового автопідстроювання. Спільний канал служить для передачі різних повідомлень та трафіку. З точки зору ідентифікації найбільш значущим є системне повідомлення SIB1 (System Information Block 1), що містить системні ідентифікатори комірки. Контрольний канал визначає частотно-часове положення та параметри даних різних типів, у тому числі повідомлення SIB1. Широкомовний канал визначає частотно-часове положення та параметри контрольного каналу, що відповідає повідомленню SIB1.

Первинний і вторинний сигнали синхронізації, а також радіомовний канал фізично об'єднані в блок сигналів синхронізації. Блок сигналів синхронізації у часовій області займає 4 OFDM символи, а в частотній області 240 піднесучих. Структура блока сигналів синхронізації представлена на рисунку 3.1.

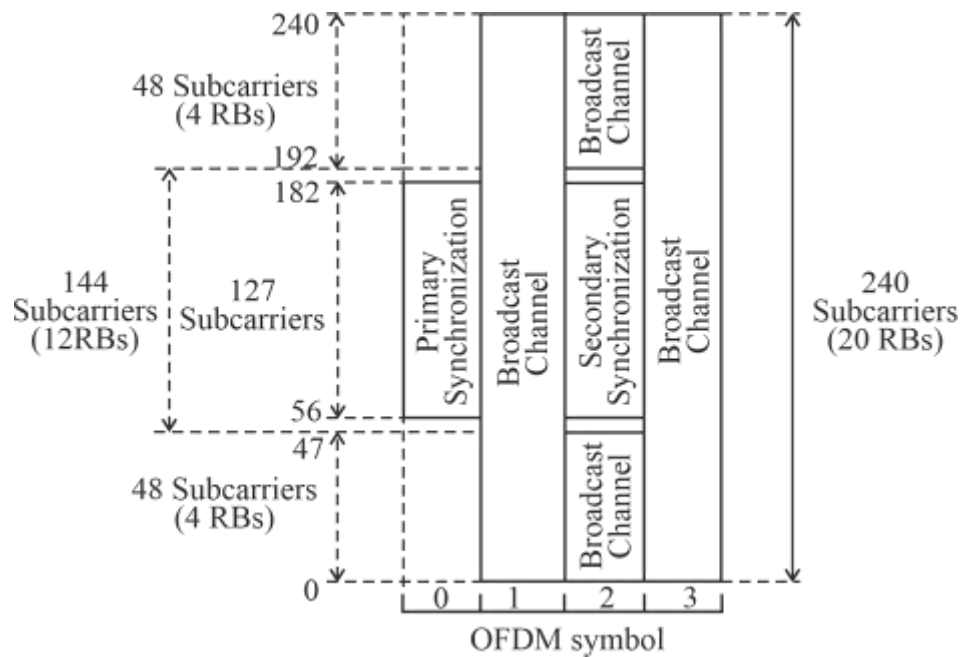


Рисунок 3.1. Частотно-часова структура блоку сигналів синхронізації

Для синхроблока в загальному випадку можливі наступні значення відстані між піднесучими SCS (subcarrier spacing): для FR1 - SCSSSB = 15 або 30 кГц, для FR2 - SCSSSB = 120 або 240 кГц.

У 5G є спеціальна відома сітка частотних позицій центральної частоти блоків сигналів синхронізації. Відстань між сусідніми частотними позиціями сітки залежить від несучої f_0 та дорівнює 1,2 МГц, якщо $f_0 < 3$ ГГц; 1,44 МГц, якщо $24,25$ ГГц $> f_0 > 3$ ГГц; 17,28 МГц, якщо $f_0 > 24,25$ ГГц. Блоки сигналів синхронізації можуть передаватися у кількох частотних позиціях робочого частотного діапазону.

Можлива передача блоку сигналів синхронізації пакетами по кілька синхроблоків. У цьому випадку кожен синхроблок передається направлено в деякому кутовому секторі за допомогою антени решітки. Використання спрямованої передачі збільшує рівень сигналу на приймальній антені абонентської станції та знижує внутрішньосистемну заваду. Пакет блоку сигналів синхронізації передається на інтервалі напівфрейму (5 мс), за замовчуванням період передачі пакета дорівнює 2 фреймам (20 мс). Приклад пакетів блоку сигналів синхронізації ілюструється на рисунку 3.2.

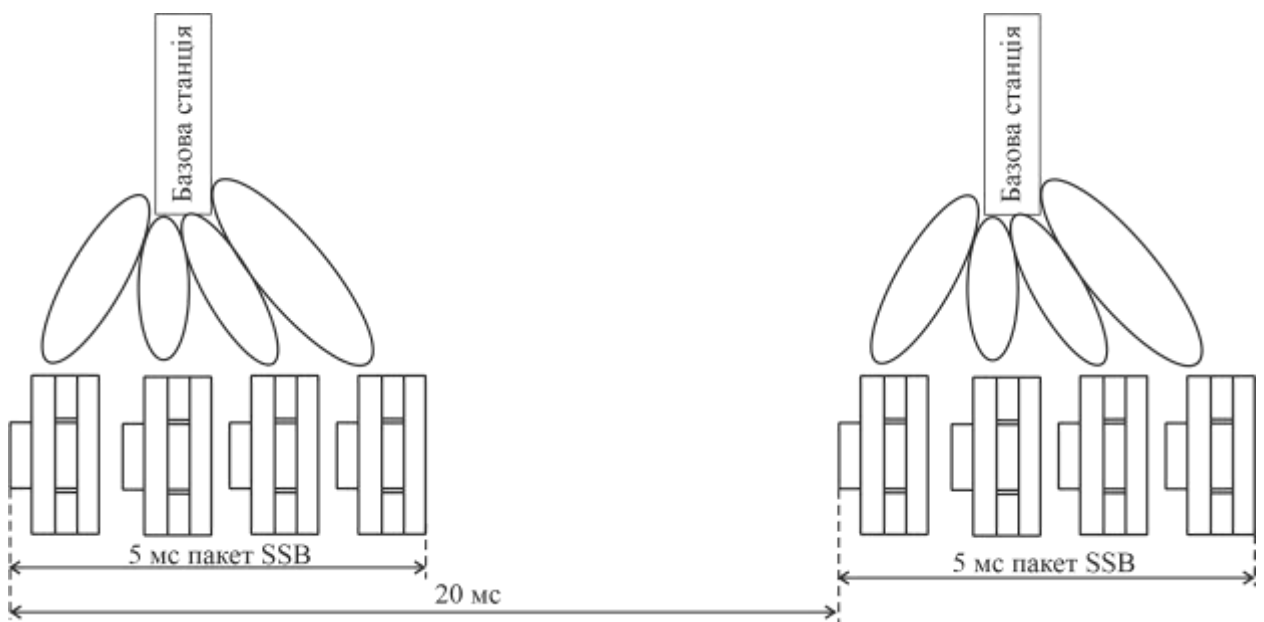


Рисунок 3.2 – Приклад пакету блоків сигналів синхронізації (БСС)

Кожна четверта комірка в розподілі ресурсів радіомовного каналу – опорна комірка DM-RS. Початкова піднесуча опорного сигналу залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня. Значення символів опорних комірок є псевдовипадковими та визначаються ідентифікатором комірки фізичного рівня, номером напівфрейму та номером блоку сигналів синхронізації в пакеті. Є 8 різних варіантів вектора значень опорних комірок залежно від номера блока сигналів синхронізації в пакеті.

У кожній із частотних областей FR1 та FR2 стандартом визначено частотні діапазони. Вони мають різну ширину і характеризуються видом дуплексу, значенням SCS_{SSB} (одно або два можливі значення) і патерном блоку сигналів синхронізації. Паттерн визначає зв'язок між номером блока сигналів синхронізації в пакеті та номером символу кадру, з якого починається блок сигналів синхронізації. Це дозволяє після прийому синхроблока виконати кадрову синхронізацію для подальшої обробки.

Розглянемо докладніше ті канали і сигнали, прийом яких необхідний для вирішення завдання виявлення та ідентифікації БС 5G.

3.3 Радіомовний канал

Первинний та вторинний синхросигнали – псевдовипадкові послідовності завдовжки 127 елементів. Ідентифікатор комірки фізичного рівня визначається виразом:

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (3.1)$$

Є три різні послідовності первинного синхросигналу. Використовується та з них, яка відповідає другому параметру ідентифікатора комірки фізичного рівня $N_{ID}^{(2)} = \{0, 1, 2\}$. Перший параметр ідентифікатора комірки $N_{ID}^{(1)} = \{\overline{0, 335}\}$ переноситься вторинним сигналом синхронізації.

Повідомлення радіомовного каналу складається з 32 біт і включає MIB (MasterInformationBlock). Біти повідомлення вказують

- відстань між піднесучими SCS контрольного каналу та повідомлення SIB1, яке в загальному випадку відрізняється від SCS_{SSB} ;

- положення частотно-часового блоку CORESET0, в якому розташоване повідомлення контрольного каналу з інформацією про розташування та параметри SIB1;

- параметр k_{SSB} , що визначає частотний зсув між початковою піднесучею блока сигналів синхронізації і найближчим елементом сітки ресурс блоків;

- номер фрейму;
- номер напівфрейму;
- доступність комірки для абонентських станцій;
- номер блока сигналів синхронізації в пакеті, тощо.

Цей бітовий блок піддається процедурам для формування широкомовного каналу на фізичному рівні, які приведені на рисунку 3.3.

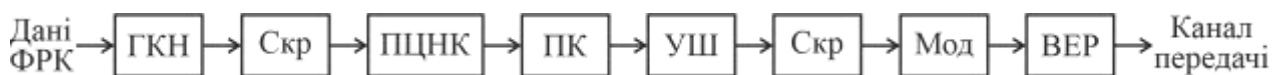


Рисунок 3.3 – Структурна схема перетворень сигналів фізичного радіомовного каналу (ФРК – фізичний радіомовний канал; ГКН – генерація корисного навантаження; Скр – скремблювання; ПЦНК – приєднання циклічного надлишкового коду; ПК – полярне кодування; УШ – узгодження швидкості; Мод – модуляція; ВЕР – відображення елементів ресурсів

Після приймання даних RVCH (24 біта) приєднується 8 додаткових бітів, пов'язаних з синхронізацією для генерації корисного навантаження (32 біта). Далі приєднується циклічний надлишковий код, що містить 24 біта, що разом дає 56 біт. Ці 56 біт перетворюються у 512 біт після полярного кодування, які перетворюються у 864 біти після узгодження швидкості. Оскільки використовується модуляція QPSK, Для передачі 432 символів QPSK (864 біта) необхідно 432 елементів ресурсів. Для RVCH виділено 576 елементів ресурсів, решта 144 елементів ресурсів використовуються для RVCH DM-RS

- скремблювання, що залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня, від максимальної кількості блоків сигналів синхронізації у пакеті, а також від двох біт номера фрейму;
- додавання до скремблених біт 24 перевірочних біт, що формуються за допомогою відповідного полінома;
- полярне (Polar) кодування;
- узгодження швидкостей потоків, яке полягає у відкиданні деяких біт та перемежуванні решти;
- друге скремблювання, що залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня та від номера блока сигналів синхро в пакеті;
- QPSK модуляція, при якій кожній послідовній парі біт ставиться у відповідність комплексний QPSK символ;
- Відображення символів модуляції на відповідні частотно - часові комірки блока сигналів синхронізації.

3.4 Контрольний канал

Контрольний канал, в якому містяться параметри передачі SIB1 повідомлення, передається в деякій частині частотно-часового блоку CORESET0. Цей блок може займати від 1 до 3 символів OFDM.

Біти повідомлення контрольного каналу містять таку інформацію:

- положення повідомлення SIB1 у часовій області;
- швидкість кодування;
- схему відображення віртуальних ресурсів блоків на фізичні ресурси блоків;
- параметр процедури узгодження швидкостей потоків.

Положення повідомлення SIB1 у частотній області збігається з частотною областю блоку CORESET0. У SIB1 використовується лише один вид модуляції – QPSK.

Бітовий блок контрольного каналу піддається наступним процедурам для формування контрольного каналу фізично:

- скремблювання, що залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня;
- додавання до скремблених бітів 24 перевірочних біти, що формуються за допомогою відповідного полінома;
- скремблювання частини перевірочних бітів відповідно до ідентифікатора системної інформації;
- полярне (Polar) кодування;
- узгодження швидкостей потоків, яке полягає у відкиданні деяких бітів та переміщенні решти;
- скремблювання, що залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня;
- QPSK модуляція;
- Відображення символів модуляції на відповідні частотно-часові комірки блоку CORESET0.

Контрольний канал складається із деякої кількості елементів контрольного каналу. Ця кількість відповідає величині рівня агрегації Aggregation level (AL), яка може набувати одного з значень {4, 8, 16}. Чим більше величина AL, тим вище надмірність передачі і завадостійкість передачі контрольного каналу.

Елемент контрольного каналу складається із 6 ресурс-елементів груп (REG). Одна REG – це 12 піднесучих (один ресурсний блок) на інтервалі одного символу OFDM. Відображення елементів контрольного каналу ресурсного елементу групи здійснюється в термінах REG бандлів. Кожен бандл складається із 6 REG. Відображення елементів контрольного каналу на бандли здійснюється відповідно до правила блокового переміщення. Кожен

бандл (елемент контрольного каналу) переносить 108 біт. Зауважимо, що контрольний канал займає у випадку лише частину частотно-часового блоку CORESET0.

Для оцінки частотного відгуку каналу при прийманні контрольного каналу комірки кожної четвертої піднесучої в CORESET0 - опорні комірки DM-RS. Значення опорних комірок визначаються за псевдовипадковим законом, що залежить від номера символу в слоті, номера слота у кадрі і від ідентифікатора фізичного рівня.

3.5 Повідомлення SIB1 спільного каналу

SIB1 - це основне повідомлення системної інформації, що містить у загальному випадку багато інформаційних полів. Більшість цих полів не є обов'язковими, тому довжина повідомлення SIB1 може змінюватися в широких межах. Максимальна довжина SIB1 - 2976 бітів. За умовчанням періодичність передачі повідомлення SIB1 дорівнює 20 мс.

Основні системні ідентифікатори, що завжди присутні в SIB1:

- кількість мереж (PLMN – Public land mobile network), що обслуговуються даною базовою станцією;
- ідентифікатори мережі - MCC (Mobile Country Code), MNC (Mobile Network Code);
- ідентифікатор базової станції – CellIdentity;
- ідентифікатор області відстеження всередині мережі до якої належить комірка - Tracking Area Code;
- ідентифікатор підобласті мережі в області відстеження – RAN-AreaCode;
- наявність/відсутність резервування комірки оператором мережі для внутрішнього використання - cellReservedForOperatorUse.

Битовий блок SIB1 спільного каналу піддається наступним процедурам для формування повідомлення фізично:

- додавання до бітів повідомлення SIB1 16 перевірочних бітів, сформованих за допомогою відповідного полінома;
- LDPC (Low-density parity-check code) кодування, використовується базовий граф 2 (параметр кодера);
- узгодження швидкостей потоків;
- скремблювання, залежне від ідентифікатора комірки фізичного рівня;
- QPSK модуляція;
- Формування віртуальних ресурс блоків та їх відображення на фізичні ресурс блоки.

Опорний сигнал DR-MS для SIB1 залежить від параметрів, які визначаються в повідомленнях широкомовного та контрольного каналів. Тут особливістю опорного каналу є те, що комірки DM-RS є не в кожному символі OFDM блоку. Значення символів опорних комірок визначаються за псевдовипадковим законом, що залежить від номера символу в слоті, номері слота у фреймі і від ідентифікатора фізичного рівня.

Початковою для роботи аналізатора є частотна область аналізу (один із діапазонів стандарту, частина діапазону, кілька діапазонів). Ця частотна область може відповідати відомій смузі сигналу БС мережі 5G.

Для вирішення задачі ідентифікації необхідно виконати виявлення та приймання синхроблоків з сітки їх можливих частотних позицій (виявлення, приймання синхросигналів, повідомлення радіомовного каналу), прийом повідомлення контрольного каналу та прийом повідомлення SIB1.

Висновки до третього розділу

В останні десятиліття відбувається інтенсивний розвиток технологій стільникових систем зв'язку, пов'язаний з необхідністю підвищення швидкості передачі даних і наданням користувачам нових сервісів високої якості. На зміну системам другого покоління GSM (Global System for Mobile Communications), IS-95 (Interim Standard 95) прийшли широкосмугові системи третього (UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), cdma2000 (Code Division Multiple Access)) і четвертого (LTE (Long-Term Evolution)) поколінь. Вони орієнтовані в першу чергу на пакетну передачу даних, що дозволило надати абонентам такі нові послуги, як високошвидкісний Інтернет, відеоконференції, мобільне телебачення, тощо. Кілька років тому (2018-2019 р) закінчена розробка стандарту п'ятого покоління стільникового зв'язку (5G). Ці системи мають велику гнучкість і варіативність в плані використовуваних значень несучої, ширини смуги і параметрів переданого сигналу. Системи 5G можуть використовувати дві частотні області: FR1 (Frequency Range) - від 410 до 7125 МГц і FR2 - від 24250 до 52600 МГц. Широка смуга сигналу (до 100 МГц - для FR1 і до 400 МГц - для FR2) дозволяє забезпечити більш високу швидкість передачі даних і пропускну здатність системи. Мала довжина пакета обумовлює низьку затримку при передачі сигналу. Основні можливі галузі застосування - зв'язок між машинними пристроями, управління безпілотними транспортними засобами, інтернет речей.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕДУРИ ПОШУКУ КОМІРКИ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ

4.1 Модель синхронізації обладнання користувача з сигналами базової станції

Розглянемо побудову форми хвилі, що містить пакет сигналу синхронізації (пакет SS), передачу хвилі через канал із завмираннями з AWGN і подальшу синхронізацію з прийнятою формою хвилі для декодування головного інформаційного блоку (МІВ).

Перш ніж призначене для користувача устаткування (UE) зможе обмінюватися даними з мережею, воно повинно виконати процедури пошуку і вибору комірок і отримати початкову системну інформацію. На рисунку 4.1 показана структурна схема моделі дослідження синхронізації.

