

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Освітній рівень Магістерський
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

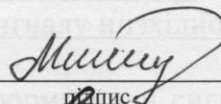
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Моделювання фізичного низхідного каналу для мобільного зв'язку п'ятого покоління

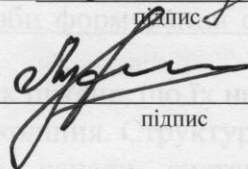
ДРТР.20069.01.04.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-20-1



В.О. Михальчук
Ініціали, прізвище


Керівник: канд. військ. наук, доц.



В.І. Лужанський
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.



В.В. Мартинюк
Ініціали, прізвище

5 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

А.Ф. Мартинюк **АКТ**
« 2 » вересня 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Михальчук Вадим Олегович

1 Тема роботи: Моделювання фізичного низхідного каналу для мобільного зв'язку п'ятого покоління

керівник роботи Лужанський Віктор Ігорович, к.в.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 моделі фізичного низхідного каналу зв'язку, дослідження енергетичної ефективності передачі сигналу.

Об'єкт дослідження: процес формування сигналу низхідної лінії у цифрових системах зв'язку п'ятого покоління.

Предмет дослідження: методи та засоби формування сигналу і якість його передачі низхідною лінією зв'язку.

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

Особливості систем зв'язку п'ятого покоління. Структура сигналів фізичного низхідного каналу зв'язку. Фізичні канали системи зв'язку п'ятого покоління. Дослідження передачі сигналів фізичним низхідним спільним каналом зв'язку.

Завдання отримав
Науковий керівник

Михальчук В.О.
Лужанський В.І.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Особливості систем зв'язку п'ятого покоління.....	9
1.1 Сегменти транспортної мережі.....	9
1.2 Транспортні сегменти останньої мілі.....	11
1.3 Передача трафіку між базовими станціями.....	13
1.4 Переваги мереж зв'язку п'ятого покоління.....	15
1.5 Стратегії перепроєктування транспортних мереж на 5G.....	18
1.6 Створення транспортної програмно-керованої мережі.....	22
Висновки до першого розділу.....	25
2 Структура сигналів фізичного низхідного каналу зв'язку.....	26
2.1 Інфраструктура мереж стандарту 5G.....	26
2.2 Еволюція мобільного зв'язку 5G міліметрового діапазону.....	27
2.3 Нумерологія 5G і структура фрейму.....	28
2.4 Структура фізичного каналу низхідної лінії зв'язку 5G.....	30
2.5 Структура опорного сигналу демодуляції.....	32
2.6 Структура опорного сигналу відстеження фази.....	37
2.7 Фазовий шум.....	41
Висновки до другого розділу.....	46
3 Фізичні канали системи зв'язку п'ятого покоління.....	47
3.1 Передача інформації управління низхідним каналом.....	47
3.2 Планування фізичного низхідного каналу зв'язку.....	48
3.3 Планування фізичного висхідного каналу зв'язку.....	49
3.4 Дані низхідного каналу в 5G NR.....	50
3.5 Канал довільного доступу.....	53
Висновки до третього розділу.....	65
4 Дослідження передачі сигналів фізичним низхідним спільним каналом зв'язку.....	66
4.1 Передача сигналів у системах зв'язку п'ятого покоління.....	66

	5
4.2 Модель фізичного рівня обладнання користувача.....	70
4.3 Передача символів у системі зв'язку п'ятого покоління.....	72
4.4 Модель фазового шуму.....	80
Висновки до четвертого розділу.....	84
Висновки.....	85
Перелік джерел посилання.....	86
Додаток А. Презентація.....	88
Додаток Б. Апробація роботи.....	

ВСТУП

Актуальність теми. З вдосконаленням мобільних засобів телекомунікацій підвищується швидкість передачі інформації, якість зв'язку, зменшується затримка, з'являються нові функції. Зв'язок п'ятого покоління 5G будується на основі стандарту LTE Advanced Pro, який являє собою еволюцію LTE Advanced і підтримує передачу даних на швидкостях до 3 Гбіт/с і дозволяє використовувати для передачі даних ліцензований і неліцензований спектр LTE. Щоб мати можливість передавати дані через мережу радіодоступу 5G, дані та інформація організовані в декілька каналів.

Організуючи дані за різними каналами, система зв'язку 5G здатна впорядковано управляти передачею даних, і система може розуміти, які дані надходять, і, отже, може обробляти їх необхідним чином.

Існує багато різних типів даних, які необхідно передавати: дані користувача, а також керуючу інформацію для керування лінією радіозв'язку, а також для забезпечення синхронізації, доступу, тощо. Всі ці функції дуже важливі і вимагають передачі даних через мережу радіодоступу.

Підтримуються два стеки протоколів: площина користувача та площина управління, вони використовують еталонну модель OSI.

Щоб згрупувати дані, які мають бути надіслані через мережу радіодоступу 5G NR, дані організовані логічним чином. Оскільки для дати, що надсилається каналом радіозв'язку, існує багато різних функцій, вони повинні бути чітко позначені і мати певні позиції і формати.

Щоб це сталося, використовується кілька різних форм каналу даних. Канали вищого рівня «відображаються» або містяться в інших до тих пір, поки, нарешті, фізично канал не будуть містити дані з каналів вищого рівня.

Логічні канали поділяються на канали управління та канали трафіку. Канали управління використовуються для передачі даних з площині управління. Канали трафіку використовуються для передачі даних у площині користувача.

Транспортний канал – це мультиплексування логічних даних, що передаються фізичним рівнем та його каналами через радіоінтерфейс.

Фізичні канали найбільш близькі до фактичної передачі даних через мережу радіодоступу радіочастотного сигналу 5G. Вони використовуються для передачі даних по радіоінтерфейсу.

Використання міліметрових хвиль - один з основних чинників, що забезпечують виконання вимог до продуктивності 5G. Це дозволяє створити системи з високою пропускнуою спроможністю і швидкістю даних, однак, системи зв'язку 5G мають недоліки, пов'язані з тим, що несучі частоти можуть значно перевищувати 6 ГГц і збільшуватися до 300 ГГц. Наприклад, є проблеми такі як втрати сигналу при поширенні і сильний фазовий шум (ФШ). ФШ можна розглядати у двох випадках: загальна фазова помилка (CPE) і завади між несучими (ICI).

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є дослідження моделі фізичного низхідного каналу зв'язку, дослідження енергетичної ефективності передачі сигналу. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- провести огляд фізичних каналів, що використовуються у мобільному зв'язку п'ятого покоління;
- розглянути і дослідити вплив відношення сигнал-шум на кількість бітових помилок низхідної лінії зв'язку;
- дослідити модель низхідної лінії зв'язку і оцінити вплив умов розповсюдження сигналу на наявність помилок.

Об'єкт дослідження – процес формування сигналу низхідної лінії у цифрових системах зв'язку п'ятого покоління.

Предмет дослідження – методи та засоби формування сигналу і якість його передачі низхідною лінією зв'язку.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених наукових завдань використовується математичний апарат теорії цифрової обробки сигналів, передачі та приймання сигналів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше проведена оцінка енергетичної ефективності передачі сигналів низхідною лінією зв'язку з різними видами модуляції.
2. Набув подальшого розвитку метод оцінки каналу і аналізу сигналів у складі низхідної лінії зв'язку.

Практичне значення одержаних результатів:

Перед виділенням символів широкоповного каналу відбувається демодуляція символів OFDM, оцінка каналу і вирівнювання середньоквадратичної помилки, що дозволяє підвищити точність виділення символів фізичного широкоповного каналу.

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 ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Сегменти транспортної мережі

Міжнародна організація 3GPP (3 Generation Partnership Project) виділяє наступні сценарії застосування технології 5G / IMT2020 (5th Generation International Mobile Telecommunications - 2020):

- надширокосмуговий мобільний доступ (Enhanced Mobile Broadband - eMBB);
- наднадійні з'єднання з низькими затримками (Ultra-Reliable Low Latency Communication - URLLC);
- масові міжмашинні з'єднання (Massive Machine Type Communication - mMTC).

Архітектура 5G складається з трьох частин: мережі радіодоступу, транспортної мережі та опорної мережі. Кожна з цих складових - окремий напрямок розробки і цілий стек технологій різних рівнів. Існуюча версія стандарту містить загальний опис абонентських і базових станцій, радіоінтерфейсів і протоколів, архітектури мережі радіодоступу, однак вона практично не зачіпає побудови транспортної мережі. У той же час необхідна пропускна здатність, затримки і інфраструктурна доступність багато в чому визначаються саме цим компонентом.

Найбільш важливою транспортною технологією вважається стандарт OTN (Optical Transport Network - OTN), нерозривно пов'язаний с технологією спектрального ущільнення DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), а також мережа Ethernet (TSN Ethernet, Flex Ethernet, 25G Ethernet) [3].

Архітектура транспортної мережі поділяється на три транспортних сегмента: Fronthaul, Middlehaul, Backhaul, що в першому наближенні схоже з рівнем доступу, сегментом міської мережі (метро) і магістральним ділянкою традиційної мережі зв'язку (рис. 1.1).

Особливий інтерес для виробників транспортного устаткування являє Fronthaul, що зв'язує віддалені радіомодулі RRU (Remote Radio Unit) і розподілені модулі DU (Distributed Unit), як правило, оптичною волоконною мережею. Виділення цього сегмента характерно саме для п'ятого покоління і пояснюється тенденцією до централізованої радіообробки.

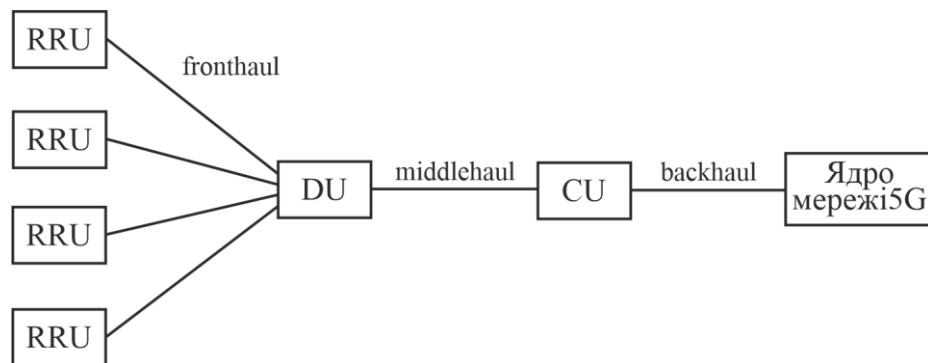


Рисунок 1.1 – Структура транспортної мережі 5G

Максимально близько до абонента, в макро- і мікростільниках, прості модулі RRU виконують первинні перетворення фізичного рівня. Більш складні алгоритми в реальному часі і не в реальному часі виконуються ближче до ядра мережі - в компонентах базової станції gNB, DU і CU (Centralized Unit). Найбільш суворі вимоги до смуги пропускання і затримок пред'являються саме на Fronthaul.

Сегмент, що зв'язує DU- і CU-компоненти базової станції, утворює Middlehaul, який може бути реалізований на обладнанні каналного і мережевого рівнів (L2 / L3). Вимоги тут менш жорсткі, ніж між DU і RRU, оскільки на відміну від DU, де має місце обробка даних реального часу, в центральному модулі CU реалізовані тільки офлайн-алгоритми.

Транспортне устаткування для Backhaul об'єднує стільники між собою і доставляє їх трафік до ядра мережі. Найбільш перспективною технологією Backhaul однозначно залишається стек DWDM / OTN, що забезпечує максимальну пропускну здатність і надійність з'єднань.

1.2 Транспортні сегменти останньої мілі

У мережах 4G радіомодуль (RRU) об'єднується з антеною і розміщується на вершині радіощогли. Базова станція в підставі радіощогли з'єднується з радіомодулем. Їх взаємодія забезпечується за протоколами CPRI або eCPRI (Common Public Radio Protocol, eCPRI - модифікація CPRI з підтримкою пакетної передачі).

У 5G використовується централізована архітектура C-RAN (Centralized Radio Access Network). Трафік CPRI / eCPRI може передаватися на відстань до 20 км від RRU до централізованого DU, а значить, вимоги до затримки в транспортному обладнанні стають більш жорсткішими. При цьому ускладнення радіотехнологій (агрегація смуг, технологія просторового мультиплексування massive MIMO, тощо) крім мінімальної затримки вимагає жорсткої синхронізації частоти і фази, а також великої смуги пропускання на ділянці Fronthaul.

При побудові архітектури сегмента Fronthaul на фізичному рівні (L0) можна виділити декілька груп рішень:

- Point-to-Point (P2P) (виділені «темні» волокна);
- WDM в активному або пасивному виконанні;
- PON (Passive Optical Network) в різних модифікаціях;
- бездротовий доступ (MicroWave).

На рівні L1 / L2 вибір, як правило, стоїть між пакетної технологією Ethernet, що підходить для будь-якого варіанту реалізації L0, і технологією оптичного транспорту OTN (Optical Transport Network).

Стандартні Ethernet-комутатори не можуть застосовуватися в мережах 5G, оскільки їм властива залежність затримки від навантаження, а абсолютне значення може виявитися порівняним з вимогою на всю мережу нового покоління. Крім того, при перевантаженні мережі технологія допускає втрату пакетів. Істотними недоліками Ethernet-обладнання в порівнянні з OTN, крім

варіації затримок, є відсутність вбудованих механізмів контролю та моніторингу на рівні лінійного тракту, ненульова ймовірність втрати пакетів і відсутність алгоритму корекції помилок.

OTN, навпаки, забезпечує стандартизовані процедури контролю та моніторингу, виправлення помилок FEC (Forward Error Correction), можливість організації захисних з'єднань, процедури мультиплексування в високошвидкісні потоки з фіксованою затримкою на рівні одиниць-десятків мікросекунд. При цьому протокол оптичного транспорту не має властивості гнучкості в порівнянні з Ethernet.

Виробники апаратного забезпечення Ethernet і OTN намагаються модернізувати обладнання та протоколи, підтримуючи сильні сторони конкуруючої технології з тим, щоб зайняти нішу транспорту для Fronthaul. Так, замість класичного Ethernet пропонується використовувати протоколи групи стандартів TSN Ethernet (Time Sensitive Network) і Carrier Ethernet (Ethernet операторського класу), які розширюють можливості Ethernet. Зокрема, гарантується виконання вимог по затримці даного сервісного потоку при його передачі по пакетній сервісній мережі, допускається агрегація потоків, вбудовуються процедури контролю та моніторингу на рівні кадру. З іншого боку, OTN оптимізується в бік зменшення службового навантаження для більш ефективного використання смуги - окремі заголовки OTN можуть бути відкинуті для Fronthaul-сценарію через спрощену архітектуру, порівняно з магістральною мережею.

Реалізація того чи іншого протоколу визначається, в першу чергу, призначенням для користувача сценарієм 5G, а також може залежати від існуючої інфраструктури оператора. OTN і Ethernet можуть використовуватися разом з найбільш ефективною технологією фізичного рівня WDM.