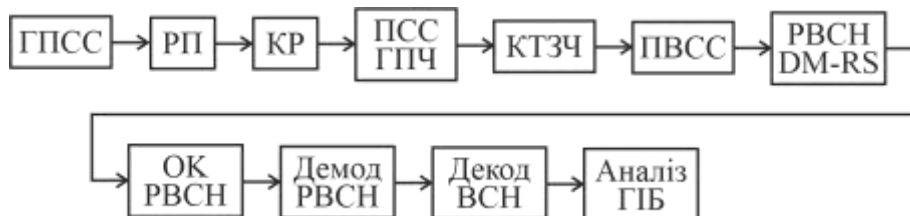


Рисунок 4.1. Структура моделі дослідження синхронізації (ГПСС – генерація пакета синхронізації сигналів; РП – розгортка променя; КР – канал розповсюдження; ПСС ГПЧ – первинний сигнал синхронізації, грубий пошук частоти; КТЗЧ – корекція точного зміщення частоти; ПВСС – пошук вторинного сигналу синхронізації; РВСН DM-RS – фізичний радіомовний канал, виділений опорний сигнал демодуляції; ОК РВСН – оцінка каналу з використанням фізичного радіомовного каналу; Демод РВСН – демодуляція фізичного радіомовного каналу; Декод ВСН – декодування радіомовного каналу; ГІВ – головний інформаційний блок)

Перші декілька кроків в цьому процесі - синхронізація фреймів, ідентифікація стільникової мережі і декодування головного інформаційного блоку (MIB):

- Генерація пакета: створюється структура txBurst для конфігації пакету сигналів синхронізації (SS), а функція hSSBurst використовується для створення сітки ресурсів OFDM, що містить пакет SS;

- Розгортка променя: Сітка ресурсів OFDM для пакета SS формується за допомогою фізичних передавальних антен, причому кожен блок SS/PBCH в пакеті має власний напрямок формування діаграми спрямованості антени;

- Канал розповсюдження: переданий сигнал проходить через модель каналу поширення TDL (tap delay line) – лінія затримки з відводами;

- AWGN: до приймальних антен застосовується адитивний білий гаусовий шум;

- Приймач: до прийнятого сигналу застосовуються різні процеси синхронізації і демодуляції, щоб встановити ідентичність комірки і декодувати головний інформаційний блок.

На рисунку 4.2 показані етапи обробки сигналу в системі.

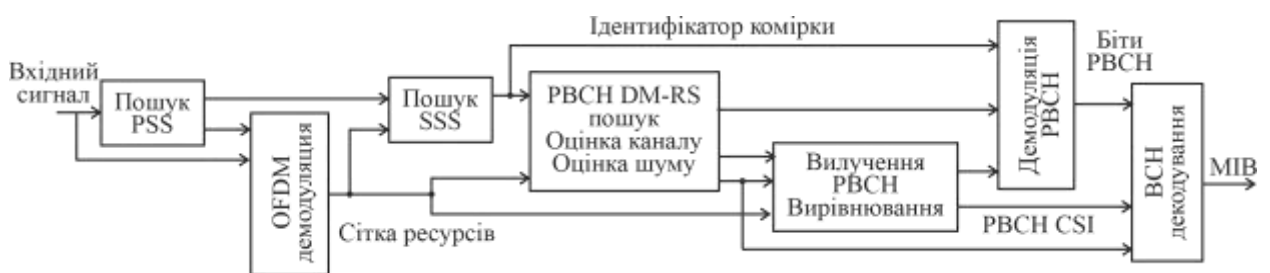


Рисунок 4.2 – Етапи обробки сигналу в системі

Вказані етапи обробки базуються на структурній схемі рисунку 4.3. Спочатку відбувається конфігурація пакету. Створюється структура txBurst, яка конфігурує пакет SS, включаючи конфігурацію шаблону блоків SS/PBCH в пакеті і вміст головного інформаційного блоку (MIB).

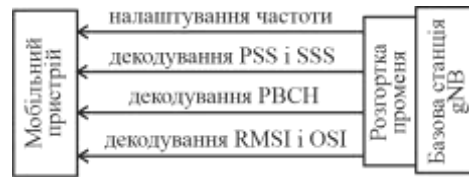


Рисунок 4.3 – Схема пошуку базової станції системи зв'язку п'ятого покоління

Далі виконується конфігурація каналу. Проведена конфігурація каналу поширення (channel) як лінії затримки з відводами (TDL), а також доданий адитивний білий гаусовий шум (AWGN) з певним відношенням сигнал-шум (SNR) на приймачі.

Наступним кроком є генерація пакету. Функція `hSSBurst` використовується для створення сітки ресурсів OFDM, що містить пакет сигналів синхронізації (SS). Розмір сітки ресурсів такий, що відповідна модульована форма сигналу OFDM має частоту дискретизації, рівну зазначеній в `txBurst.SampleRate`, що дозволяє легко додавати її до форми несучого сигналу PDCCH і PDSCH.

Функція Matlab `hSSBurst` використовується для створення ресурсної сітки OFDM, що містить пакет SS. Комбінування сигналів в області часу потрібно в тому випадку, якщо блок SS / PBCH і PDCCH / PDSCH мають різні рознесення піднесучих.

Зображення ресурсів передавача системи зв'язку п'ятого покоління приведені на рисунку 4.4.

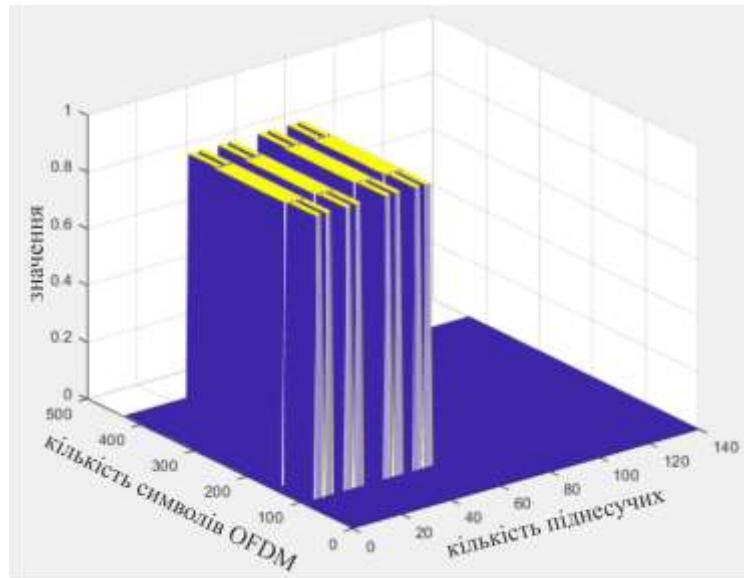


Рисунок 4.4 – Ресурси передавача системи зв'язку п'ятого покоління

Комбінування сигналів у часовій області потрібно в тому випадку, якщо блок SS/PBCH і PDCCH/PDSCH мають різну величину рознесення піднесучих.

Сітка ресурсів OFDM для пакета SS формується діаграмою спрямованості за допомогою фізичних передавальних антен, причому кожен блок SS/PBCH в пакеті має інший вектор формування діаграми спрямованості. Ресурсна сітка OFDM з формуванням діаграми спрямованості потім модулюється OFDM для отримання сигналу у часовій області.

Налаштування вагових коефіцієнтів формування променя приведені на рисунку 4.5.

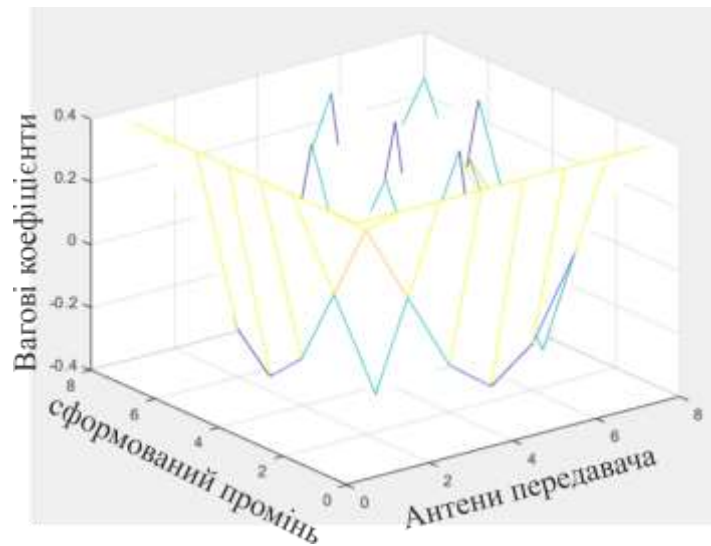


Рисунок 4.5 – Вагові коефіцієнти формування променя передавача MIMO

Формування символів OFDM, що відповідають кожному пакету сигналів синхронізації приведено на рисунку 4.6.

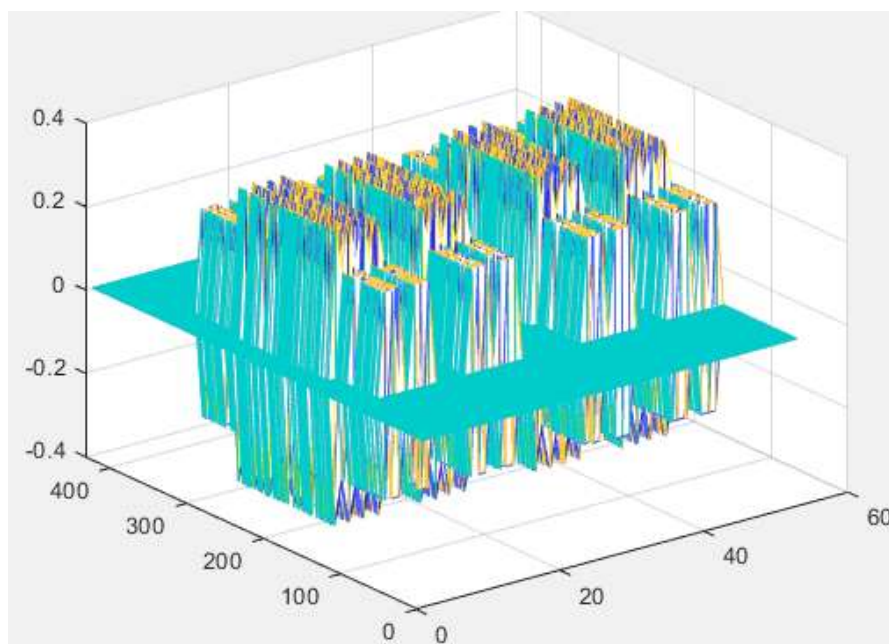


Рисунок 4.6 – Формування символів OFDM, що відповідають кожному пакету сигналів синхронізації

Будова сигналу передавача приведена на рисунку 4.7.

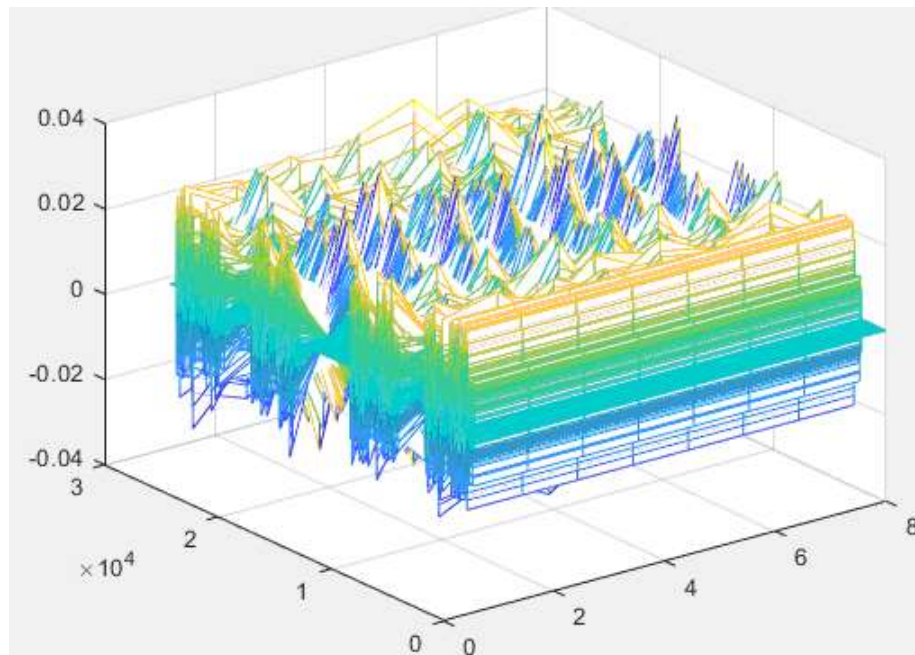


Рисунок 4.7 – Сигнал передавача

Розглянемо канал поширення. Переданий сигнал проходить через модель каналу поширення TDL, що призводить до отримання сигналу для сконфігурованої кількості антен.

Додаємо до каналу адитивний білий гаусовий шум (AWGN). До приймальних антен застосовується адитивний білий гаусовий шум.

Конфігурація приймача. Щоб синхронізувати і демодулювати отриманий сигнал, необхідна наступна інформація:

- шаблон блоку SS (випадок А ... Е): UE знатиме, які шаблони блоків необхідно шукати, на основі робочого діапазону NR. Шаблон блоку SS визначає рознесення піднесучих блоків SS / PBCH;

- частота дискретизації сигналу: потрібно для OFDM-демодуляції отриманого сигналу;

- L_{\max} – кількість блоків SS / PBCH в пакеті: UE знатиме значення L_{\max} на основі шаблону блоку SS і робочого діапазону NR. L_{\max} використовується при обчисленні параметрів для послідовностей PBCH DM-RS і дескремблювання PBCH.

Розглянемо первинний сигнал синхронізації (PSS) і грубий пошук частоти. Виконується пошук PSS, який складається з кореляції прийнятого сигналу (по всіх блоках SS/PBCH) з кожною з трьох можливих послідовностей PSS і вилучення піку найбільш сильної кореляції. Блок SS/PBCH з найсильнішим піком кореляції вказує, який промінь в розгортці променя був найбільш ефективним при направленні сигналу до приймача.

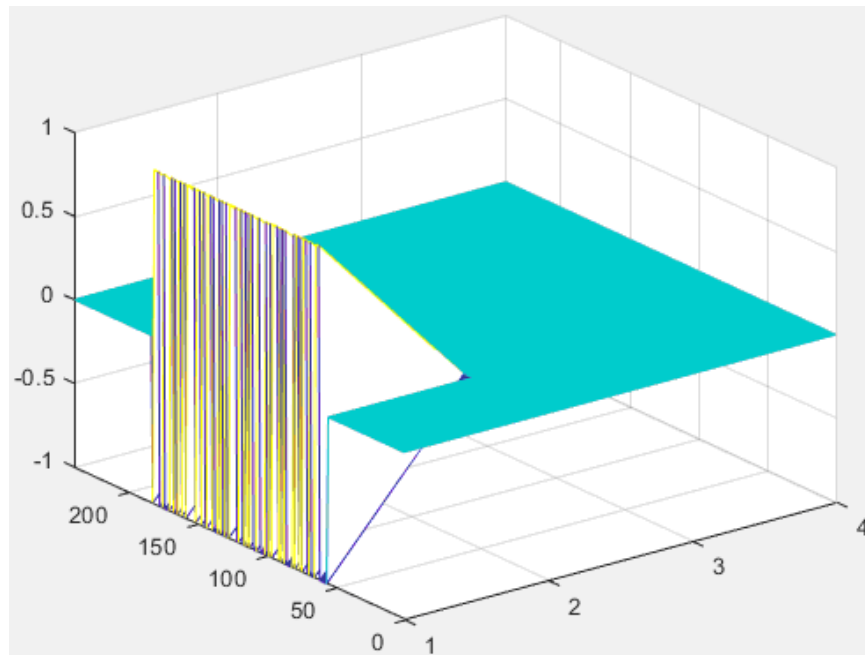


Рисунок 4.8 – Сітка ресурсів первинного сигналу синхронізації

Грубе зміщення частоти прийнятого сигналу також визначається шляхом створення різних гіпотез про зміщення частоти, коригування для кожного зміщення і визначення зміщення, яке дає найбільш сильну кореляцію.

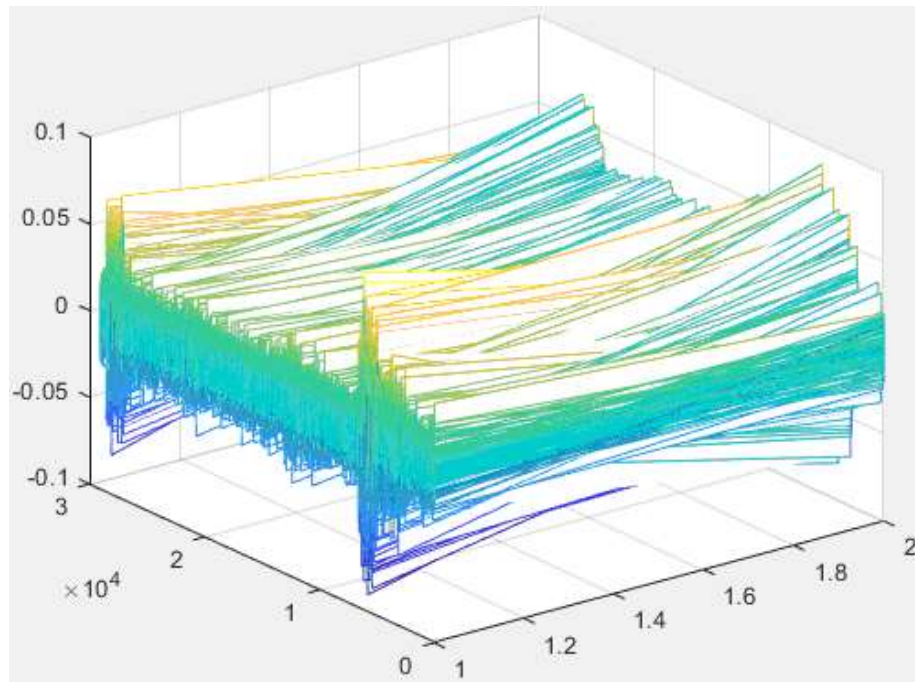


Рисунок 4.9 – Сигнал приймача після корекції частоти

4.2 Сигнали синхронізації

Розглянемо ідентифікатори комірки фізичного рівня. Існує 1008 унікальних ідентифікаторів комірок фізичного рівня, заданих виразом:

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)},$$

де $N_{ID}^{(1)} \in \{0, 1, \dots, 335\}$ і $N_{ID}^{(2)} \in \{0, 1, 2\}$.