У числі технологій фізичного рівня був згаданий і так званий активний прозорий WDM. Це рішення на стику рівнів L0 / L1 дозволяє відійти від застосування транспортного протоколу в класичному розумінні і

використовувати більш простий спосіб упаковки CPRI / eCPRI-клієнтів. На відміну від більш дорогих транспондерів з OTN-фреймером, які формують лінійний сигнал, «прозорі транспортні блоки» можуть включати клієнтський сигнал в кадр з фіксованою бітовою швидкістю, але без складної ієрархії заголовків. Вбудований в блок транспондера, або окремий оптичний мультиплексор дозволить ефективно використовувати волокно в порівнянні, наприклад, з point-to-point-рішенням, де окремими волокнами з'єднуються порти RRU з відповідними портами DU. Незважаючи на відсутність OTN-заголовків, «активний WDM» передбачає механізми моніторингу та контролю: моніторинг каналу / лінії, індикацію відмов і аварійних станів у поєднанні з мінімальною затримкою. На таких транспортних модулях можуть бути організовані топологія «кільце» і захисні з'єднання. Відзначимо також, що застосування підходу «активний WDM» дозволяє агрегувати трафік декількох RRU без необхідності установки дорогих модулів з великим енергоспоживанням і вимагають охолодження.

1.3 Передача трафіку між базовими станціями

Сегмент Backhaul об'єднує трафік базових станцій і транспортує його до ядра мережі. Якщо вибір транспортної технології для Fronthaul - неоднозначне завдання, де необхідно враховувати багато факторів, то для Backhaul-сегмента тільки стек DWDM / OTN може забезпечити необхідну пропускну спроможність в поєднанні з надійністю з'єднань, керованістю і масштабованістю. З урахуванням інтерфейсів DU і CU важливо, щоб магістральне обладнання було обладнано клієнтськими інтерфейсами 10GE, 25GE, 100GE. Ефективне використання ресурсів забезпечується лінійними швидкостями 100, 200, 400 Гбіт / с в поєднанні з високорівневими форматами і можливістю програмної перебудови. Устаткування провідних виробників на

сьогоднішній день задовольняє вимогам, що пред'являються до інтерфейсів і швидкостей передачі.

Якщо в перших комерційних проектах по впровадженню 5G оператори не планують модернізувати Backhaul-інфраструктуру в припущенні, що мережа, побудована з урахуванням зростання трафіку 4G, витримає навантаження від невеликої кількості абонентів 5G, то вихід другої фази стандарту може змінити ситуацію. Модернізація Backhaul може знадобитися операторам при введенні 16-го релізу IMT-2020 / 5G і буде пов'язана з жорсткою вимогою до затримки в одному з призначених для користувача сценарії 5G URLLC: сумарна двостороння затримка (Round Trip Time - RTT) не повинна перевищувати 1 мс на всю мережу .

На сьогоднішній день типовими значеннями затримок в DWDM вважаються одиниці-десятки наносекунд для обладнання рівня L0 і одиниці-десятки мікросекунд для транспондерів і крос-конекту OTN на рівні L1. Фреймери, спеціалізовані мережеві мікросхеми, які використовуються в OTN-блоках, забезпечують істотно меншу затримку в порівнянні з Ethernet / IP (L2 / L3), де вона досягає одиниць і десятків мілісекунд і варіюється в залежності від завантаження.

На відміну від архітектури Fronthaul з найбільш поширеною топологією «точка-точка» або «точка - багатоточка» між DU і RRU, Backhaul- це мережі зі складною топологією. Для розподілу ресурсів мережі і маршрутизації необхідно передбачити механізми комутації трафіку. Для цього у вузлах мережі повинна підтримуватися OTN крос комутація (на рівні L1), або оптична комутація в мультиплексорах ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Amplifier). Одночасно на рівні площини управління повинен бути реалізований стек протоколів гнучкого управління мережевими ресурсами GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching).

Основне поняття в GMPLS - так званий LSP (Label Switch Path), маршрут, що формується послідовністю мережевих елементів, що підтримують комутацію, і їх з'єднань, які використовуються для

встановлення наскрізного з'єднання між джерелом і приймачем. Для встановлення оптичного маршруту GMPLS використовує специфічні протоколи сигналізації, за їх допомогою здійснюються обмін інформацією.

Транспортна інфраструктура - це частина комплексної системи оператора, де всі модулі повинні вбудовуватися в систему управління. Розглядають дві технології: SDN та організація мережевих шарів, слайсинг.

SDN забезпечує програмованість і автоматизацію для забезпечення гнучкості та надання ресурсу за запитом. Слайсинг лежить в основі ідеології 5G і організовує логічні наскрізні з'єднання разом з фізичною інфраструктурою за допомогою поділу її ресурсів під потреби різних бізнес-сценаріїв з різними вимогами до встановлюваного з'єднання.

Відзначимо, що більшість виробників тільки підходять до створення програмованих оптичних мереж. На сьогоднішній день комерційні SDN / DWDM-рішення на мережах операторів відсутні, не кажучи про реалізацію слайсинга. Але практично всі провідні виробники телекомунікаційного обладнання складаються в організаціях і альянсах з розробки стандартів і рекомендацій, які дозволять перейти до програмованих відкритих систем.

Очевидно, що модернізація обладнання під мережі 5G / IMT2020 неминуча, оскільки формуються специфічні вимоги до транспорту. У зв'язку з цим, важливо в існуючий часовий проміжок між фазами 3GPP-стандартизації спільно з операторами остаточно сформулювати вимоги до програмно-апаратного комплексу для всіх можливих сценаріїв, а виробникам при необхідності доопрацювати існуючі лінійки транспортного устаткування.

1.4 Переваги мереж зв'язку п'ятого покоління

Чотири головні проблеми, з якими стикаються оператори зв'язку: збільшення обсягу трафіку і числа підключень, відсутність зростання доходів, підвищення операційних і капітальних витрат.

Нові сервіси ставлять перед провайдерами і споживачами послуг безпрецедентні завдання і відкривають небувалі можливості. В епоху розквіту 5G і хмарних технологій, яка характеризується широким впровадженням Інтернету речей, цифровий трансформацією всіх галузей і міграцією сервісів в хмарні технології, будуть постійно з'являтися сотні мільйонів нових з'єднань між користувачами і підприємствами. Це, в свою чергу, викличе більш ніж 10-кратне зростання пропускної спроможності і посилить вимоги до обслуговування. Оператори зв'язку отримають величезні бізнес-можливості, але вкрай важливо, щоб створювані ними транспортні мережі могли задовольняти потреби в сервісах майбутнього.

5G + хмарні технології + Іштучний інтелект + екосистема, яка прискорює модернізацію широкого спектру підприємств і секторів (рис. 1.2)

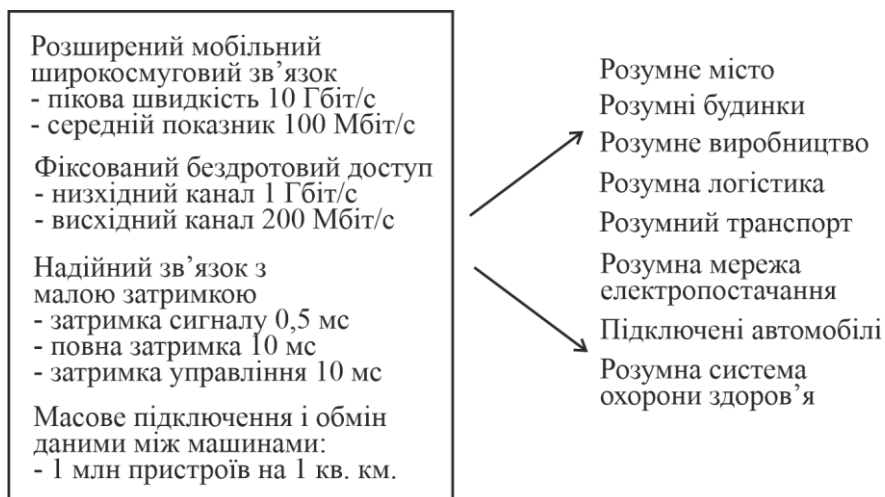


Рисунок 1.2 – Шляхи розвитку мобільного зв'язку п'ятого покоління

Взаємодія споживачів з мережами 5G і надання нових сервісів підвищують вимоги до якості. Споживачі мобільного зв'язку: розвиток технологій 5G, Інтернету транспортних засобів (IoV) і промислового Інтернету. Більше 20% трафіку мереж зв'язку нового покоління припадає на сервіси доповненої і віртуальної реальності з низькою затримкою. З розвитком технологій відеоспостереження і інтелектуального розпізнавання

зображень, буде генеруватися 5-10% загального мережевого трафіку. Перехід від мереж 4G до мереж 5G висуває нові вимоги для операторів, які прагнуть підтримувати і підвищувати якість обслуговування клієнтів, особливо в сценаріях з низькою затримкою, таких як дистанційне керування навігацією, для якого час затримки не повинно перевищувати 3 мс.

Для підприємств технології 5G і хмарні сервіси дуже поширяться. Будуть створюватись інноваційні бізнес-моделі, що дають імпульс розвитку корпоративних центрів обробки даних, зокрема регіональних і периферійних центрів оброблення даних. Інтеграція і конвергенція між центрами обробки даних і транспортними мережами забезпечують відкритість і інтелектуальність транспортних мереж. Підприємства потребують угод про рівень обслуговування з більш жорсткими умовами, щоб вибудовувати надійні і безпечні приватні мережі для з'єднання філій і клієнтів.

Потокове відео в рамках домашньої мережі розвивається в напрямку формату UHD (цифрове відео високої чіткості), миттєвої взаємодії, інтерактивної відповіді і сприйняття в реальному часі. Комерційне впровадження технології WiFi стимулює зростання не тільки пропускної спроможності до рівня в кілька гігабіт, а й кількості підключених домашніх пристроїв (смартфонів, планшетів, ПК, інтернету речей).

Епоха розвитку 5G і хмарних технологій передбачає, що хмарні обчислення, великі дані і штучний інтелект будуть інтегруватися з метою інтелектуальної модернізації підприємств і галузей. 5G UPF (функція площині користувача) і хмарні технології зміщують обробку даних від центрів до периферії, тим самим мінімізуючи час затримки. Це вкрай важливо для промислових підприємств, які передбачають обробку в режимі реального часу, і для чутливих до часу критично важливих систем.

Число мережевих елементів буде швидко рости, що ускладнить процеси експлуатації та технічного обслуговування.

Доступ до мереж 5G та фіксованого широкосмугового зв'язку значно збільшить число бездротових базових станцій, мережевих елементів базової

мережі та прикладних з'єднань. В рамках різних сценаріїв використовуються індивідуальні угоди про рівень обслуговування. Це породжує нові складності в сфері експлуатації та технічного обслуговування транспортної мережі. Згідно зі статистикою операторів, середня частка щорічних операційних витрат в телекомунікаційній галузі з 2010 по 2019 роки перевищувала 70%, що стало величезною проблемою в плані витрат на експлуатацію і технічне обслуговування.

1.5 Стратегії перепроєктування транспортних мереж на 5G

Між тим, що може запропонувати 4G, і тим, що потрібно для 5G і хмарних технологій з точки зору ємності, складності топології і захисту оптоволоконних каналів, існує технологічний розрив, що виріс за останнє десятиліття в зв'язку з виправленнями і модернізацією станцій. Операторам зв'язку необхідно впровадити на всіх етапах життєвого циклу стратегії, що діють на випередження. Це дозволить підвищити якість роботи мережі, її масштабованість і стійкість, спростити структуру, процеси експлуатації і технічного обслуговування.

Побудова мережі без перевантажень. Відсутність перевантажень повинно бути основною метою при проектуванні транспортної мережі. Чим більше перевантажена мережа, тим нижче якість обслуговування клієнтів. Наприклад, на затримки відеосервісів Cloud VR (віртуальна реальність на основі хмарних технологій) негативно вплине збільшення мережевого трафіку при різних швидкостях передачі. Операторам потрібна мережа без перевантажень, щоб забезпечувати високу надійність, низьку затримку і широке підключення для нових галузей. Також мережа без перевантажень стає конкурентною перевагою при укладанні угод про рівень обслуговування з підприємствами та промисловими компаніями. Для вирішення проблеми перевантаження необхідно замінити якомога більше каналів міліметрового

діапазону на IP-мережу і оптимізувати існуючі шляхи IP-трафіку за допомогою оптоволоконних з'єднань.

Впровадження масштабованої архітектури. До 2023 року зростання глобального трафіку може перевищити 35% в зв'язку з поширенням автоматично генерованого медіаконтенту у високій роздільній здатності, потокового відео високої чіткості, промислових сценаріїв використання відео, віртуальної і доповненої реальності. Тому, щоб захистити вкладені кошти, транспортна мережа повинна бути здатна безперешкодно розширювати смугу пропускання в рамках однієї і тієї ж платформи, одночасно підвищуючи інтенсивність передачі трафіку. Вимоги угод про рівень обслуговування для нових підприємств і додатків ставлять серйозні завдання по забезпеченню гнучкості транспортних мереж.

Спрощення архітектури протоколу IP. В даний час в сучасних мережах IP і MPLS (Multiprotocol label switching – протокол для прискорення і формування потоків мережевого трафіку) існує занадто багато типів протоколів IP, шлях площині контролю складний, а можливості масштабування мереж обмежені. Крім того, гарантована смуга пропускання і балансування навантаження не підтримуються належним чином через відсутність централізованого управління. Це робить практично неможливим обслуговування зростаючих робочих навантажень і колосальної кількості пристроїв, які почнуть підключатися в майбутньому. Сегментна маршрутизація - критично важлива технологія, яка спрощує протоколи маршрутизації і будову маршрутизатора, а також знижує складність процесів експлуатації та технічного обслуговування.

Вимоги до низької затримки мають на увазі не тільки спрощення архітектури, а й точний контроль показника затримки в протоколі маршрутизації. Для сприяння сервісним інноваціям транспортна мережа повинна підтримувати гнучку настройку сервісів, сегментування і настройку мереж на основі хмарних технологій. Мітки IP / MPLS на маршрутизаторі збільшуються пропорційно квадрату числа вузлів.

Архітектура транспортної мережі 5G має чотири рівня. Гармонізація частот, забезпечення покриття оптоволокна, доступності ширини смуги частот і захисту слід виконувати в комплексі. Транспортна мережа 5G повинна мати такі рівні:

- Централізоване управління / контролер / аналізатор: штучний інтелект, заснований на програмно керованій мережі і повному циклі технічного обслуговування.

- Конвергентна IP-мережа: спрощений IP-протокол, включений протокол E2E SRv6 / Metro з архітектурою Spine-Leaf, глобальна мережа і хмарний сервіс.

- Уніфікована оптична транспортна мережа: мережевий рівень OTN із захистом ASON для оптимізації побітової вартості.

- Оптоволоконна мережа з повним спектром сервісів: уніфікована оптоволоконна мережа для всіх сервісів, включаючи FTTH (домашню оптоволоконну мережу) 5G.

Ключові показники архітектури (КПА): модель індексної цільової мережі. Оцінка цільової мережевої архітектури включає 5 категорій з 17 індексами: відсутність перевантажень, масштабованість, простота, безперебійна робота, інтелектуальність - які охоплюють всі рівні транспортної мережі (фізичний рівень оптичного кабелю, рівень IP-протоколу, обладнання DWDM, а також рівень управління / контролера / аналізатора). Модель визначає фундаментальні мережеві чинники як константи, які в довгостроковій перспективі впливають на якість і продуктивність мережі, а також відфільтровує короткострокові фактори, пов'язані зі зміною устрою (мережеві змінні) з метою оптимізації стандартних операцій.