Розглянемо первинний сигнал синхронізації. Побудова послідовності. Послідовність $d_{PSS}(n)$ для первинного сигналу синхронізації визначається наступним чином:

$$d_{PSS}(n) = 1 - 2x(m)$$

$$m = (n + 43N_{ID}^{(2)}) \bmod 127$$

$$0 \leq n < 127,$$

де $x(i+7) = (x(i+4) + x(i)) \bmod 2$ і

$$[x(6) \ x(5) \ x(4) \ x(3) \ x(2) \ x(1) \ x(0)] = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0].$$

Розглянемо зіставлення з фізичними ресурсами і вторинний сигнал синхронізації. Побудова послідовності. Послідовність $d_{SSS}(n)$ для вторинного сигналу синхронізації визначається наступним чином:

$$d_{SSS}(n) = [1 - 2x_0((n + m_0) \bmod 127)] [1 - 2x_1((n + m_1) \bmod 127)]$$

$$m_0 = 15 \left[\frac{N_{ID}^{(1)}}{112} \right] + 5N_{ID}^{(2)}$$

$$m_1 = N_{ID}^{(1)} \bmod 112$$

$$0 \leq n \leq 127$$

де

$$x_0(i+7) = (x_0(i+4) + x_0(i)) \bmod 2$$

$$x_1(i+7) = (x_1(i+1) + x_1(i)) \bmod 2$$

і

$$[x_0(6) \ x_0(5) \ x_0(4) \ x_0(3) \ x_0(2) \ x_0(1) \ x_0(0)] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$[x_1(6) \ x_1(5) \ x_1(4) \ x_1(3) \ x_1(2) \ x_1(1) \ x_1(0)] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Кореляція PSS в залежності від зміщення частоти приведено рис. 4.10.

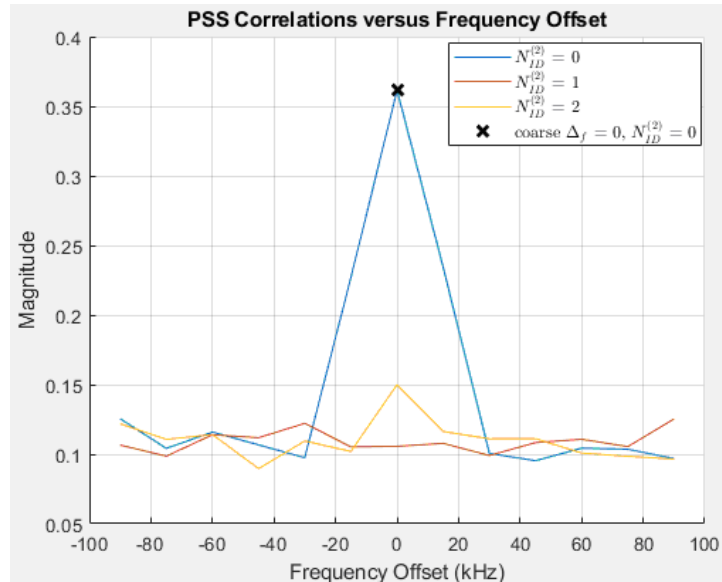


Рисунок 4.10 – Кореляція первинного сигналу синхронізації

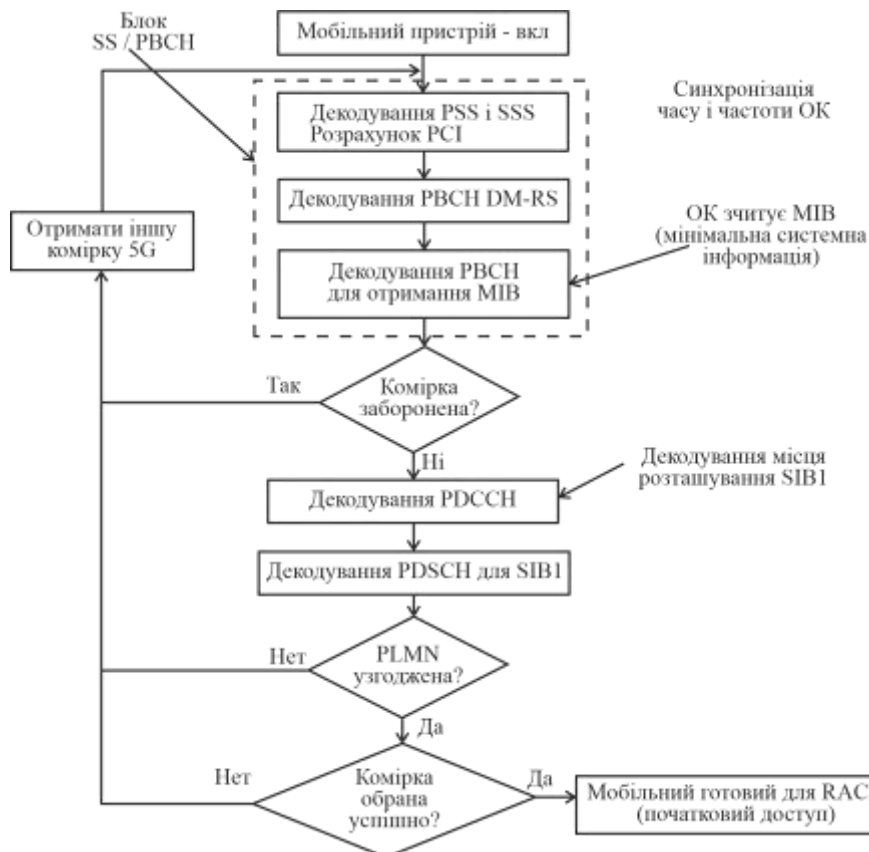


Рисунок 4.11 – Алгоритм процедури пошуку комірки

4.3 Оцінка і корекція точного зміщення частоти

Часове зміщення для самої сильної кореляції послідовності PSS може використовуватися для синхронізації форми сигналу в часі. Потім точна оцінка зміщення частоти може бути обчислена шляхом виконання кореляції між циклічним префіксом кожного символу OFDM в SSB і відповідними корисними частинами символів OFDM. Фаза цієї кореляції пропорційна зміщенню частоти сигналу. Графічне зображення ресурсів приймача приведені на рисунку 4.12.

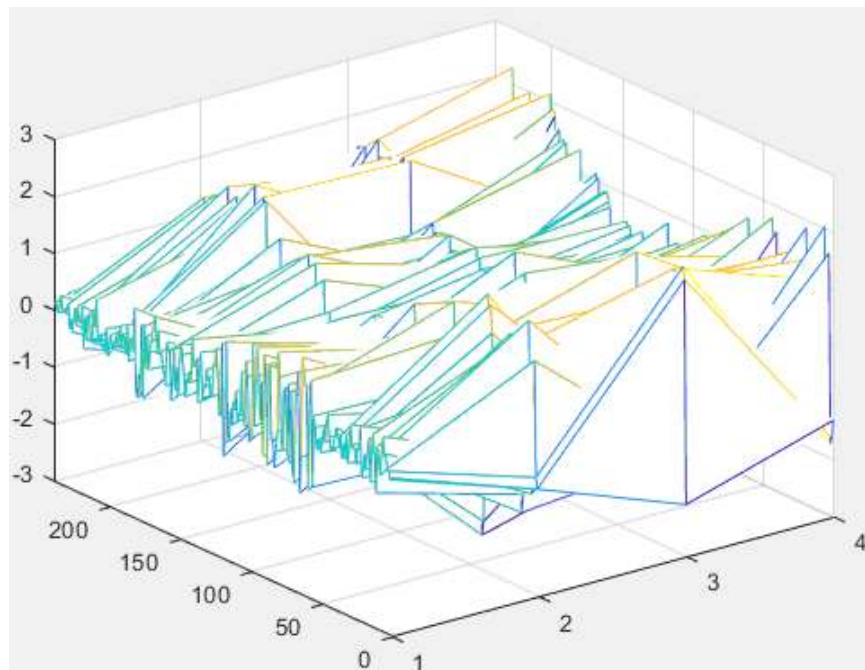


Рисунок 4.12 – Ресурси приймача

Розглянемо пошук вторинного сигналу синхронізації (SSS). Синхронізація піку кореляції PSS використовується для синхронізації форми сигналу і демодуляції OFDM. Піднесучі, пов'язані з SSS, витягуються і корелюються з кожною можливою послідовністю SSS. Індеси найсильніших

послідовностей PSS і SSS об'єднуються, щоб дати ідентифікацію комірки фізичного рівня, яка потрібна для обробки PBCH DM-RS і PBCH.

Вилучити отримані символи SSS з блоку SS/PBCH. Формування вторинного сигналу синхронізації на приймачі приведено на рисунку 4.13. Формування кореляції вторинного сигналу синхронізації приведено на рисунку 4.14.

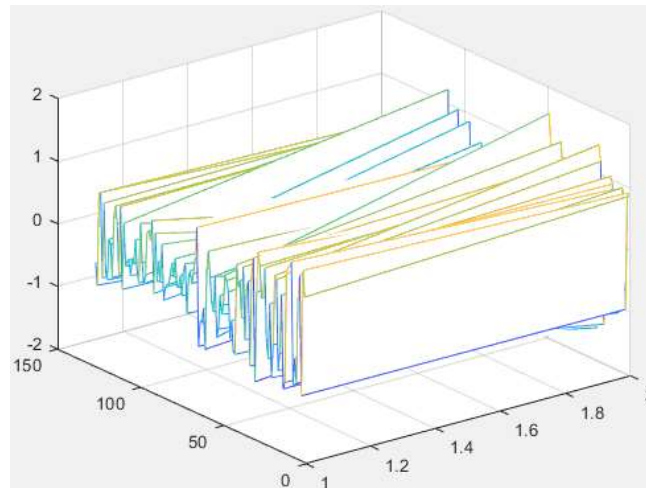


Рисунок 4.13 – Формування вторинного сигналу синхронізації

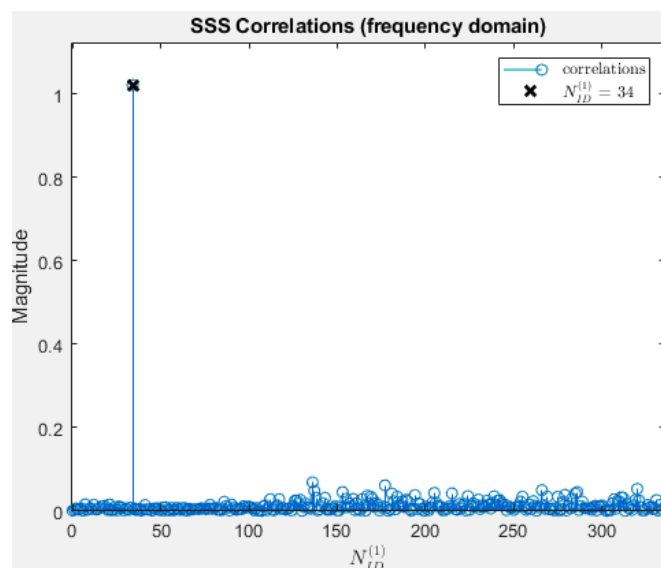


Рисунок 4.14 – Формування кореляції вторинного сигналу синхронізації

Розглянемо пошук PBCH DM-RS. В процесі, аналогічному пошуку SSS, створюється кожна можлива послідовність PBCH DM-RS і виконується оцінка каналу і оцінка шуму. Індекс PBCH DM-RS з найкращим SNR визначає LSB індексу блоку SS/PBCH, необхідного для ініціалізації скремблювання PBCH.

Розглянемо опорні сигнали демодуляції для PBCH. Обладнання користувача (UE) має передбачати, що послідовність опорних сигналів $r(m)$ для блоку SS / PBCH визначена наступним чином:

$$r(m) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m)) + j \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m + 1))$$

де $r(m)$ зазначено в пункті 5.2. Генератор скремблюючої послідовності необхідно визначати на початку кожного блоку SS/PBCH з випадком:

$$c_{init} = 2^{11} (\bar{i}_{SSB} + 1) (\lceil N_{ID}^{cell} / 4 \rceil + 1) + 2^6 (\bar{i}_{SSB} + 1) (N_{ID}^{cell} \bmod 4),$$

де

- для $L = 4$, $\bar{i}_{SSB} = i_{SSB} + 4n_{hf}$ де n_{hf} - номер напівфрейма, в якому PBCH передається у фрейм з $n_{hf} = 0$ для першого напівфрейма у фреймі і $n_{hf} = 1$ для другого напівфрейма у фреймі, і

i_{SSB} - це два молодших біта індексу блоку SS/PBCH,

- для $L = 8$ або $L = 64$, $\bar{i}_{SSB} = i_{SSB}$, де i_{SSB} - це три молодших біта індексу блоку SS/PBCH, з максимум L променів SS/PBCH в періоді SS / PBCH для конкретної смуги.

4.4 Зіставлення з фізичними ресурсами

Формування оцінки PBCH DM-RS приведено на рисунку 4.15.

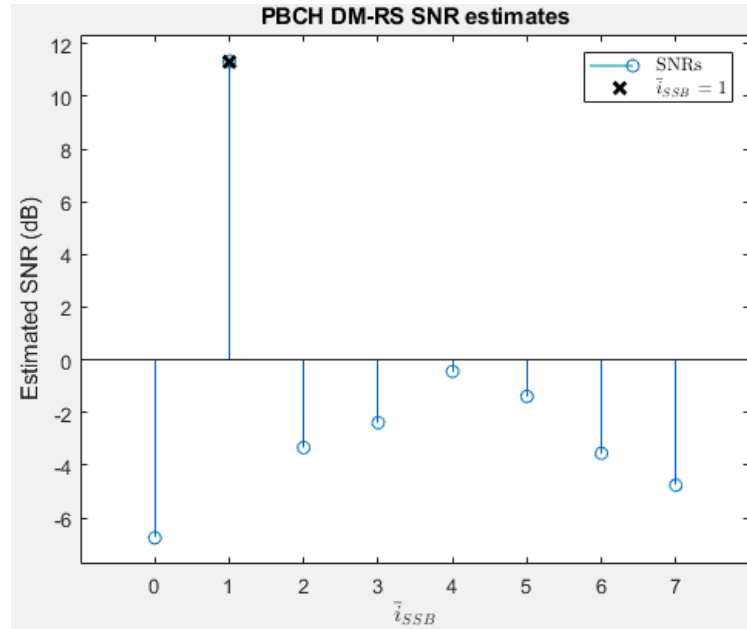


Рисунок 4.15 – Формування оцінки PBCH DM-RS

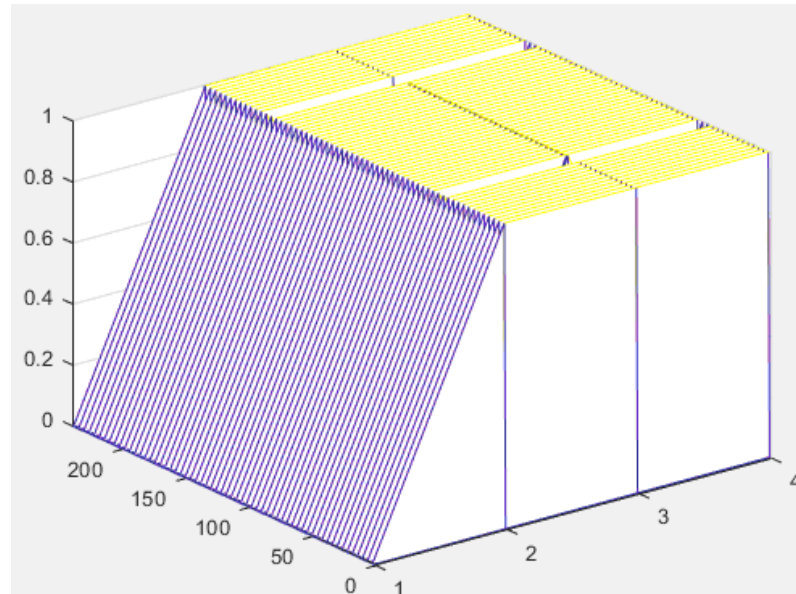


Рисунок 4.16 – Формування ресурсів передавача

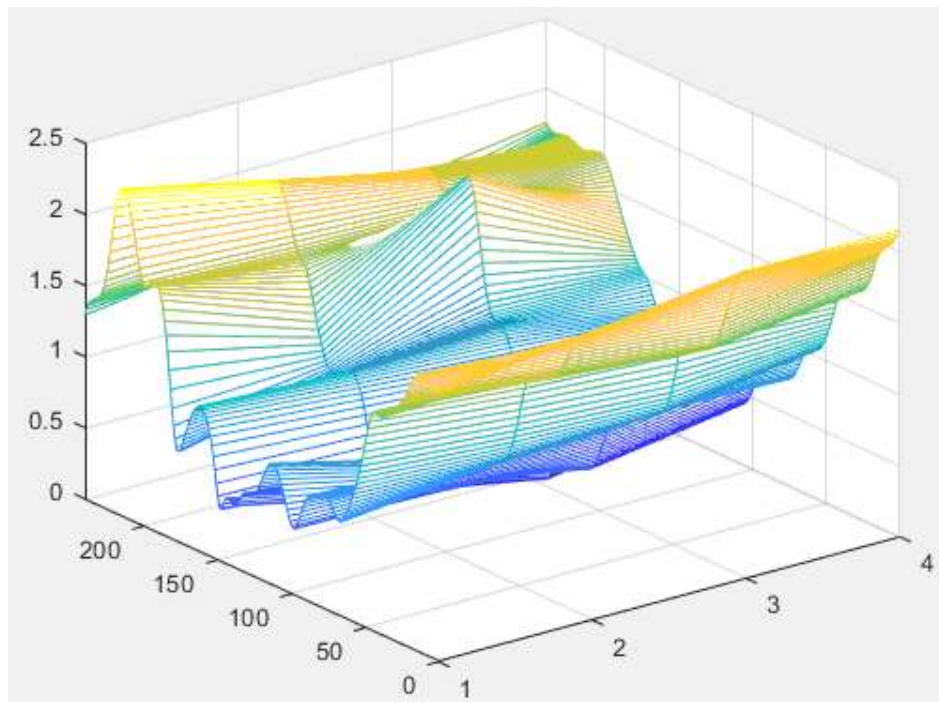


Рисунок 4.17 – Формування оцінки каналу

Розглянемо оцінку каналу з використанням PBCH DM-RS і SSS. Тепер, коли послідовність PBCH DM-RS відома, оцінка каналу для блоку SS/PBCH може бути створена шляхом оцінки каналу в кожному місці знаходження елемента ресурсів DM-RS PBCH і інтерполяції по блоку SS/PBCH. SSS також використовується для допомоги в оцінці каналу. Також виконується оцінка адитивного шуму на PBCH DM-RS/SSS.