Модель КПА визначає якість і вартість транспортної мережі, полегшуючи її побудову і управління нею. Досконала мережева архітектура може забезпечити кількісні цільові показники якості обслуговування і забезпечити достатню пропускну здатність, але при цьому залишатися

масштабованою протягом наступних 3-7 років, що в кінцевому підсумку допоможе скоротити сукупну вартість використання. В даний час ключові якості / показники результативності (якості і ефективності мережі / ключові показники ефективності), такі як смуга пропускання, затримка, невеликі спотворення сигналу, не забезпечують розуміння базових чинників, тобто якості і ефективності мережі (інфраструктури оптоволоконної мережі, топології, технології і можливості експлуатації). Якість і ефективність мережі / ключові показники ефективності - це дійсно мікропоказники на рівні каналу зв'язку, але вони не дають глибокого розуміння всієї транспортної мережі. КПА аналізує якість і ефективність мережі / ключові показники ефективності в рамках кількісної методології для оцінки високої якості обслуговування, надійності і можливостей самовідновлення транспортних мереж.

КПА можна використовувати для точної кількісної оцінки, управління і контролю на всіх стадіях розгортання мережі, таких як планування, проектування, побудова та експлуатація, як приведено на рис. 1.3.

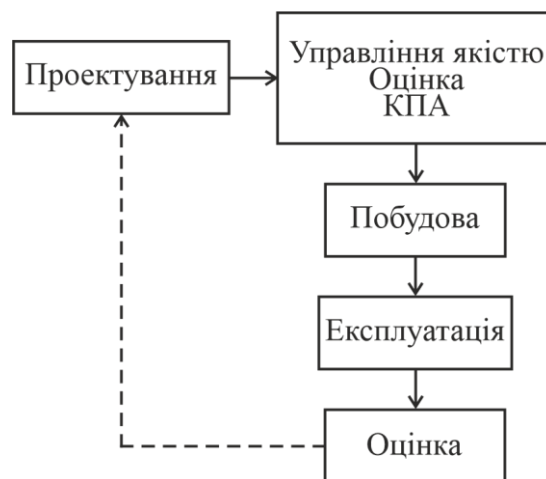


Рисунок 1.3 – Управління і контроль на всіх стадіях розгортання мережі

Стандартизація: КПА будується шляхом аналізу якості та ефективності мережі (пропозицій операторів). Аналізуючи якість та ефективність мережі, або ключові показники ефективності з запропонованих операторами послуг,

нормалізуючи фактори, відкидаючи фактори, що легко змінюються, можна розділити відносно фіксовані та фундаментальні/базові фактори (мережеві константи), що визначають рівень якості мережі, на п'ять категорій. Далі ці п'ять категорій розкладаються на 17 складових, що мають індекси, що вимірюються.

Цифровізація: кількісний аналіз КПА як показників для оцінки повного життєвого циклу. Потім кожен індекс розбивається на складові, вимірювані показники (наприклад: коефіцієнт оптоволоконного зв'язку у коефіцієнт доступу радіовузлів до оптоволоконного зв'язку), так що індекс може бути кількісно визначений об'єктивним і справжнім способом.

Оцінка та зважування: встановлення критеріїв для загальної оцінки можливостей. Можна встановлювати ваги індексів залежно від важливості показників. Приклад: найбільш важливою є взаємодія з користувачами, що має більшу вагу для відсутності перевантажень, далі – прогрес у розробках (простота, масштабованість, захист) та зручність для внутрішнього технічного обслуговування (інтелектуальність). Оцінка кожного індексу ґрунтується на цільовому призначенні транспортної мережі, присвоєному на основі її вимог до обслуговування та передових практик. Нарешті можна розробити загальну оцінку для транспортної мережі. Чим вище оцінка, тим більше можливостей та вища ефективність у рамках вимог мереж 5G та хмарних технологій.

1.6 Створення транспортної програмно-керованої мережі

У рамках модернізації транспортної мережі, необхідно ухвалити рішення побудувати абсолютно нову транспортну мережу поряд із застарілою мережею, замість того, щоб проводити типові поетапні поступові оновлення. Сформувані ключові цілі, що стоять за рішенням модернізації:

- Відсутність ризиків або впливу на існуючі послуги

- Відсутність послуги – необхідно зберегти угоди про рівень обслуговування для забезпечення високої доступності. Наприклад – вибрати інкрементне оновлення існуючої мережі, наприклад, оновлення апаратного та програмного забезпечення, зміну конфігурації з LDP (протоколу розподілу міток) на сегментну маршрутизацію, зміну з сервісу VPLS (віртуальної приватної мережі) на EVФШ (розширена віртуальна приватна мережа), тощо, це незмінно призводило б до перебоїв у роботі мережі та періодичних простоїв. Якщо побудувати повністю нову мережу, вона зможе надавати в цій новій мережі нові послуги, і при цьому буде достатній запас часу, щоб планувати та мігрувати існуючі послуги поступово, схема за схемою, забезпечуючи мінімальний вплив на їх виконання.

Реалізація всього потенціалу програмно-керованої мережі: у випадку вибору оновлення на базі існуючої мережі, це буде тривати від 3 до 5 років, і протягом цього часу будуть встановлені мережеві елементи з підтримкою програмно-керованої мережі, але застарілі елементи не можна інтегрувати у систему контролера програмно-керованої мережі. Такий гібридний результат не дозволяє скористатися економічними та експлуатаційними перевагами програмно-керованої мережі. Натомість, створивши нову мережу, є можливість із самого початку використовувати нові технології та протоколи, такі як сегментна маршрутизація, EVФШ (розширена віртуальна приватна мережа), TI-LFA (незалежна від топології петльова альтернатива), RSVP (протокол елементів розрахунку шляху), щоб повною мірою використовувати гармонізацію частот та автоматизацію програмно-керованої мережі. Можна підвищити гнучкість мережі за допомогою автоматизації та гармонізації частот та запропонувати дуже конкурентоспроможну послугу з динамічним виділенням смуги пропускання.

Оптимізація побітових витрат та сукупна вартість володіння: після переговорів з постачальниками та їх порівняльного аналізу у процесі закупівель можна трохи знизити витрати. Однак більш ефективні та довгострокові можливості скорочення витрат пов'язані з використанням

оптимізованої масштабованої архітектури. Наприклад, у існуючій застарілій транспортній мережі є сайти з трьома окремими і спільно розташованими маршрутизаторами: перший маршрутизатор - це пристрій NPE (мережевий провайдер Edge) з CEN (фіксованою мережею Ethernet оператора), друга група виступає як PE (провайдер Edge) пристрою для магістралі IP, третьою групою є вузол агрегації для мобільної мережі Ethernet оператора CEN. Вирішивши побудувати абсолютно нову мережу, можна виконати більш цілісне планування та об'єднати ці групи маршрутизаторів в одну. Це могло б принести пряму економію на рівні 66% без урахування інших переваг, таких як проектування трафіку на основі програмно-керованої мережі, яке дозволило набагато ефективніше використовувати мережеві ресурси, що також понизило побітову вартість.

Безперервна робота. Транспортна мережа має чудову оцінку у категорії «Безперебійна робота» КПА. Це пов'язано з тим, що є можливість розгорнути систему ASON (автоматично комутованої оптичної мережі) 1+1+PR (безперервне відновлення) на рівні OTN (оптичної транспортної мережі) та TI-LFA (незалежна від топології петльова альтернатива) технології на рівні IP, яка гарантує здатність мережі витримувати багаторазові збої оптоволоконного зв'язку, оскільки кожне перепідключення займає до 50 мс.