Розглянемо демодуляцію PBCH. Піднесучі, пов'язані з PBCH, виділяються, а оцінки каналу і шуму використовуються для виконання корекції MMSE. Вирівняні символи PBCH потім демодулюються і дескремблюються, щоб дати оцінки бітів для кодованого блоку BCH.

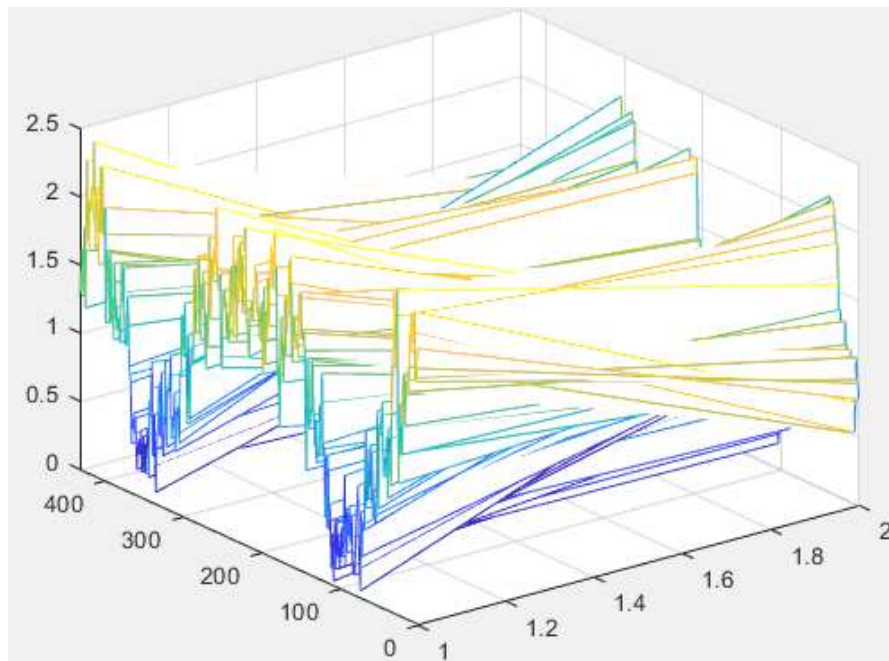


Рисунок 4.18 – Формування широкомовного сигналу

Розглянемо ВСН декодування. Оцінки бітів ВСН зважуються за допомогою інформації про стан каналу (CSI) з еквалайзера MMSE, потім виконується декодування ВСН, що складається з відновлення швидкості, полярного декодування, декодування CRC, дескремблювання і відділення 24 біт транспортного блоку ВСН від 8 додаткових пов'язаних із синхронізацією бітів корисного навантаження. Структура набору блоків сигналів синхронізації і їх періодичне повторення приведено на рисунку 4.19.

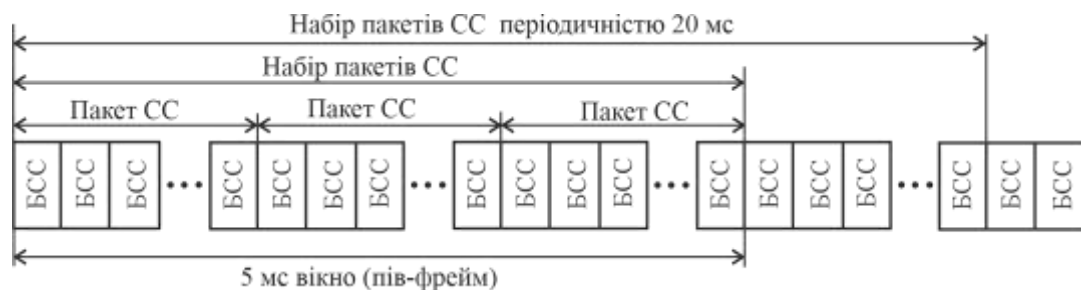


Рисунок 4.19 – Структура набору блоків сигналів синхронізації і їх періодичне повторення

4.5 Синхронізація символів і фреймів

Модель синхронізації символів системи зв'язку і фреймів з маніпуляцією QPSK. Simulink модель системи зв'язку приведена на рис. 4.20.

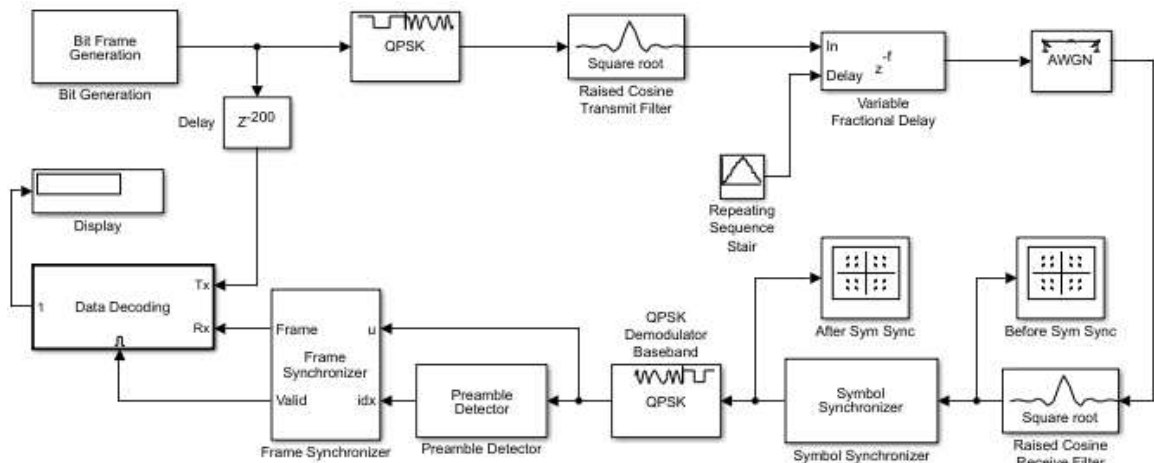


Рисунок 4.20 – Simulink модель системи зв'язку з встановленням синхронізації

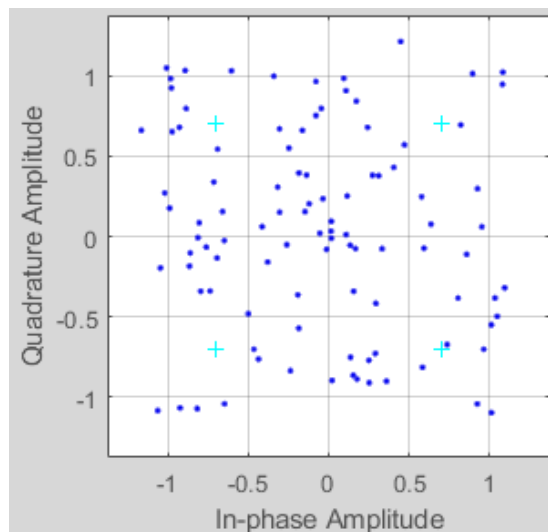


Рисунок 4.21 – QPSK сигнал до синхронізації

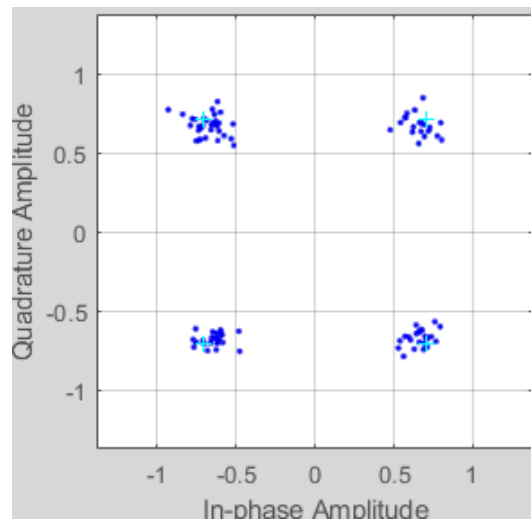


Рисунок 4.22 – QPSK сигнал після синхронізації

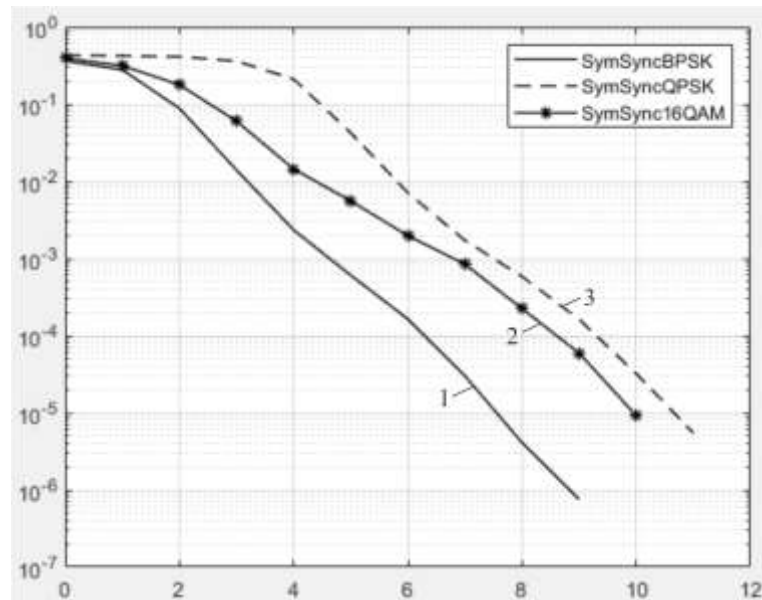


Рисунок 4.23 – Залежність величини помилкових бітів від E_b/N_0 моделі встановлення синхронізації системи зв'язку з модуляцією (1 – BPSK; 2 – 16QAM; 3 – QPSK)

Висновок: модуляція BPSK на 3 дБ ефективніше QPSK

4.6 Сигнал широкоповного каналу

Широкомовний канал передає 32 біти інформації, яка включає Master Information Block.

Залежність величини помилкових бітів від E_b/N_0 для широкоповного каналу і декілька антен R приймача показано на рисунку 4.24.

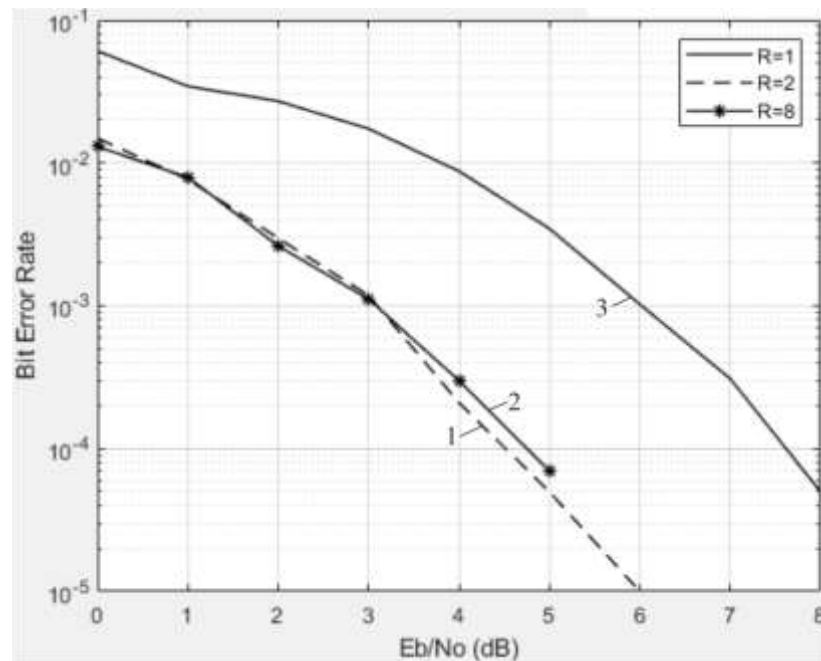


Рисунок 4.24. Залежність величини помилкових бітів від E_b/N_0 для широкоповного каналу при наявності декількох антен R приймача

(1 – $R = 2$; 2 – $R = 8$; 3 – $R = 1$;))

Висновок: наявність декількох антен (MIMO) у приймачі приводить до збільшення енергетичної ефективності системи на 3 дБ.

Висновки до четвертого розділу

Часове зміщення для самої сильної кореляції послідовності PSS може використовуватися для синхронізації форми сигналу в часі. Потім точна оцінка зміщення частоти може бути обчислена шляхом виконання кореляції між циклічним префіксом кожного символу OFDM в SSB і відповідними корисними частинами символів OFDM. Фаза цієї кореляції пропорційна зміщенню частоти сигналу.

Синхронізація піку кореляції PSS використовується для синхронізації форми сигналу і демодуляції OFDM. Піднесучі, пов'язані з SSS, витягуються і корелюються з кожною можливою послідовністю SSS. Індеси найсильніших послідовностей PSS і SSS об'єднуються, щоб дати ідентифікацію комірки фізичного рівня, яка потрібна для обробки PBCH DM-RS і PBCH.

Далі створюється кожна можлива послідовність PBCH DM-RS і виконується оцінка каналу і оцінка шуму. Індекс PBCH DM-RS з найкращим SNR визначає LSB індексу блоку SS/PBCH, необхідного для ініціалізації скремблювання PBCH.

Для початкового доступу до системи зв'язку п'ятого покоління, обладнання користувача виконує операції пошуку і вибору комірки базової станції для отримання початкової системної інформації. Спочатку виконується синхронізація фреймів, ідентифікація стільникової мережі та декодування головного інформаційного блоку

ВИСНОВКИ

1. Системи зв'язку 5G мають перспективну архітектуру, засновану на використанні різноманітних малих комірок і призначену для задоволення нових вимог по ємності і якості покриття мережі.

2. Пошук комірки базової станції заснований на отриманні первинного і вторинного сигналів синхронізації. Наявність каналу зв'язку вносить додаткові шуми, які приводять до похибок. Виконання операції пошуку комірки базової станції дозволяє визначити та компенсувати зміщення в області часу і області частоти. Проведене дослідження сітки ресурсів, сформованої хвилі мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM), дана характеристика сигналів синхронізації.

3. Дослідження взаємної кореляції сигналу на вході приймача з трьома можливими послідовностями первинного сигналу синхронізації PSS дозволяє зробити висновок: для високого відношення сигнал-шум наявний один пік найбільш сильної кореляції після компенсації зміщення частоти і високий пік-фактор; при пониженні відношення сигнал-шум відбувається зменшення пік-фактора взаємокореляційної функції, що призводить до похибок ідентифікації комірки базової станції системи зв'язку п'ятого покоління.

4. Дослідження моделі синхронізації символів і фреймів системи зв'язку п'ятого покоління дозволило зробити висновок, що найбільшу енергетичну ефективність має модуляція BPSK, яка на 3 дБ ефективніше модуляції QPSK.

5. Досліджена модель передачі сигналу широкомовного каналу. Зроблений висновок, що наявність декількох антен (MIMO) у приймачі приводить до збільшення енергетичної ефективності системи на 3 дБ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ Б. Скляр. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Прокис Д. Цифровая связь / Д. Прокис. Пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. G. Hui, B. Chenghao, Z. Hongjun, L. Fanghui and L. Lei, "Synchronization Error Estimation of High-speed AD Sampling Based on Digital Phase Discrimination," in 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Xuzhou, China, 2018. <https://doi.org/10.1109/csqrwc.2018.8455461>.
4. A. Rai and V. N. Kumar, "Wideband acquisition technique for QPSK demodulator," in 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2016. <https://doi.org/10.1109/rteict.2016.7807869>.
5. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. DOI: [10.25046/aj050242](https://doi.org/10.25046/aj050242).
6. F. Brandonisio and M.P. Kennedy, Noise-Shaping All-Digital Phase-Locked Loops, Springer, 2014.
7. L. Zhang and Z. He, "A modified timing synchronization algorithm for QPSK in digital receiver," in 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), Dengleng, China, 2011. <https://doi.org/10.1109/aimsec.2011.6011207>.
8. F. Shaikh and B. Joseph, "Simulation of synchronous reference frame PLL for grid synchronization using Simulink," in 2017 International Conference

on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3), Mumbai, India, 2017. <https://doi.org/10.1109/icac3.2017.8318790>.

9. A. Wadhwa and U. Madhow, "Near-Coherent QPSK Performance With Coarse Phase Quantization: A Feedback-Based Architecture for Joint Phase/Frequency Synchronization and Demodulation," *IEEE Trans. on Signal Processing*, 64(17), 4432–4443, 2016. <https://doi.org/10.1109/tsp.2016.2568169>.

10. W. Chen, M. Huang, X. Lou, "Sparse FIR Filter Design Based on Interpolation Technique," in 2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP), Shanghai, China, 2018. <https://doi.org/10.1109/icdsp.2018.8631685>.

11. S. Huang, S. Liu, M. Liu, J. Hu, Z. Zhu, "Low-Noise Fractional-N PLL With a High-Precision Phase Control in the Phase Synchronization of Multichips," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28(8), 702-704, 2018. <https://doi.org/10.1109/lmwc.2018.2842680>.