Простота. Запровадження нових протоколів сегментної маршрутизації та EVФШ (розширена віртуальна приватна мережа), які надають оператору можливість організації трафіку та покращують захист. Застосування топології Spine-Leaf у своїй мережі Metro. Це чудова топологія з погляду масштабованості та доступності. інтегруція L3 переадресації, що забезпечує її готовність до роботи в розподіленому хмарному ядрі.

Інтелектуальність. Нова мережа включає рівень програмно-керованої мережі з ієрархічною архітектурою: один головний контролер і кілька контролерів домену. Також включені функції автоматизації повного циклу обслуговування – надання служб, планування, візуалізація, моделювання та прогнозування.

Відсутність навантажень. Нова мережа використовує інтерфейс 100GE, а пропускна спроможність обладнання складає 4 Тбіт/с. Її пропускна здатність у 20 разів більша порівняно з традиційною мережею, яка використовує в основному 10GE для магістральних ліній та має максимальну пропускну здатність лише 200 Гбіт/с/слот. Надвисока пропускна здатність та комутаційна ємність виключають перевантаження транспортної мережі.

Масштабованість. Впровадження найсучаснішої системи: 96 каналів по 200 Гбіт/с як оптичну систему у своїй магістральній мережі.

Висновки до першого розділу

1. Архітектура 5G складається з трьох частин: мережі радіодоступу, транспортної мережі та опорної мережі.
2. Транспортна інфраструктура - це частина комплексної системи оператора, де всі модулі повинні вбудовуватися в систему управління.
3. Епоха розвитку 5G і хмарних технологій передбачає, що хмарні обчислення, великі дані і штучний інтелект будуть інтегруватися з метою інтелектуальної модернізації підприємств і галузей.

2 СТРУКТУРА СИГНАЛІВ ФІЗИЧНОГО НИЗХІДНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Інфраструктура мереж стандарту 5G

Світ швидко наближається до практичної реалізації стандарту 5G, можливості якого значно перевершують можливості 4G. Вже у першому випуску стандарту 5G New Radio (NR) – релізі 15, опублікованому у грудні 2017 р., було сформульовано специфікацію фізичного рівня. Очікується, що 5G, 4G і Wi-Fi будуть співіснувати на тих самих несучих і використовувати неліцензовані діапазони для збільшення пропускної здатності на частотах нижче 6 ГГц. Також вже запущено сегменти мережі міліметрового діапазону.

На даний момент вже доступні рішення, що дозволяють проводити випробування як абонентських пристроїв, так і базових станцій – доступні складні тести ВЧ-трактів з імітацією антени в режимі МІМО. Зокрема, для характеристики якості приймально-передавальних вузлів у режимі non-signaling, можна використовувати рішення, що охоплює весь діапазон потенційних сигналів-кандидатів нового формату зв'язку 5G до 110 ГГц, побудоване на базі широкосмугового аналізатора сигналів UXA N9041B, осцилографа DSOS809A N5183B. Як ПЗ використовується VSA 89601B і САІР SystemVue.

N9041B UXA із зовнішнім виходом ПЧ – Знижений рівень шумів та паразитних складових – Є ідеальним як для тестування модульованих сигналів, так і спектральної маски випромінювання (SEM) Зовнішнє оцифрування – Осцилограф зі смугою пропускання 8, 33, 65 ГГц /10А

Тестування базових станцій. Під час випробувань базової станції (БС) необхідний комплексний підхід. Він полягає у проведенні різного типу тестів: перевіряти необхідно як ВЧ-параметри приймача, так і проводити тестування навантаження, моделюючи трафік і мережеві сервіси. Рішення

Keysight охоплюють весь перелік перевірок, причому як на етапі розробки БС, так і при її промисловому виробництві.

Для тестування ВЧ-характеристик використовується рішення на базі векторного трансівера S9100A, що підтримує частотні діапазони FR1/FR2. Його основні сфери застосування: масові випробування прийомопередаючих компонентів БС та радіокомпонентів 5G NR, включаючи віддалені радіоголовки (RRH), розподілені блоки (DU), активні антенні решітки, підсилювачі, чіпсети Переваги: - зниження вартості окремого тесту - конфігурація легко масштабується від менше 6 ГГц до міліметрових хвиль - економія місця та витрат завдяки одному двонаправленому приймачеві для всіх діапазонів 24-44 ГГц - TX/RX зі смугою пропускання 1,2 ГГц з низькими EVM та ACLR для 5G NR.

Докладний аналіз продуктивності виконується для опорного сигналу демодуляції (DMRS) на основі оцінки каналу і опорного сигналу з відстеженням фази (PTRS) на основі оцінки фазового шуму (ФШ). Ми спостерігаємо вплив різних параметрів опорного сигналу в 5G для кожного алгоритму компенсації ФШ. Для цього ми використовуємо сучасну модель спектральної густини потужності (СГП) для моделювання ФШ і досліджуємо графіки коефіцієнта помилок по бітам (BER) за допомогою моделювання для каналів на основі лінії затримки (TDL) з відгалуженням у MATLAB.

2.2 Еволюція мобільного зв'язку 5G міліметрового діапазону

За останні кілька десятиліть мобільний зв'язок досягнув величезного прогресу в задоволенні зростаючих потреб суспільства і нових технологій. Починаючи з першого покоління (1G), майже кожне десятиліття розробляється і впроваджується нове покоління мобільного зв'язку в рамках проекту партнерства третього покоління (3GPP), яке в кінцевому підсумку еволюціонує в 4G / LTE (довгостроковий розвиток) [6]. Оскільки більшість

вимог 4G дотримані, 5-е покоління (5G) стало основним напрямком більшості досліджень, проведених за останні декілька років.

Технологія мобільного зв'язку 5G, також звана новим радіо (NR), стандартизується 3GPP [3]. 5G почали стандартизувати для багатьох унікальних аспектів, таких як досягнення пропускної здатності 1 Гбіт/с або вище, наднадійних зв'язок з малою затримкою (URLLC) і низьке енергоспоживання [4].

Смути частот міліметрового діапазону можуть бути показані як один з основних аспектів 5G, оскільки він розглядається як фактор, що сприяє виконанню вимог до продуктивності 5G [5]. Спектр міліметрового діапазону становить приблизно від 10 до 300 ГГц, забезпечуючи набагато більш високу пропускну здатність і швидкість передачі даних в порівнянні з системами 4G.

Стандарти 5G NR засновані на версії 15 (Rel-15) і Rel-16, наданої 3GPP, де підтримуються несучі частоти до 52,6 ГГц. 3GPP вирішила продовжити вивчення вимог для зв'язку на частотах вище 52,6-114,25 ГГц. Як і очікувалося, існують більш серйозні проблеми для більш високих частот, такі як втрати при поширенні, поглинання атмосферою і сильний фазовий шум (ФШ). Основна увага приділяється підтримці частотного діапазону (FR2) від 52,6 до 71 ГГц. Останні звіти про збільшення фазового шуму зосереджені на поліпшених схемах опорного сигналу з відстеженням фази (PTRS) для кращого придушення фазового шуму.

2.3 Нумерологія 5G і структура фрейму

Для передачі сигналів по висхідній і низхідній лініях зв'язку в 5G використовується мультиплексування з ортогональним частотним поділом і циклічним префіксом (CP-OFDM) [1]. Загальна ілюстрація структури кадру 5G NR показана на рис. 2.1 [1].