12. 4. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад: монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. Київ, 2018. 227 с.

13. Ting-An C, Kuan-Ting L., Guan-Cheng C., Shu-Hui C., Jar-Ferr Y. Super resolution using trilateral filter regression interpolation. 2017 IEEE 2nd International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP): Proceedings 2017 IEEE 2nd International Conf. (Singapore, 4-6 Aug. 2017). Singapore, 2017. P. 86-89. DOI: [10.1109/SIPROCESS.2017.8124511](https://doi.org/10.1109/SIPROCESS.2017.8124511).

14. Zhang L., Zhiming H. A modified timing synchronization algorithm for QPSK in digital receiver. *Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC): Proceedings 2011 2nd International Conf.* (Dengleng, China, 8-10 Aug. 2011). Dengleng, 2011. P. 1-4. DOI: [10.1109/AIMSEC.2011.6011207](https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6011207).

Додаток А
(довідковий)
Презентація

Слайд1

Моделювання процедури пошуку комірки стільникової мережі 5G

Шпірук М.С., гр. ТРМ-20-1

Керівник – к.т.н., доц. Макаришкін Д.А

Слайд 2

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження процедури пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління, дослідження моделей відновлення символів і фреймів.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз методів встановлення синхронізації мобільного абонента з базовою станцією;
- розглянути і дослідити процедуру пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління;
- дослідити модель системи зв'язку з синхронізацією символів і фреймів.

Об'єктом дослідження є процес приймання сигналу, пошук первинного і вторинного сигналів синхронізації.

Предметом дослідження є методи та засоби встановлення синхронізації мобільного абонента з базовою станцією.

Слайд 3

Наукова новизна одержаних результатів :

1. Вперше проведено дослідження процедури пошуку комірки базової станції системи зв'язку п'ятого покоління при різних відношеннях сигнал-шум, дана оцінка зміщенню частоти і часу.
2. Набув подальшого розвитку метод забезпечення синхронізації символів і фреймів системи зв'язку п'ятого покоління.
3. Отримали подальший розвиток методи дослідження енергетичної ефективності систем з багатьма антенами.

Практичне значення одержаних результатів:

Проведене дослідження процедури пошуку комірки базової станції може бути використано при відлагодженні роботи системи зв'язку п'ятого покоління при різних відношеннях сигнал-шум.

Слайд 4

Дослідження синхронізації мобільного абонента з сигналами базової станції

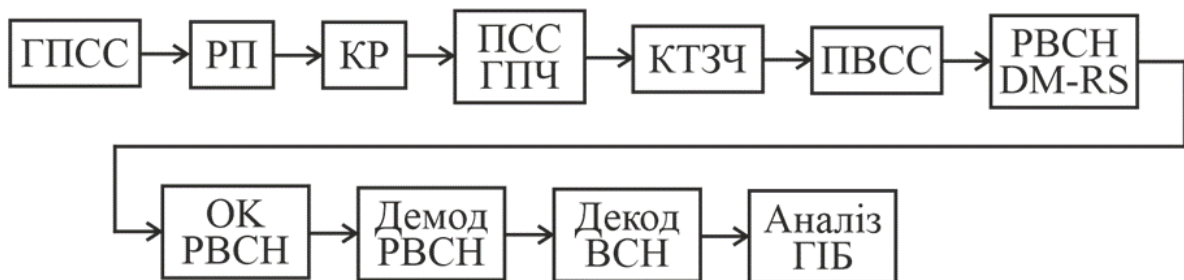


Рисунок 4.1 – Структура моделі дослідження синхронізації (ГПСС – генерація пакета синхронізації сигналів; РП – розгортка променя; КР – канал розповсюдження; PSS ГПЧ – первинний сигнал синхронізації, грубий пошук частоти; КТЗЧ – корекція точного зміщення частоти; ПВСС – пошук вторинного сигналу синхронізації; RBCH DM-RS – фізичний радіомовний канал, виділений опорний сигнал демодуляції; ОК RBCH – оцінка каналу з використанням фізичного радіомовного каналу; Демод RBCH – демодуляція фізичного радіомовного каналу; Декод BСН – декодування радіомовного каналу; ГІБ – головний інформаційний блок)

Слайд 5

Схема пошуку базової станції

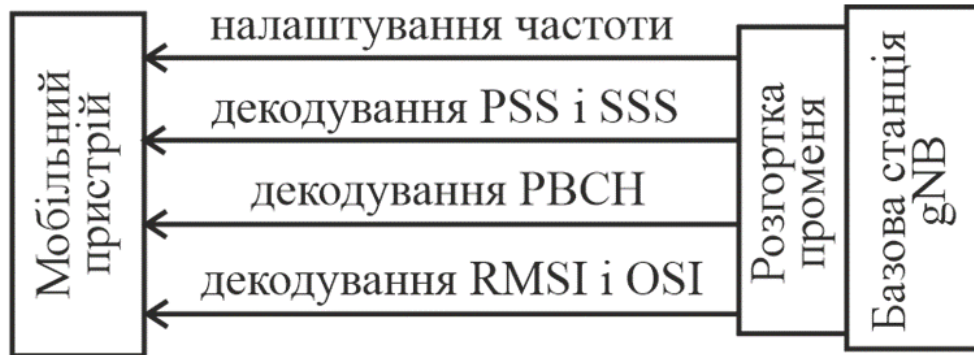


Рисунок 5.1- Схема пошуку базової станції системи зв'язку п'ятого покоління

Слайд 6

Алгоритм пошуку комірки

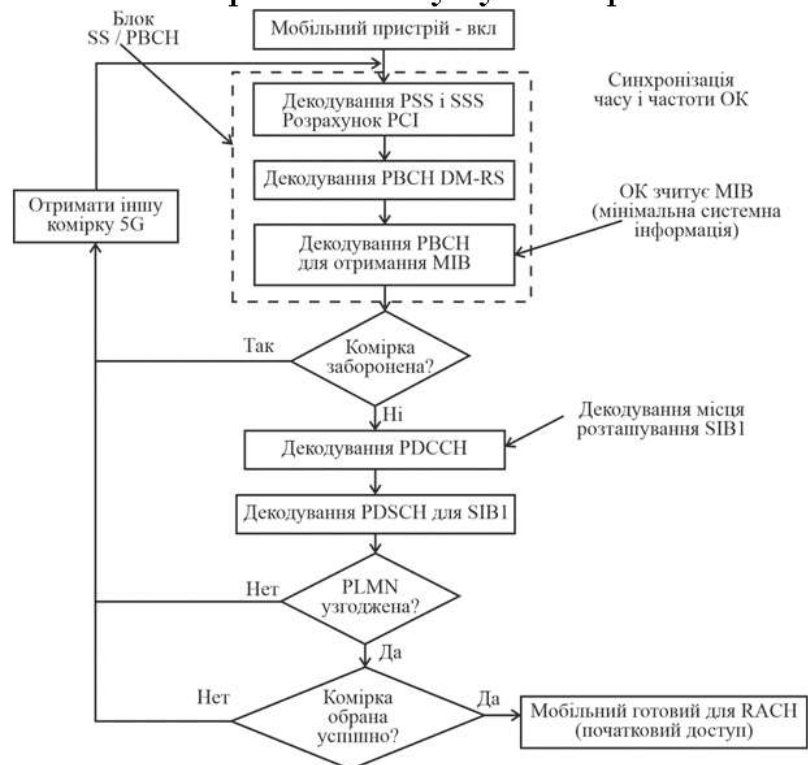


Рисунок 6.1- Алгоритм процедури пошуку комірки

Слайд 7

Блок сигналів синхронізації

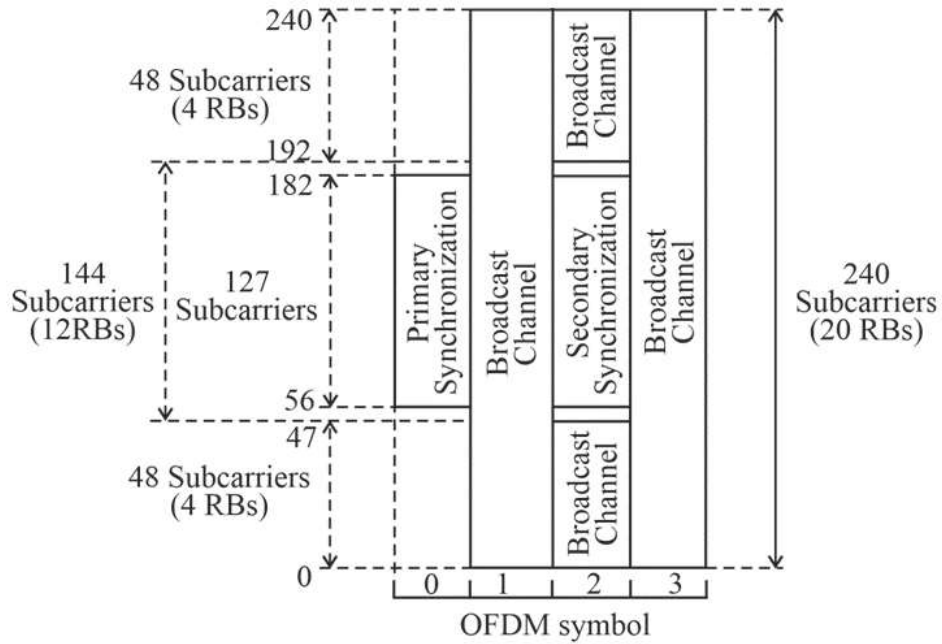


Рисунок 7.1 - Структура блоку сигналів синхронізації (SSB)

Слайд 8

Набір блоків сигналів синхронізації

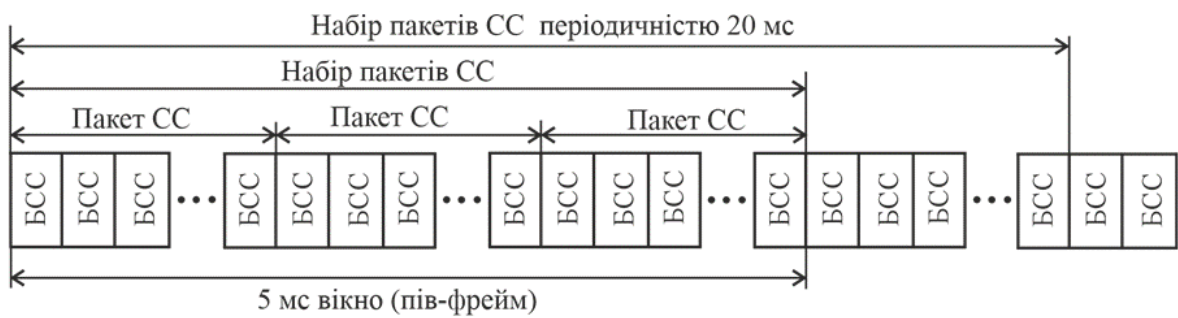


Рисунок 8.1 - Структура набору блоків сигналів синхронізації і їх періодичне повторення

Слайд 9

Розповсюдження блоків сигналів синхронізації

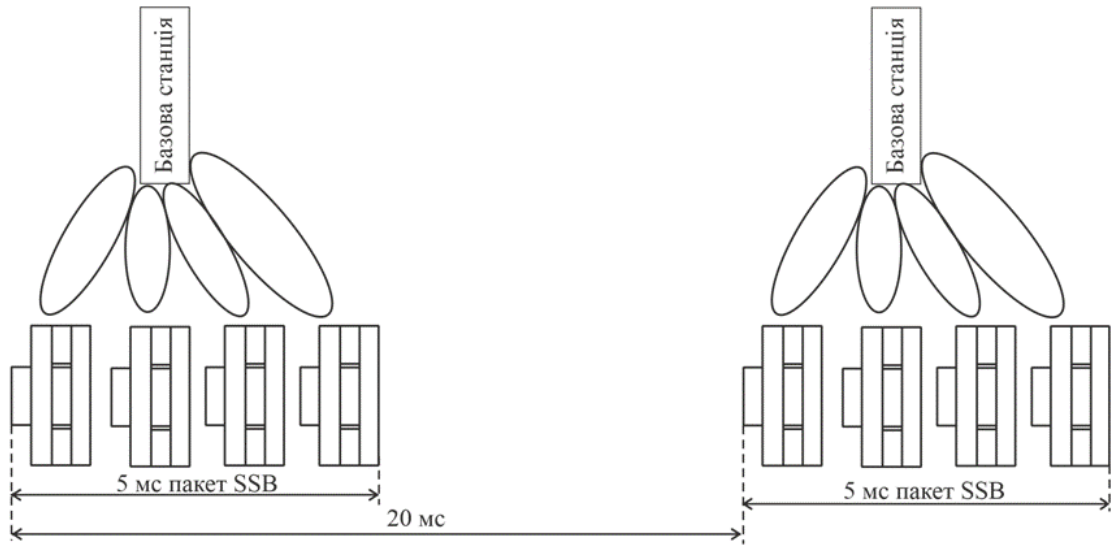


Рисунок 9.1 – Приклад розповсюдження пакету блоків сигналів синхронізації

Слайд 10

Сигнали синхронізації

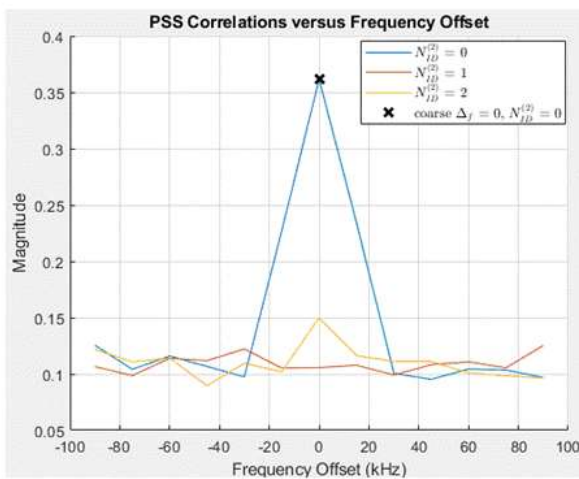


Рисунок 10.1 – Кореляція первинного сигналу синхронізації

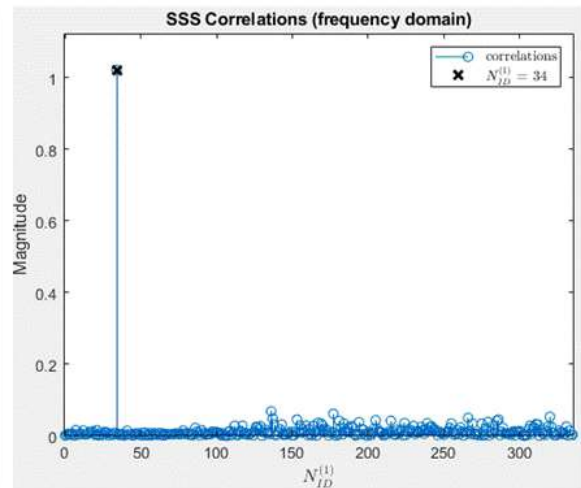


Рисунок 10.2 – Кореляція вторинного сигналу синхронізації

Слайд 11

Синхронізація символів і фреймів

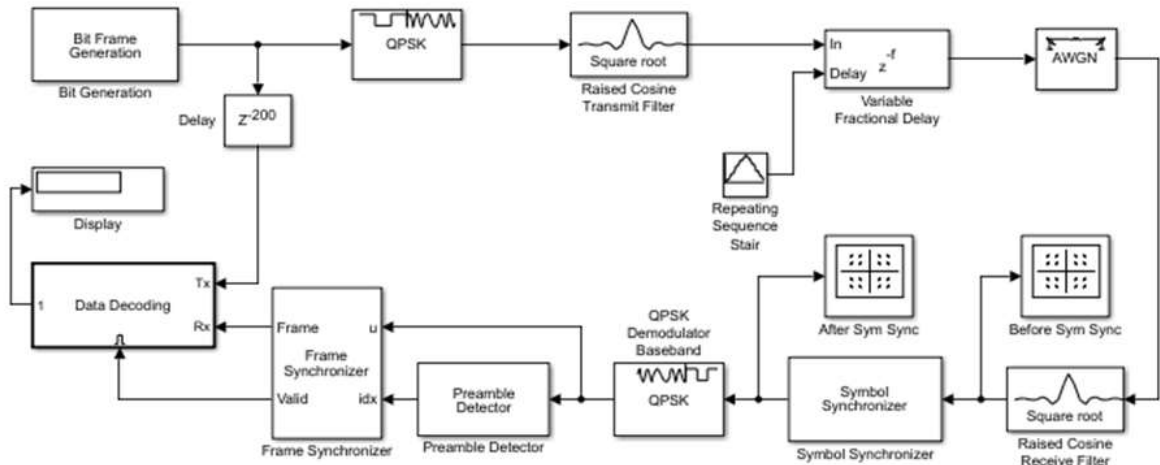
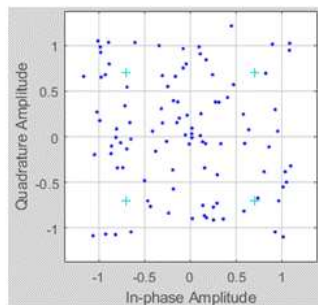
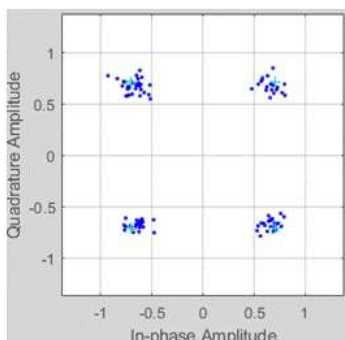


Рисунок 11.1 – Simulink модель системи зв'язку з встановленням синхронізації

Слайд 12



а)



б)

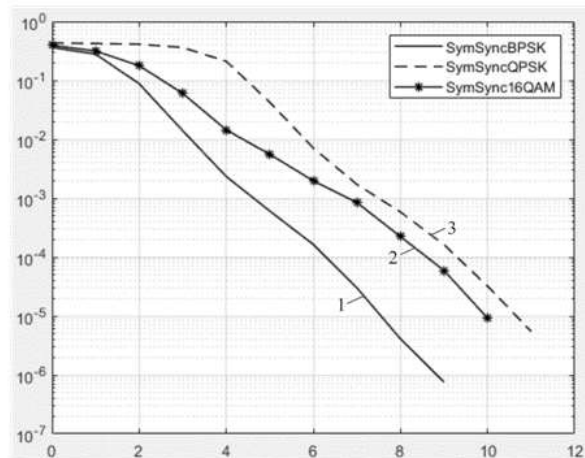


Рисунок 12.2 –Залежність величини помилкових бітів від E_b/N_0 моделі встановлення синхронізації системи зв'язку з модуляцією (1 – BPSK; 2 – 16QAM; 3 – QPSK)

Рисунок 12.1 – QPSK сигнал після синхронізації

Слайд 13

Дослідження ширококомовного каналу

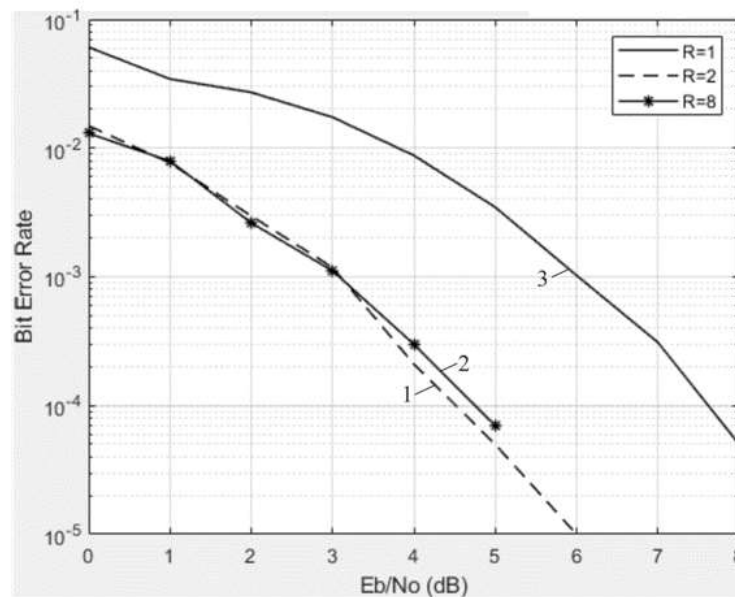


Рисунок 4.24. Залежність величини помилкових бітів від E_b/N_0 для ширококомовного каналу при наявності декількох антен R приймача (1 – $R = 2$; 2 – $R = 8$; 3 – $R = 1$;))

Слайд 14

ВИСНОВКИ

1. Системи зв'язку 5G мають перспективну архітектуру, засновану на використанні різноманітних малих комірок і призначену для задоволення нових вимог по ємності і якості покриття мережі.
2. Пошук комірки базової станції заснований на отриманні первинного і вторинного сигналів синхронізації. Наявність каналу зв'язку вносить додаткові шуми, які приводять до похибок. Виконання операції пошуку комірки базової станції дозволяє визначити та компенсувати зміщення в області часу і області частоти. Проведене дослідження сітки ресурсів, сформованої хвилі мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM), дана характеристика сигналів синхронізації.
3. Дослідження взаємної кореляції сигналу на вході приймача з трьома можливими послідовностями первинного сигналу синхронізації PSS дозволяє зробити висновок: для високого відношення сигнал-шум наявний один пік найбільш сильної кореляції після компенсації зміщення частоти і високий пік-фактор; при пониженні відношення сигнал-шум відбувається зменшення пік-фактора взаємкореляційної функції, що призводить до похибок ідентифікації комірки базової станції системи зв'язку п'ятого покоління.
4. Дослідження моделі синхронізації символів і фреймів системи зв'язку п'ятого покоління дозволило зробити висновок, що найбільшу енергетичну ефективність має модуляція BPSK, яка на 3 дБ ефективніше модуляції QPSK.
5. Досліджена модель передачі сигналу ширококомовного каналу. Зроблений висновок, що наявність декількох антен (MIMO) у приймачі приводить до збільшення енергетичної ефективності системи на 3 дБ.

Додаток Б
(довідковий)
Апробація роботи

УДК 621.39

DOI:

ПЯТИН І.С.

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-1898-6755 e-mail: ilkhmel@ukr.net

МАКАРИШКІН Д.А., МІШАН В. В., ШПІРУК М.С.

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0003-3447-811X e-mail: makaryshkin@ukr.net

ORCID ID: 0000-0002-8505-2648 e-mail: v_mishan@ukr.net

ORCID ID: 0000-0002-2983-3781 e-mail: shpiruk1809@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ПОЧАТКОВОГО ДОСТУПУ ДО МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

Вимоги до синхронізації системи зв'язку 5G враховують роботу з високою швидкістю передачі даних, меншою затримкою та підвищеним ущільненням. Пошук комірки - це процедура, за допомогою якої обладнання користувача (UE) отримує синхронізацію часу та частоти з базовою станцією та декодує ідентифікатор комірки мобільного пристрою. У роботі проведено дослідження процедури пошуку комірки, моделі відновлення синхронізації символів і фреймів у системі QPSK, порушену через змінну помилку синхронізації. Проведено дослідження формування радіомовного каналу на фізичному рівні.

Ключові слова: пошук комірки, первинний сигнал синхронізації, вторинний сигнал синхронізації, радіомовний канал, канал довільного доступу.

PYATIN I.S.

Khmelnytskiy Politechnic Professional College by Lviv Politechnic National University

MAKARYSHKIN D.A., MISHAN V.V., SHPIRUK M.S.

Khmelnytskiy National University

RESEARCH OF THE PROCEDURE OF INITIAL ACCESS TO THE FIFTH GENERATION COMMUNICATION NETWORK

Traditional mobile networks have bandwidth and infrastructure limitations. Each base station has a limited number of users and data capacity. 5G technology uses advanced technologies, such as massive MIMO and beamforming, to increase data rates and spectrum efficiency. These features, and the large number of small cells, allow many 5G users to receive low latency and high traffic without overloading the base station. Small cells work the same way

as regular cells, but use new technology and millimeter waves (5G New Radio). Low-power base stations can be easily deployed. Cell search is a procedure by which the user equipment (UE) obtains time and frequency synchronization with the base station and decodes the cell ID of the mobile device. System information is broadcast information that is periodically transmitted by the base station on the downlink. This is very important information for the mobile device (UE) needed to connect to the base station (gNB). The UE reads system information to determine the location of mobile devices when turned on, to select and re-select a cell. System information provides the following information: system frame number, system bandwidth, PLMN, mobile subscriber selection and redial thresholds, etc., required to access the network. Physical Cell ID (PCI) is used to distinguish mobile devices in the network radio communication. PLMN (Public land Mobile Network) - mobile network service area. Is a set of all mobile devices of one cellular network operator. The UE scans the bandwidth in the sync raster. The synchronization raster indicates the frequency positions of the synchronization unit that can be used by the UE to detect the system when there is no explicit indication of the position of the synchronization unit. In the next step, the UE decodes the primary and secondary synchronization signals to obtain the Physical Cell ID (PCI) and the DMRS PBCH. The base station transmits SSB packets that contain one SSB per beam. The beam direction changes for each SSB transmission. The following steps are performed to complete the synchronization procedure. The UE selects the preferred beam and decodes the PBCH MIB information, such as SFN, SSB index, raster offset, default DL numerology, RMSI configuration, DM-RS location, and cell prohibition information. If the cell is not locked, the UE attempts to decode the physical downlink control channels (PDCCH) to obtain the frequency location of the PDSCH resources. A study of the model of restoring the synchronization of symbols and frames in the QPSK system, caused by a variable synchronization error. A study of the formation of the radio channel at the physical level.

Keywords: Cell search, Primary synchronization signal, Secondary synchronization signal, Broadcast channel, Random access channel.

Постановка проблеми

Традиційна мережева інфраструктура має багато обмежень. Технологія 5G вирішує проблеми збільшення швидкості передачі даних, надійності і зменшення затримок. Для забезпечення широкої смуги сигналу і розширення зони покриття для більшої кількості користувачів, технологія 5G використовує концепцію малих комірок (small cells).

Малі комірки - це базові станції з малим енергоспоживанням, які охоплюють невелику зону або застосовуються всередині приміщень. Малі комірки мають всі основні характеристики звичайних базових станцій і здатні обробляти високі швидкості передачі даних для окремих користувачів. У мережах LTE Advanced і 5G малі комірки будуть відігравати важливу роль для мобільного широкосмугового доступу і додатків, де потрібна мала затримка. Малі комірки поділяються на три основні категорії в залежності від зони покриття і кількості користувачів. Фемто-комірки - це невеликі мобільні базові станції, призначені для покриття всередині приміщень. Проблема низького рівня сигналу від базових макро-станцій для широких зон, які розташовуються поза будівлями), може

бути вирішена за допомогою фемто-комірок всередині будівель. Фемто-комірки, підключені через провідний Інтернет, можуть використовуватися для розвантаження мережі, в разі перевантаження мобільного широкосмугового доступу, створюючи обхідний канал через Інтернет, а також для розширення зони покриття і збільшення трафіку даних для користувачів всередині приміщень. Піко-комірки також відносяться до категорії малих комірок, вони застосовуються, головним чином, для невеликих підприємств для розширення покриття мережі у важкодоступних місцях і для збільшення пропускної здатності мережі доступу. Мікро-комірки призначені для підтримки більшого числа користувачів, в порівнянні з фемто-комірками і піко-комірками. Завдяки більшій потужності передачі, вони здатні покривати великі зони і підходять для застосування, наприклад, в «розумних містах», «розумному метро», тощо.

Традиційні мобільні мережі мають обмеження смуги пропускання і інфраструктури. Кожна комірка має обмежену кількість користувачів і ємність передачі даних. В технології 5G використовуються передові технології, такі як масивний MIMO і формування променя (Beamforming), для збільшення швидкості передачі даних і ефективності використання спектра. Ці функції, і велика кількість малих комірок дозволяють багатьом користувачам 5G отримувати великий трафік без перевантаження комірки і низьку затримку. Малі комірки працюють так само, як і звичайні комірки, але використовують нові технології, такі як множинність антен передачі і приймання (MIMO), формування променя (Beamforming), і міліметрові хвилі (5G New Radio). Базові станції малої потужності можуть легко розгортатися. Крім того, пристрої з малими комірками спроектовані так, щоб знизити складність, і, отже, їх установка і запуск здійснюється швидше і простіше.

Аналіз останніх досліджень

В роботах [1-6] наведена інформація про отримання початкового доступу до мережі зв'язку п'ятого покоління. Описуються сигнали, що передаються між обладнанням користувача та базовою станцією, включаючи керування променем. Описуються всі повідомлення, якими обмінюються мобільний пристрій та базова станція. Для мобільного зв'язку п'ятого покоління необхідне забезпечення можливості швидкої синхронізації фреймів для зменшення часу під'єднання мобільного абонента до мережі базових станцій [7-14]. Але в зазначених роботах не проаналізовані питання встановлення початкового доступу в залежності від відношення сигнал-шум в каналі передачі між базовою станцією і мобільним абонентом.

Метою роботи є: дослідження процедури пошуку комірки для мобільного зв'язку п'ятого покоління в умовах наявності частотних і часових зміщень сигналів у каналі передачі, дослідження шляхів синхронізації символів і фреймів, вивчення питань формування сигналу фізичного радіомовного каналу.

Процедура пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління

Пошук комірки - це процедура, за допомогою якої обладнання користувача (ОК) отримує синхронізацію часу та частоти з базовою станцією та декодує ідентифікатор комірки мобільного пристрою. У 5G NR для пошуку комірки відбувається декодування первинного сигналу синхронізації (PSS) і вторинного сигналу синхронізації (SSS) і визначення фізичного ідентифікатора комірки (PCI).

Є два методи, за допомогою яких обладнання користувача може отримати доступ до комірки 5G NR:

- розгортання в неавтономному режимі (NSA): подвійне підключення (EN-DC)
- розгортання в автономному (SA) режимі: тільки для мережі зв'язку п'ятого покоління NR

У EN-DC інформація про пошук комірки, така як абсолютний номер радіочастотного каналу (NR-ARFCN – Absolute Radio-Frequency Channel Number), ідентифікатор комірки, параметри RACH (Random Access Channel – канал довільного доступу), тощо – надаються мережею в повідомленні реконфігурації RRC (Radio Resource Control – контроль радіоресурсів) через базову станцію (eNB).

В автономному режимі процедура пошуку комірки NR включає такі кроки (рис. 1):

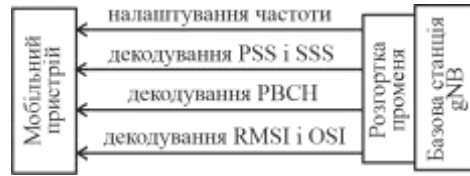


Рис. 1. Процедура пошуку комірки мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G)

- обладнання користувача (ОК) налаштовується на певну частоту;
- ОК намагається виявити сигнали PSS, SSS, щоб отримати синхронізацію частоти та часу;
- як тільки обладнання користувача успішно виявляє PSS/SSS, воно отримує інформацію про синхронізацію та фізичний ідентифікатор комірки (PCI), отже, ОК готове до декодування PBCH;
- як тільки ОК успішно декодує PBCH, воно намагається виконати PDCCH та PDSCH для RMSI та OSI.

Алгоритм процедури пошуку комірки приведений на рис. 2.

Системна інформація - це ширококомовна інформація, що періодично передається базовою станцією по низхідній лінії зв'язку. Це дуже важлива інформація для мобільного пристрою (ОК), необхідна для підключення до базової станції (gNB). ОК зчитує системну інформацію для визначення місця розташування мобільних пристроїв при включенні, для вибору і повторного вибору комірки. Системна інформація надає таку інформацію: номер системного фрейму, пропускна спроможність системи, PLMN, вибір мобільного абонента та пороги повторного вибору, тощо, потрібну для доступу до мережі.

Системну інформацію 5G New Radio можна розділити на три категорії.

- Мінімальна системна інформація (MSI)
- Мінімальна системна інформація, що залишилася (RMSI)
- Інша системна інформація (OSI)

Ці категорії включають головний інформаційний блок (MIB) та 9 системних інформаційних блоків (SIB). Інформація MIB передається каналами BCH і PBCH, SIB передається каналами DL-SCH і PDSCH.

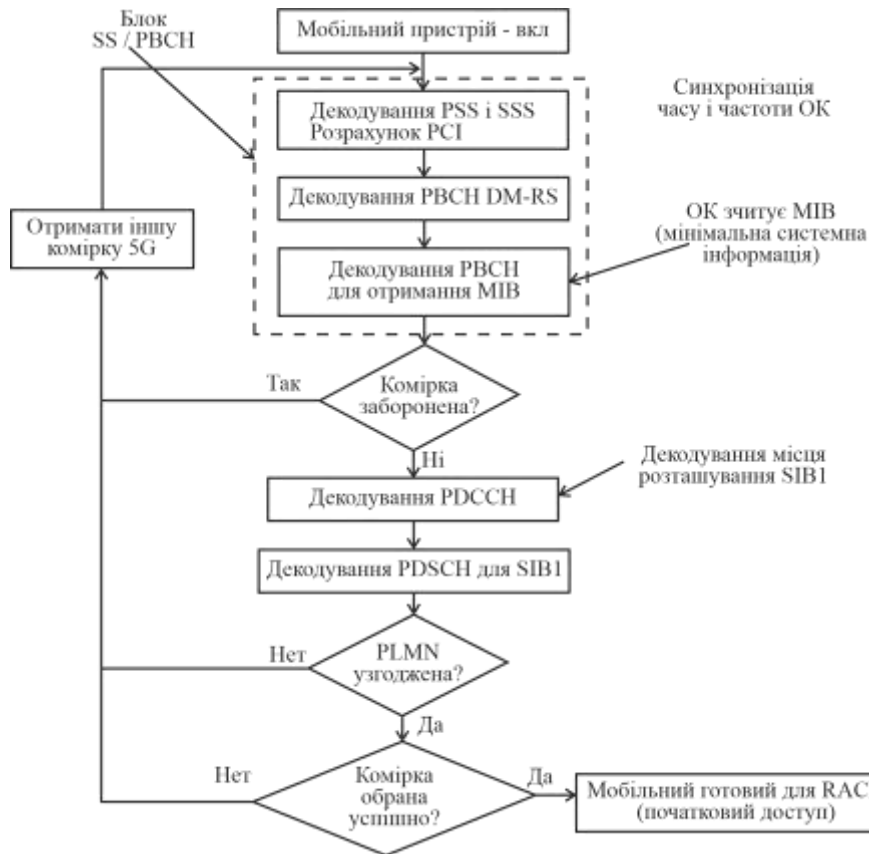


Рис. 2. Алгоритм процедури пошуку комірки

Кожна комірка 5G NR має ідентифікатор фізичної комірки (PCI – Physical Cell ID) і використовується для розрізнення мобільних пристроїв у мережі радіозв'язку. Погане або неправильне планування PCI може вплинути на процедуру синхронізації, демодуляції та передачі сигналів і погіршити роботу мережі. Планування PCI має бути простішим для NR порівняно з LTE, оскільки для розподілу доступно вдвічі більше PCI. У 5G New Radio є 1008 унікальних PCI в порівнянні з LTE 504 PCI, і це визначається наступним виразом:

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}.$$

$N_{ID}^{(1)}$ - вторинний сигнал синхронізації (SSS) та його діапазон від $\{0, 1, \dots, 335\}$

$N_{ID}^{(2)}$ - первинний сигнал синхронізації (PSS) та його діапазон від $\{0, 1, 2\}$

Використання високих несучих частот призводять до збільшення частотних і часових зміщень несучої. Виникнення часових і частотних зміщень призводять до завад між несучими (ICI) і міжсимвольним завадам (ISI). Часовий зсув відбувається через затримку передачі, коли переданий сигнал досягає приймача з затримкою в часі. В цьому випадку приймач не знає, коли передавач відправив новий пакет. Зазвичай розглядається нормалізоване часове зміщення, що дорівнює кількості відліків між переданим і прийнятим сигналами. Проведено дослідження залежності кореляції для трьох значень послідовностей первинного сигналу синхронізації (PSS) $N_{ID}^{(2)}$ від зміщення частоти на вході приймача (рис. 3).