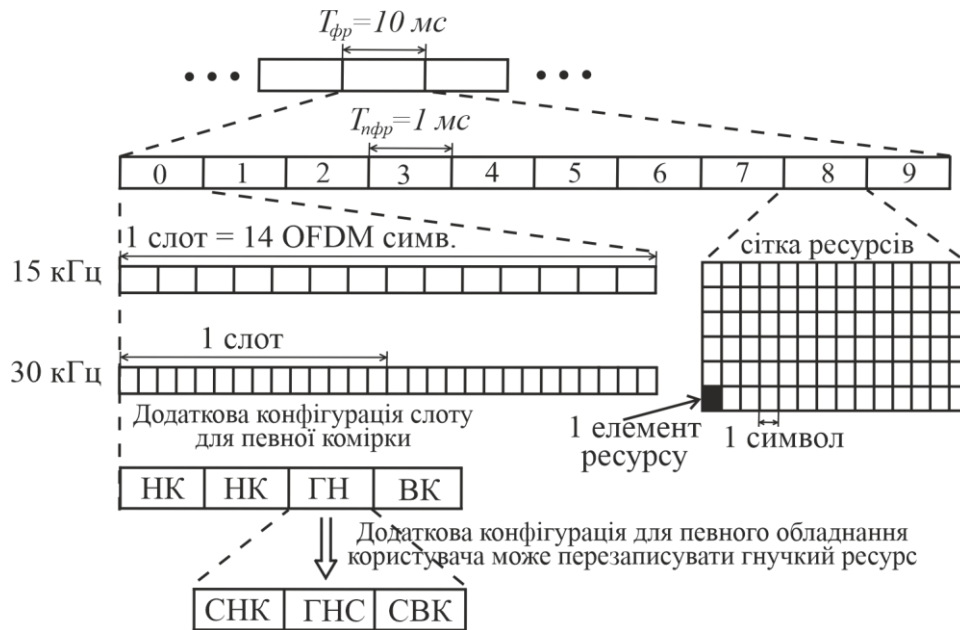


Рисунок 2.1 – Структура фрейму 5G NR

З міліметровим хвильовим діапазоном, представленим в 5G NR, підтримуються два частотні діапазони: FR1 та FR2. FR1 позначається як частота нижче 6 ГГц і відповідає частотам 450 МГц – 6 ГГц. FR2 називається міліметровим діапазоном і відповідає частотам 24 ГГц – 52,6 ГГц. Для частот вище 52,6 ГГц передбачається використання більш високих рознесень піднесучих до значень 960 кГц.

У NR вводиться гнучкий інтервал між піднесучими. Для параметра масштабування $\mu \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ рознесення піднесучих може приймати значення $2^\mu \times 15 \text{ кГц}$, де фіксоване рознесення піднесучих 15 кГц в LTE просто масштабується, а довжина циклічного префікса в LTE дорівнює 4,7 мкс і також масштабується на $2^{-\mu}$. З міліметровим діапазоном і збільшеними частотами більш високі значення рознесення піднесучих стають більш придатними для використання, тому що для більш високих частот розкид затримки каналу має тенденцію бути нижче, що підходить для скороченої довжини циклічного префікса для міжсимвольних завад (ISI). З іншого боку, фазовий шум стає набагато більш проблематичним для більш високих частот. 5G також представляє передачу «міні-слот», щоб

забезпечити зниження затримок і завад, особливо для наднадійного зв'язку з малою затримкою (URLLC). Типовим блоком для передачі 5G є слот.

Для передачі на основі слотів відповідна сітка OFDM складається з піднесучих в частотній області та 14 символів OFDM в часі. Кількість піднесучих визначається використовуваною шириною смуги і значеннями рознесення піднесучих. У сітці ресурсів кожен елемент ресурсів (RE) займає одну піднесучу по частоті і тривалість 1 символу OFDM за часом. Для схеми модуляції і кодування (MCS), аналогічної LTE, квадратурна амплітудна модуляція (QAM) порядків 16, 64 і 256 використовується разом з двійковою і квадратурною фазовою маніпуляцією (BPSK / QPSK), де QPSK в основному використовується для еталонної сигналізації. Для каналу даних і кодування в 5G використовуються сумісні по швидкості квазіциклічні коди з низькою щільністю перевірок на парність (LDPC), які відрізняються від LTE, де використовуються турбокоди.

2.4 Структура фізичного каналу низхідної лінії зв'язку 5G

Загальний фізичний канал низхідній лінії зв'язку (PDSCH) - це канал низхідної лінії зв'язку в 5G, по якому передаються призначені для користувача дані, системна інформація і інформація більш високого рівня. Призначені для користувача дані проходять обробку на фізичному рівні, де виконуються приєднання CRC, кодування LDPC, узгодження швидкості і модуляція. Процес обробки фізичного рівня PDSCH для кожного транспортного блоку показаний на рис. 2.2.

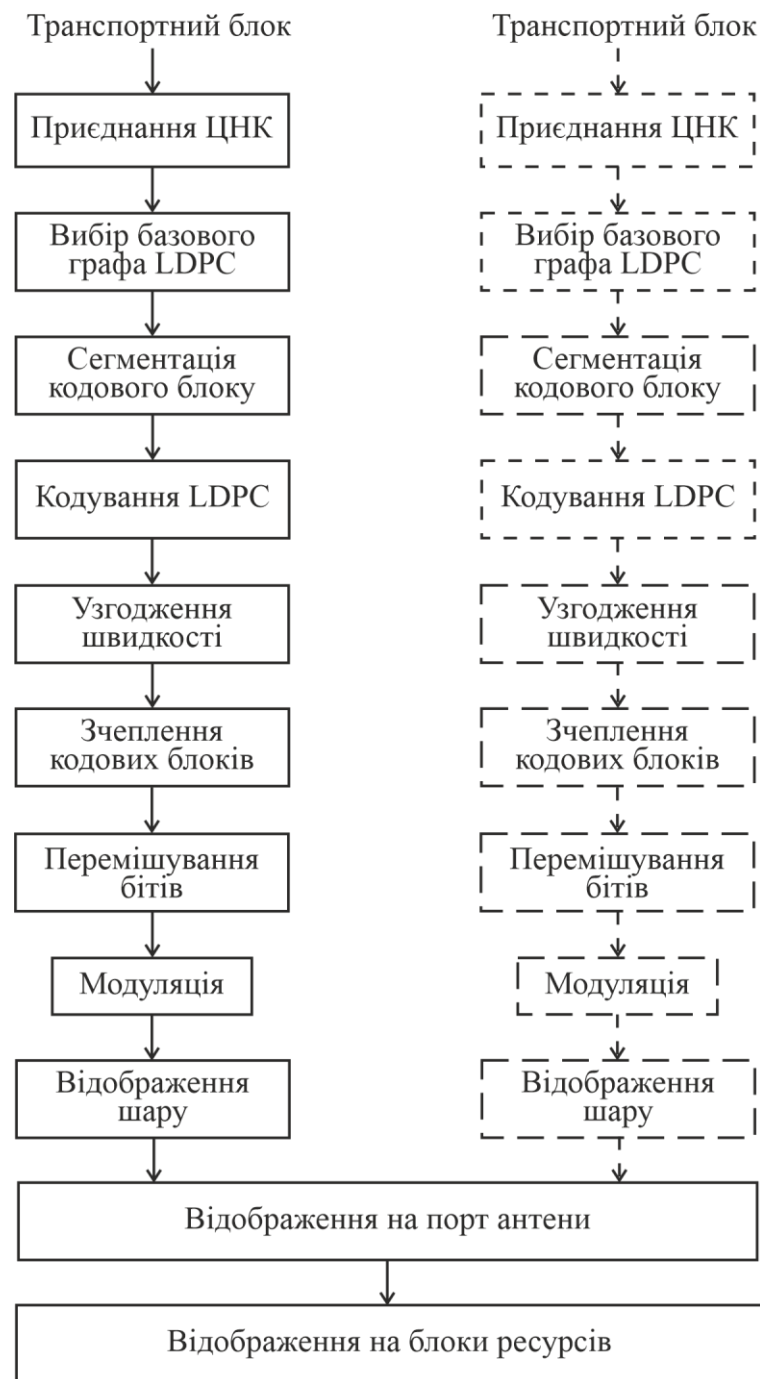


Рисунок 2.2 – Обробка фізичного низхідного каналу зв'язку 5G.