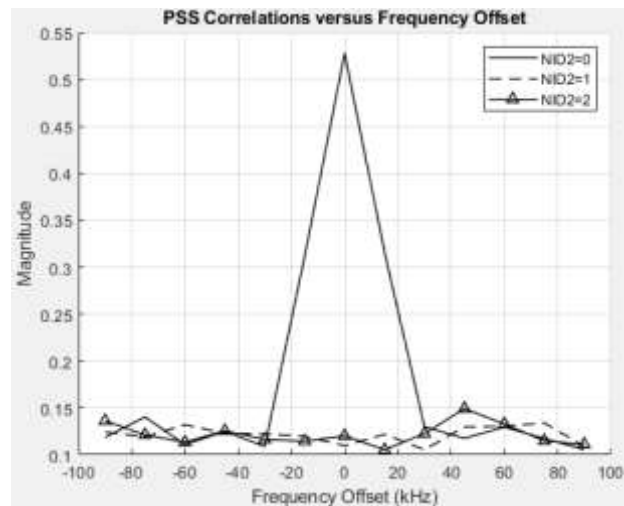


Рис. 3. Залежність кореляції для трьох значень послідовностей первинного сигналу синхронізації (PSS)

$N_{ID}^{(2)}$ від зміщення частоти на вході приймача

PLMN (Public land Mobile Network) – зона обслуговування мобільної мережі. Являє собою сукупність всіх мобільних пристроїв одного оператора стільникової мережі зв'язку. Таким чином, одночасно в одній країні може бути кілька PLMN відповідно до кількості операторів мережі зв'язку. Причому, якщо той самий оператор здійснює свою діяльність у кількох країнах, це будуть різні PLMN.

UE сканує смугу частот у синхронізуючому растрі на основі того, в якій смугі частот UE виконує пошук комірки для налаштування конкретної частоти. Для діапазону FR1 виділені частоти від 450 МГц до 6 ГГц. Для діапазону FR2 виділені частоти від 24,25 ГГц до 52,6 ГГц. Растр синхронізації вказує частотні позиції блоку синхронізації, які можуть бути використані UE для виявлення системи, коли явна вказівка позиції блоку синхронізації відсутня.

На наступному етапі UE декодує первинні та вторинні сигнали синхронізації, щоб отримати Physical Cell ID (PCI) та PBCH DMRS, розташовані в растрі синхронізації. PSS, SSS та NR-PBCH передаються у блоці сигналу синхронізації (SSB). SSB складається з чотирьох символів: 1-символьного PSS, 1-символьного SSS та 2-символьного PBCH. Синхронізація в області часу у термінах рівня символу та рівня слота, а також частотна синхронізація реалізована через PSS/SSS. Склад блоку сигналів синхронізації (SSB) приведений на рис. 4.

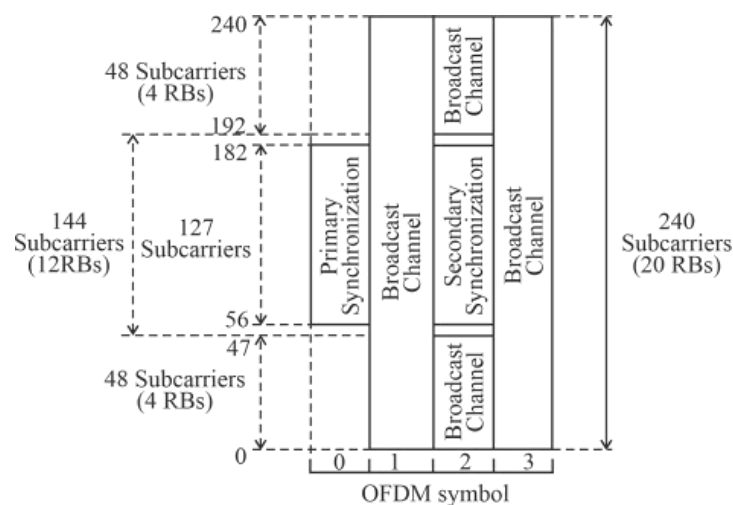


Рис. 4. Структура блоку сигналів синхронізації (SSB)

SSB передаються шляхом формування пакета SSB (один SSB на промінь), який використовується під час розгортки променя. Механізм розгортки променя використовується для визначення найкращого променя.

Група пакетів SS називається набором пакетів SS, як наведено на рис. 5. Пакет сигналів синхронізації (SSB), і набір пакетів сигналів синхронізації можуть містити один або кілька елементів, у той час як максимальна кількість SSB в пакеті SS залежить від частоти і може бути 4 (нижче 3 ГГц), 8 (від 3 до 6 ГГц) або 64 (6 до 52,6 ГГц). Періодичність SSB конфігурується мережею, періодичність набору SSB пакетів становить 20 мс для всього діапазону частот, тобто включає 2 кадри. Схематична структура набору блоків сигналів синхронізації і їх періодичне повторення приведено на рис. 5.

Базова станція (gNB) визначає кілька можливих позицій для SSB в радіокадрі, і це число відповідає кількості променів, що випромінюються в певному напрямку. Кожен SSB може бути ідентифікований унікальним номером, що називається індексом SSB, і ідентифікація того, який SSB виявлений, залежить від місця розташування UE. UE вимірює рівень сигналу опорного сигналу демодуляції (PBCH DMRS) кожного SSB, який він виявив протягом певного періоду (періоду одного набору SSB). За результатом вимірювання UE може ідентифікувати індекс SSB із найсильнішим сигналом, який є найкращим променем для UE.

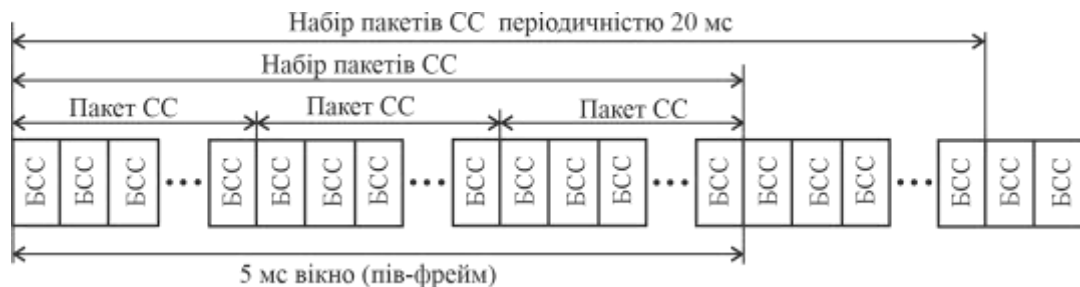


Рис. 5. Структура набору блоків сигналів синхронізації і їх періодичне повторення

Для завершення процедури синхронізації виконуються наступні кроки:

- UE вибирає кращий промінь і декодує інформацію PBCH MIB, таку як SFN, індекс SSB, зміщення растру, нумерологія DL за замовчуванням, конфігурація RMSI, розташування DM-RS та інформація про заборону комірок, тощо.

- Якщо комірка не заблокована, UE намагається декодувати наступні фізичні канали управління низхідної лінії зв'язку (PDCCH), щоб отримати частотне розташування ресурсів PDSCH для підготовки інформації SIB #1.

- Конфігурація PDCCH для RMSI надається PBCH. Конфігурація Control Resource Set (CORESET) для RMSI пов'язана з блоком SS у наборі пакетів SSB.

- UE зчитує мінімальну системну інформацію, що залишилася, з SIB # 1 і декодує ідентифікатор PLMN, параметри вибору комірки, параметри RACH

- Якщо PLMN ID мережі збігається зі списком PLMN ID, доступним з UE, тоді UE запускає процедуру вибору комірки, інакше UE отримує іншу комірку 5G і перезапускає процес знову.

- Інший параметр UE намагається перевірити $q_{R\text{x}min}$, якщо сигнал, виявлений UE, задовольняє рівню $q_{R\text{x}min}$, процедура вибору комірки успішна і UE може спробувати виконати синхронізацію висхідної лінії зв'язку з процедурою RACH.

- Якщо вибір комірки не успішний, UE намагається захопити іншу комірку і перезапускає процес.

Синхронізація символів і фреймів

Виконаємо дослідження моделі відновлення синхронізації символів і фреймів у системі QPSK, порушену через змінну помилку синхронізації. Simulink модель

дослідження синхронізації символів і фреймів мобільних засобів телекомунікацій приведена на рис. 6.

Блок Variable Fractional Delay вводить змінну помилку синхронізації в сигнал QPSK, оброблену за допомогою фільтра з характеристикою кореня з піднесеного косинуса (RRC). Блок Symbol Synchronizer коригує неузгодженість тактових імпульсів між передавачем і приймачем, вирівнюючи вихідний сигнал з дійсним опорним сигналом. Синхронізатор символів повертає вектор, що містить 99, 100 або 101 символ для вхідного вектора з 200 відліків.

Щоб вирівняти потік бітів по правильним границям фрейму і визначити допустимі індикатори фрейму в демодульованому потоці бітів, блок Frame Synchronizer використовує початок індексу пакета, виявленого блоком Preamble Detector. Підсистема декодування даних BER обчислює частоту помилок по бітам (BER). Підсистема декодування даних BER регенерує біти вхідних даних замість використання виведення блоку генерації бітів, щоб уникнути обчислення BER для неприпустимих кадрів.

При співвідношенні сигнал/шум 20 дБ і змінній помилці синхронізації в діапазоні $[0, 0,9]$ відліків відновлення сигналу відбувається успішно на тракті приймача, який включає синхронізацію символів. Помилка синхронізації змінюється з часом, змушуючи сукупність коливатися між пошкодженим і чистим станами. На рис. 7 показана констеляційна діаграма QPSK сигналу до синхронізації. На рис. 8 показана констеляційна діаграма QPSK сигналу після синхронізації. BER з синхронізацією символів і без неї показує поліпшення продуктивності за рахунок блоку Symbol Synchronizer.

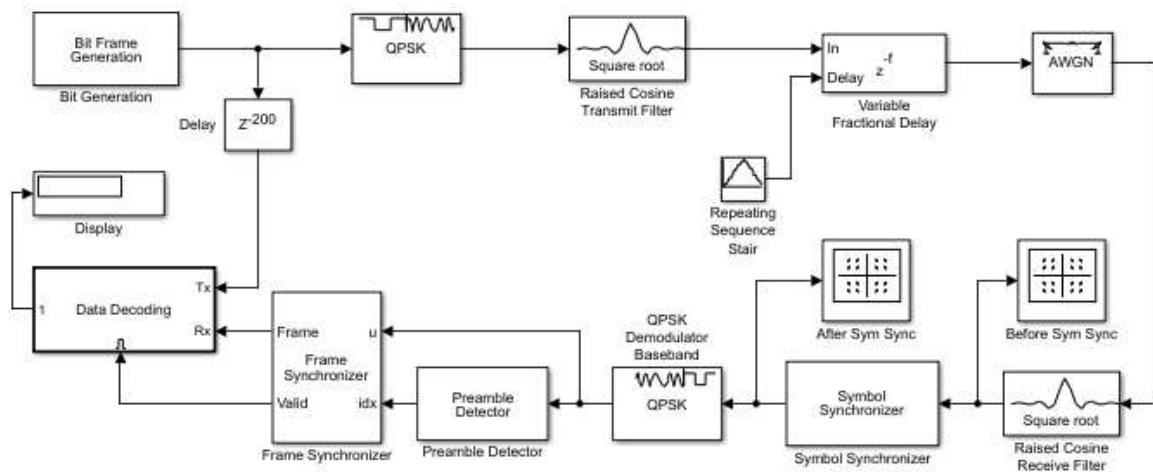


Рис. 6. Simulink модель дослідження синхронізації символів і фреймів мобільних засобів телекомунікацій

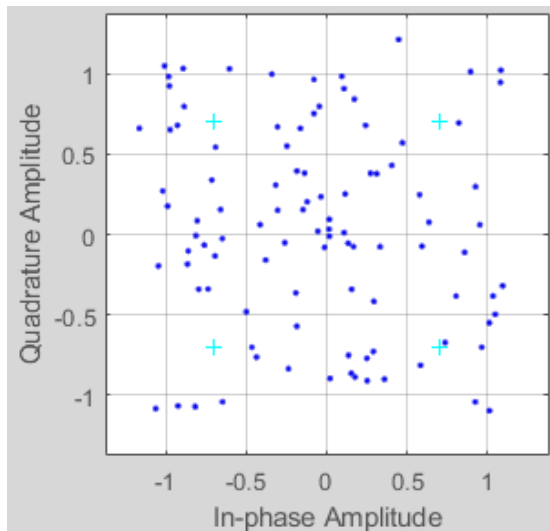


Рис. 7. Констеляційна діаграма QPSK сигналу до синхронізації

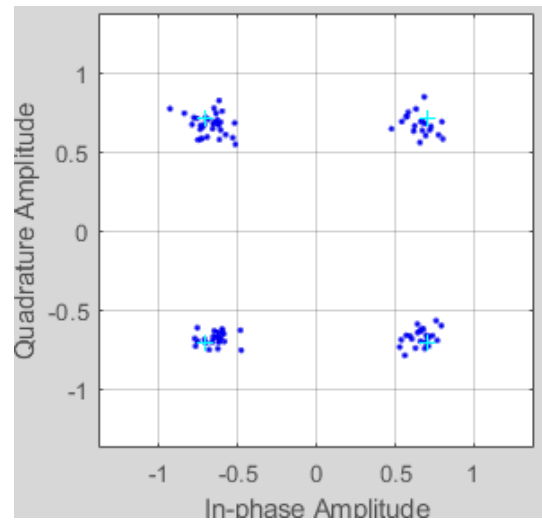


Рис. 8. Констеляційна діаграма QPSK сигналу після синхронізації

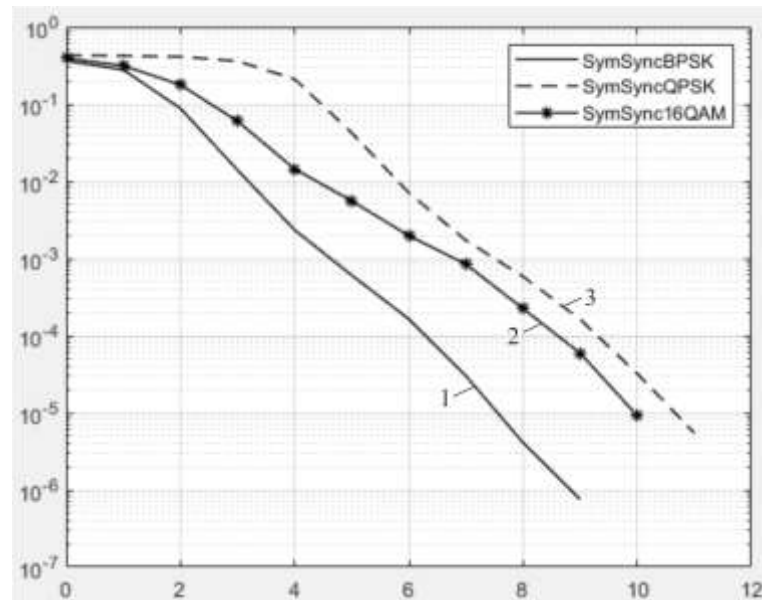


Рис. 9. Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум моделі синхронізації символів і фреймів з різними видами модуляції (1 – BPSK; 2 – 16QAM; 3 – QPSK)

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що при встановленій синхронізації, модуляція BPSK на 3 дБ ефективніше модуляції QPSK

Формування сигналу радіомовного каналу

Повідомлення радіомовного каналу складається з 32 біт і включає MIB (Master Information Block). Біти повідомлення вказують:

- відстань між піднесучими SCS контрольного каналу та повідомлення SIB1, яке в загальному випадку відрізняється від SCS_{SSB} ;
- положення частотно-часового блоку CORESET0, в якому розташоване повідомлення контрольного каналу з інформацією про розташування та параметри SIB1;
- параметр k_{SSB} , що визначає частотний зсув між початковою піднесучою блока сигналів синхронізації і найближчим елементом сітки ресурс блоків;
- номер фрейму;

- номер напівфрейму;
- доступність комірки для абонентських станцій;
- номер блока сигналів синхронізації в пакеті, тощо.

Для формування радіомовного каналу на фізичному рівні відбуваються перетворення за рис. 10:

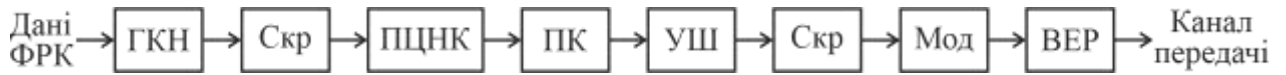


Рис.10. Структурна схема перетворень сигналів фізичного радіомовного каналу (ФРК – фізичний радіомовний канал; ГКН – генерація корисного навантаження; Скр – скремблювання; ПЦНК – приєднання циклічного надлишкового коду; ПК – полярне кодування; УШ – узгодження швидкості; Мод – модуляція; ВЕР – відображення елементів ресурсів

Після приймання даних RVCH (24 біта) приєднується 8 додаткових бітів, пов'язаних з синхронізацією для генерації корисного навантаження (32 біта). Далі приєднується циклічний надлишковий код, що містить 24 біта, що разом дає 56 біт. Ці 56 біт перетворюються у 512 біт після полярного кодування, які перетворюються у 864 біти після узгодження швидкості. Для передачі 432 символів QPSK (864 біта) необхідно 432 елементів ресурсів. Для RVCH виділено 576 елементів ресурсів, решта 144 елементів ресурсів використовуються для RVCH DM-RS. Для формування сигналу радіомовного каналу виконуються наступні перетворення:

- скремблювання, що залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня, від максимальної кількості блоків сигналів синхронізації у пакеті, а також від двох біт номера фрейму;
- додавання до скремблених біт 24 перевірочних біт, що формуються за допомогою полінома;
- полярне (Polar) кодування;
- узгодження швидкостей потоків, яке полягає у відкиданні деяких біт та перемежуванні решти;
- друге скремблювання, що залежить від ідентифікатора комірки фізичного рівня та від номера блока сигналів синхронізації в пакеті;
- QPSK модуляція, для якої кожній парі біт ставиться у відповідність комплексний QPSK символ;
- відображення символів модуляції на частотно - часові комірки блока сигналів синхронізації.

Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум для фізичного радіомовного каналу при різній кількості антен R приймача приведено на рис. 11.

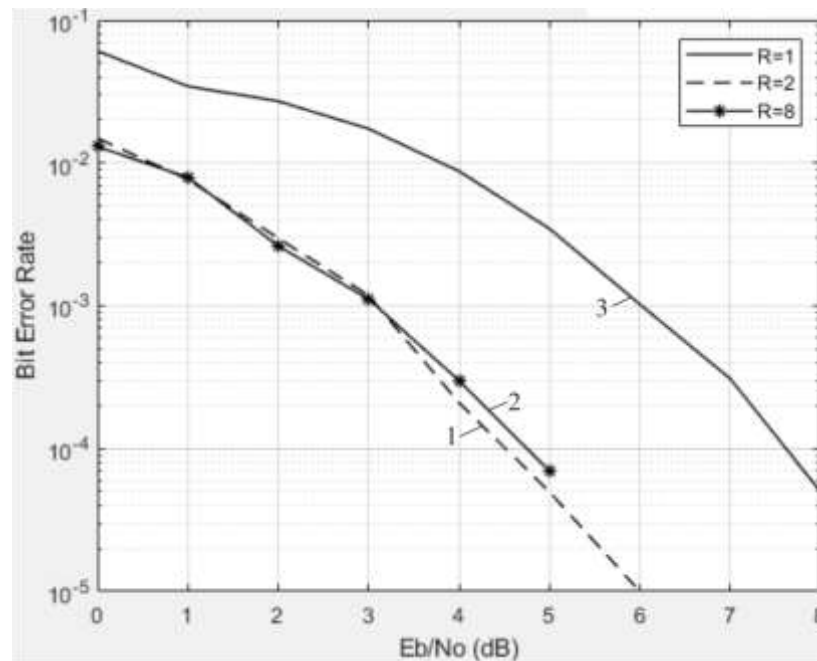


Рис. 11. Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум для фізичного радіомовного каналу (РВСН) при різній кількості антен R приймача (1 – $R = 2$; 2 – $R = 8$; 3 – $R = 1$;))

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що використання декількох антен (режим MIMO) на боці приймача підвищує енергетичну ефективність системи зв'язку на 3 дБ у порівнянні з використанням однієї антени.

Висновки

У статті проаналізований алгоритм процедури пошуку комірки у мобільному зв'язку п'ятого покоління. Досліджена залежність кореляції для трьох значень послідовностей первинного сигналу синхронізації (PSS) $N_{ID}^{(2)}$ від зміщення частоти на вході приймача і визначений максимум кореляції PSS на одній з послідовностей. Це дозволяє визначити ідентифікатор комірки обладнання користувача. Досліджена модель відновлення синхронізації символів і фреймів у системі QPSK, порушену через змінну помилку синхронізації. Зроблений висновок, що при встановленій синхронізації, модуляція BPSK на 3 дБ ефективніше модуляції QPSK. Досліджена структурна схема формування сигналу радіомовного каналу. Встановлено, що використання декількох антен (режим MIMO) на боці приймача підвищує енергетичну ефективність системи зв'язку на 3 дБ у порівнянні з використанням однієї антени.

Література

1. Пятін І.С. Система зв'язку з QPSK модуляцією і синхронізацією несучої /І.С. Пятін, В.В. Мішан, О.О. Кухарець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – №5. – С.211-217
2. Pyatin I. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation /J. Voiko, I. Pyatin, O. Eromenko, I. Parkhomey// Adaptive systems of automatic control, 2019 – №1 (34). – С. 5-15.
- 3.Пятін І.С. Порівняльний аналіз детекторів помилки символної синхронізації когерентної системи цифрового зв'язку з модуляцією QPSK/Ю.М.Бойко І.С. Пятін //Науковий журнал Зв'язок.– 2019.– №6.– С.12-18.

4. Пятін І.С. Дослідження синхронізації цифрових систем зв'язку / І. С. Пятін, І.Ю. Кукал // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016 – №5 – С. 175-183.
5. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. (2021) Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_4
6. Пятін І.С. Передача управляючої інформації у системах широкосмугових телекомунікацій технології 5G /Ю. Бойко, І. Пятін, Л. Карпова І. Пархомей, // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління», 2021 – №1 (38). – С. 82-95. DOI://doi.org/10.20535/1560-8956.38.2021.233200
7. J. Boiko, O. Eromenko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Quality Assessment of Synchronization Devices in Telecommunication," in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019. <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783438>.
8. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. DOI: [10.25046/aj050242](https://doi.org/10.25046/aj050242).
9. Parkhomey I., Boiko J., Tsopa N., Zeniv I., Eromenko O. Assessment of quality indicators of the automatic control system influence of accident interference / I. Parkhomey, J. Boiko, N. Tsopa, I. Zeniv, O. Eromenko // Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control). – 2020. - Vol. 18, No. 4. - pp. 2070-2079.
10. Boiko J. Synthesis and analysis of information-control systems of synchronization of means of telecommunications / J. Boiko // Adaptive systems of automatic control. – 2017. - No 1(30). - pp. 8-28. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.30.2017.117700>.
11. Zhurakovskiy B., Boiko J., Druzhynin V., Zeniv I., Eromenko O. Increasing the efficiency of information transmission in communication channels / B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2020. - Vol. 19, No. 3. - pp. 1306-1315.
12. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko Farrow Interpolator Features in QPSK Telecommunication Devices // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET - 2020) Lviv-Slavske, Ukraine February 25-29, 2020 DOI: [10.1109/TCSET49122.2020.235410](https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235410)
13. I. Pyatin, J. Boiko and O. Eromenko, "Design and Simulation of Synchronization Systems in Telecommunications with QPSK," 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 98-103, doi: [10.1109/ATIT50783.2020.9349354](https://doi.org/10.1109/ATIT50783.2020.9349354).
14. Бойко Ю. М. Підвищення завадостійкості блоків оброблення сигналів засобів телекомунікацій на основі модифікованих схем синхронізації / Ю. М. Бойко // Вісник

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2015. – Вип. 61. – С. 91-107. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2015_61_11.

References

1. Piatin I.S. Systema zviazku z QPSK moduliatsiieiu i synkhronizatsiieiu nesuchoi /I.S. Piatin, V.V. Mishan, O.O. Kukharets // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2019. - №5. - S. 211-217
2. Pyatin I. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation /J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, I. Parkhomey// Adaptive systems of automatic control, 2019 – №1 (34). – С. 5-15.
3. Piatin I.S. Porivnialnyi analiz detektoriv pomylyky symvolnoi synkhronizatsii koherentnoi systemy tsyfrovoho zviazku z moduliatsiieiu QPSK /J.M. Boiko I.S. Piatin //Naukovyi zhurnal Zviazok.– 2019. – №6.– S.12-18.
4. Piatin I.S. Doslidzhennia synkhronizatsii tsyfrovyykh system zviazku / I.S. Piatin, I.Iu. Kukul // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2016 – №5 – S. 175-183.
5. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. (2021) Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_4
6. Piatin I.S. Peredacha upravliaiuchoi informatsii u systemakh shyrokosmuhovykh telekomunikatsii tekhnologii 5G /Iu. Boiko, I. Piatin, L. Karpova I. Parkhomei, // Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia», 2021 – №1 (38). – S. 82-95. DOI://doi.org/10.20535/1560-8956.38.2021.233200
7. J. Boiko, O. Eromenko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Quality Assessment of Synchronization Devices in Telecommunication," in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019. <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783438>.
8. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. DOI: [10.25046/aj050242](https://doi.org/10.25046/aj050242).
9. Parkhomey I., Boiko J., Tsopa N., Zeniv I., Eromenko O. Assessment of quality indicators of the automatic control system influence of accident interference / I. Parkhomey, J. Boiko, N. Tsopa, I. Zeniv, O. Eromenko // Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control). – 2020. - Vol. 18, No. 4. - pp. 2070-2079.
10. Boiko J. Synthesis and analysis of information-control systems of synchronization of means of telecommunications / J. Boiko // Interdepartmental scientific technical journal «Adaptive systems of automatic control» 2017. – № 1 (30). – P. 8-28. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.30.2017.117700>

11. Zhurakovskiy B., Boiko J., Druzhynin V., Zeniv I., Eromenko O. Increasing the efficiency of information transmission in communication channels / B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2020. - Vol. 19, No. 3. - pp. 1306-1315.

12. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko Farrow Interpolator Features in QPSK Telecommunication Devices // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET - 2020) Lviv-Slavske, Ukraine February 25-29, 2020 DOI: [10.1109/TCSET49122.2020.235410](https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235410)

13. I. Pyatin, J. Boiko and O. Eromenko, "Design and Simulation of Synchronization Systems in Telecommunications with QPSK," 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 98-103, doi: [10.1109/ATIT50783.2020.9349354](https://doi.org/10.1109/ATIT50783.2020.9349354).

14. Boiko J. M. Pidvyshchennia zavadostiikosti blokiv obroblennia syhnaliv zasobiv telekomunikatsii na osnovi modyfikovanykh skhem synkhronizatsii / J. M. Boiko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya : Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia. – 2015. – Vyp. 61. – S. 91-107. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2015_61_11.

Надійшла / Paper received : заповнюється редакцією

Надрукована/Printed : заповнюється редакцією

ДОВІДКА № 11/26-1

Затверджує те, що стаття «**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ПОЧАТКОВОГО ДОСТУПУ ДО МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ ПРЯТОГО ПОКОЛІННЯ**» авторів **ПЯТІН І.С.** (Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка») та **МАКАРИШКІН Д.А., МІШАН В. В., ШПІРУК М.С.** (Хмельницький національний університет) – прийнята до опублікування у науковому журналі "Вісник Хмельницького національного університету" № 5 за 2021 р., серія "Технічні науки", який включено до наукометричних баз (Index Copernicus, Google Scholar) та затверджений як фахове видання Постановою президії ВАК України від 28.12.2019 № 1643

Начальник відділу
інтелектуальної власності та трансферу технологій,
відповідальний секретар Вісника ХНУ



Ю. В. Кравчик

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 13%

ID: 98091 Назва: Магістерська кваліфікаційна робота Додано в БД: 2021-12-06 Автора: Шпірук М.С. Керівники: Макаришкін Д.А. Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	105737	748	999 (1%)	12 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми



Ім'я користувача:
Кафедра АКІПІТК

ID перевірки:
1009534881

Дата перевірки:
06.12.2021 09:48:44 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet

Дата звіту:
06.12.2021 10:08:31 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: Шпирук-антиплагіат

Кількість сторінок: 83 Кількість слів: 14906 Кількість символів: 114175 Розмір файлу: 4.07 MB ID файлу: 1009496519

2.62%
Схожість

Найбільша схожість: 0.62% з Інтернет-джерелом (<http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/9738/1/%D0%A4%D>).

2.62% Джерела з Інтернету

259

Сторінка 85

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0%
Вилучень

Немає вилучених джерел

ВІДГУК

на дипломну роботу магістра Шпірука М.С.

«Моделювання процедури пошуку комірки стільникової мережі 5G»

Актуальність дипломної роботи обумовлена потребами покращення якості синхронізації мобільного пристрою з сигналами базової станції.

В роботі проведено аналіз системи зв'язку п'ятого покоління, проаналізована архітектура базових станцій. Виконано моделювання процедури пошуку комірки базової станції в середовищі Матлаб.

Перший розділ присвячений визначенню систем зв'язку 5G. Абоненти систем зв'язку мають потребу в надійному бездротовому підключенні, а також в доступі до широкого кола сучасних мультимедійних додатків. Це вимагає перспективних напрацювань для забезпечення потрібної швидкості передачі даних для надання послуг високої якості. Повсюдно доступне бездротове покриття, яке надає необхідну якість обслуговування, стало початковим завданням при розробці систем 5G. Системи зв'язку 5G мають перспективну архітектуру систем бездротового доступу, засновану на використанні різноманітних малих комірок і призначену для задоволення нових вимог по ємності і якості покриття мережі.

Другий розділ присвячений дослідженню будови базових станцій цифрових систем зв'язку. Основними компонентами теми зв'язку 5G є: абонентське обладнання, мережі радіодоступу (RAN), включаючи системи управління, та ядра мережі (5GC), включаючи системи організації спільної роботи. Збільшені функціональні вимоги до пропускної спроможності, затримок і щільності підключення. Якщо раніше базова станція складалася з радіомодуля, який відповідає за прийом і передачу даних, і базового блоку, в якому відбувається обробка даних, то в новій архітектурі функціонал радіомодуля розширився, а функціонал базового блоку поділено на два блоки – розподілений та центральний.

Третій розділ присвячений дослідженню принципів виявлення та ідентифікації базових станцій. В останні десятиліття відбувається інтенсивний розвиток технологій стільникових систем зв'язку, пов'язаний з необхідністю підвищення швидкості передачі даних і наданням користувачам нових сервісів високої якості. Стандарт п'ятого покоління стільникового зв'язку (5G) має велику гнучкість і варіативність в плані використовуваних значень несучої, ширини смуги і параметрів переданого сигналу. Мала довжина пакета обумовлює низьку затримку при передачі сигналу. Основні можливі галузі застосування - зв'язок між машинними пристроями, управління безпілотними транспортними засобами, інтернет речей.

Четвертий розділ присвячений моделюванню процедури пошуку комірки базової станції. Часове зміщення для самої сильної кореляції послідовності PSS може використовуватися для синхронізації форми сигналу в часі. Синхронізація піку кореляції PSS використовується для синхронізації форми сигналу і демодуляції OFDM.

Результати дипломної роботи магістра опубліковані у науковому журналі «Вісник Хмельницького національного університету».

Дипломна робота магістра виконана на високому науково-технічному рівні і заслуговує оцінку «добре», а Шпірук М.С. – присвоєння кваліфікації магістра з спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка».

Канд. техн. наук, доц.



Макаришкін Д.А.

Рецензія опонента

на дипломну роботу магістра Шпірука М.С. за темою:
«Моделювання процедури пошуку комірки стільникової мережі 5G»

Абоненти систем зв'язку мають потребу в надійному бездротовому підключенні, а також в доступі до широкого кола сучасних мультимедійних додатків. Це вимагає перспективних напрацювань для забезпечення потрібної швидкості передачі даних для надання послуг високої якості, тому тема роботи актуальна.

Наукова новизна полягає у дослідженні процедури пошуку комірки базової станції системи зв'язку п'ятого покоління при різних відношеннях сигнал-шум.

Перший розділ присвячений визначенню параметрів радіоканалу в системах мобільного зв'язку. Системи зв'язку 5G мають перспективну архітектуру систем бездротового доступу, засновану на використанні різноманітних малих комірок і призначену для задоволення нових вимог по ємності і якості покриття мережі.

Другий розділ присвячений дослідженню будови базових станцій цифрових систем зв'язку. Основними компонентами теми зв'язку 5G є: абонентське обладнання, мережі радіодоступу, включаючи системи управління, та ядро мережі. Підвищені функціональні вимоги до пропускної спроможності, затримок і щільності підключення. Якщо раніше базова станція складалася з радіомодуля для приймання і передачі даних, і базового блоку, в якому відбувається обробка даних, то в новій архітектурі радіомодуль розширився, а базовий блок поділено на два блоки – розподілений та центральний.

Третій розділ присвячений дослідженню принципів виявлення та ідентифікації базових станцій. Широкопasmові системи третього і четвертого покоління орієнтовані на пакетну передачу даних, що дозволило надати абонентам високошвидкісний Інтернет, відеоконференції, мобільне телебачення, тощо. Стандарт п'ятого покоління стільникового зв'язку (5G) має більшу гнучкість і варіативність в плані використовуваних значень несучої, ширини смуги і параметрів переданого сигналу. Основні можливі галузі застосування - зв'язок між машинними пристроями, управління безпілотними транспортними засобами, інтернет речей.

Четвертий розділ присвячений моделюванню процедури пошуку комірки базової

станції. Часове зміщення для самої сильної кореляції послідовності PSS може використовуватися для синхронізації форми сигналу в часі. Потім точна оцінка зміщення частоти може бути обчислена шляхом виконання кореляції між циклічним префіксом кожного символу OFDM в SSB і відповідними корисними частинами символів OFDM. Фаза цієї кореляції пропорційна зміщенню частоти сигналу. Для початкового доступу до системи зв'язку п'ятого покоління, обладнання користувача виконує операції пошуку і вибору комірки базової станції для отримання початкової системної інформації. Спочатку виконується синхронізація фреймів, ідентифікація стільникової мережі та декодування головного інформаційного блоку.

За змістом робота є закінченою, викладення матеріалу послідовне і логічне. Наведені у роботі формули, моделі та висновки мають достатнє обґрунтування та пояснення. Мова викладення роботи є технічно грамотною та зрозумілою.

Серед недоліків роботи можна відмітити недостатньо розгорнутий аналіз сигналів, що використовуються для надання початкового доступу до мережі.

В цілому, магістерська робота виконана на сучасному науково-технічному рівні і заслуговує оцінку «добре», а Шпірук М.С. – присвоєння кваліфікації магістра з спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка».

Професор кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій, д.т.н., проф.



Бойко Ю.М.

Завідувачу кафедри

АКІТ
«Інформатика» РР

здобувача вищої освіти (студента
ПІБ, факультет, «курс», «група»)

М.С. Шнірчук, зр. ІРМ-20-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1.12.2021

дата


підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ ПО КАФЕДРИ АКІТ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Модифікація процедури пошуку комірки елікс-

Автор: Николаєв Мережецький Юрійчук М.С.

Спеціальність: Телекомунікації та радіотехніки

Освітня програма: _____

Науковий керівник: Макаришин Д.А.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	Вірно
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

03.12.2021

Дата

09.12.2021

Макаришин Д.А.

Підписи

Мергичиш В.В.