Разом з модульованим символами транспортного блоку, які несуть призначені для користувача дані і системну інформацію, в ресурсному блоці PDSCH повинні передаватися два основних опорних сигнали: DM-RS (опорний сигнал демодуляції) і PT-RS (опорний сигнал відстеження фази). DM-RS використовується для оцінки каналу між передавачем і приймачем.

Фаза гетеродина як на приймачі, так і на передавачі, відстежується за допомогою PTRS.

2.5 Структура опорного сигналу демодуляції

Опорний сигнал демодуляції (DM-RS) складається з пілотних символів, які передаються в певних ресурсних елементах і використовуються для оцінки каналу. В літературі це також називається оцінкою каналу на основі пілот-сигналу. Кількість DM-RS, використовуваних в слоті, і виділені їм елементи ресурсів визначаються параметрами конфігурації DM-RS. З огляду на ці параметри конфігурації і N_{cell}^{ID} , символи DM-RS генеруються з використанням модуляції QPSK на псевдовипадково згенерованих голд-послідовностях і поміщаються в зазначені елементи ресурсів.

Після виконання синхронізації приймач може виконати оцінку каналу на основі пілот-сигналу шляхом відновлення символів DMRS [2], оскільки значення N_{cell}^{ID} відомо, і цього достатньо для визначення псевдовипадково згенерованих символів DM-RS і їх просторово-часового розташування.

Для визначення розподілу ресурсів PDSCN DM-RS існує чотири основних параметри. Розташування DM-RS і кількість символів DM-RS в слоті визначаються відповідно до цих параметрів, як зазначено нижче:

- тип відображення: для цього параметра є два варіанти, які мають окреслити основні відображення A і B. Для типу A перша поява DM-RS відбувається на другому або третьому символі OFDM в інтервалі. З іншого боку, для типу B DMRS вставляється в найперший символ OFDM в інтервалі.

- тип конфігурації: цей параметр визначає щільність DM-RS в частотній області. Є два варіанти для цього параметра: типи конфігурації 1 і 2. Для типу 1 одна з кожних двох піднесучих використовується для передачі DM-RS, тоді як для типу 2 дві послідовні піднесучі з кожних шести піднесучих використовуються для передачі DM-RS.

- фронтальне завантаження: цей параметр визначає використання DM-RS з одним або двома символами в області часу для типу відображення A. Для DM-RS з двома символами використовуються два послідовних елемента ресурсів для DM-RS в області часу.

- додаткова позиція (N_{add}^{DMRS}): додаткова позиція DM-RS може приймати значення в $\{0, 1, 2, 3\}$ для типу конфігурації 1. Для передачі типу 1-A за замовчуванням використовується принаймні один символ OFDM для передачі DM-RS (що відповідає додатковій позиції 0). Символи DM-RS вставляються в зазначені піднесучі в символі OFDM в інтервалі для кожної додаткової позиції. За допомогою ортогональних покриваючих кодів для конкретних розподілів ресурсів, DM-RS підтримує до 12 ортогональних рівнів для зв'язку з множиною входів і множиною виходів (MIMO).

Конфігурація несучої у середовищі Matlab має наступні параметри:

NCellID=52

NSizeGrid=52

NStartGrid=0

NSlot=10

NFrame=0

SymbolPerSlot=14

SlotsPerSubframe=1

SlotsPerFrame=10

SubcarrierSpacing=15

CyclicPrefix='normal'

Об'єкт `nrCarrierConfig` встановлює параметри конфігурації несучої для конкретної нумерології OFDM. Об'єкт визначає рознесення піднесучих, ширину смуги частот і параметри зміщення від точки A, центру піднесучої 0 в загальному блоці ресурсів 0 (CRB 0). Для рознесення піднесучих 60 кГц можна вказати нормальний або розширений циклічний префікс. За замовчуванням об'єкт вказує несучу 10 МГц, що відповідає 52 ресурсним блокам (RB) і рознесенню піднесучих 15 кГц.

NCellID - Ідентифікатор комірки фізичного рівня.

SubcarrierSpacing - Разнесення піднесучих, заданий для всіх каналів і опорних сигналів несучої в кГц.

CyclicPrefix - довжина циклічного префікса. Опція 'Normal' - встановлює нормальний циклічний префікс. Це відповідає 14 символам OFDM в слоті. 'Розширений' - встановлює розширений циклічний префікс. Ця опція відповідає 12 символам OFDM в слоті. Розширена довжина циклічного префікса застосовується для рознесення піднесучих 60 кГц.

NSizeGrid – Кількість блоків ресурсів (RB) в сітці ресурсів несучої. Значення за замовчуванням 52 відповідає максимальній кількості RB несучої 10 МГц з SCS 15 кГц.

NStartGrid - початок сітки ресурсів несучої відносно CRB 0.

NSlot - номер слота.

NFrame – системний номер фрейму.

SymbolsPerSlot - кількість символів OFDM на слот, дорівнює 14 для нормального циклічного префікса і 12 для розширеного циклічного префікса.

SlotsPerSubframe - Кількість слотів на підфрейм 1 мс.

SlotsPerFrame - кількість слотів у кадрі 10 мс. Може приймати значення 10, 20, 40, 80 або 160.

Об'єкт nrPDSCHConfig встановлює параметри конфігурації фізичного низхідного загального каналу (PDSCH).

Цей об'єкт визначає всі властивості, задіяні в послідовності операцій обробки PDSCH, включаючи скремблювання, модуляцію символів, відображення рівнів, переміщення блоків віртуальних ресурсів (VRB) з блоками фізичних ресурсів (PRB) і відображення елементів ресурсів (RE) з шаблонами зарезервованих ресурсів. Об'єкт також містить властивості пов'язаних фізичних опорних сигналів, таких як опорний сигнал демодуляції (DM-RS) і опорний сигнал відстеження фази (PT-RS).

Об'єкт nrPDSCHConfig за замовчуванням конфігурує однорівневий PDSCH з типом відображення A, модуляцією QPSK з розподілом ресурсів 52

ресурсних блоків і 14 символів OFDM в слоті і односимвольних DM-RS. Ця конфігурація відповідає повному розподілу ресурсу по відношенню до об'єкта `nrCarrierConfig` за замовчуванням, як показано на рис. 2.3.

ReservedRE	[]
NID	[]
NumCodewords	1
NSizeBWP	[]
NStartBWP	[]
Modulation	'QPSK'
NumLayers	1
ReservedPRB	1x1 cell
VRBToPRBInterleaving	0
VRBBundleSize	2
DMRS	1x1 nrPDSCHDMRSConfig
PTRS	1x1 nrPDSCHPTRSConfig
MappingType	'A'
SymbolAllocation	[0,14]
PRBSet	1x31 double
RNTI	1
EnablePTRS	0

Рисунок 2.3 – Структура властивостей об'єкта `nrCarrierConfig`

Структура сітки ресурсів несучого сигналу OFDM, що займає 14 символів для нормального циклічного префікса і близько 400 піднесучих приведено на рисунку 2.4. На рисунку 2.5 наведена око-діаграми синфазної і квадратурної складових сигналу QPSK низхідного каналу зв'язку.

Розташування DM-RS в сітці ресурсів несучої частоти приведено на рисунку 2.6.

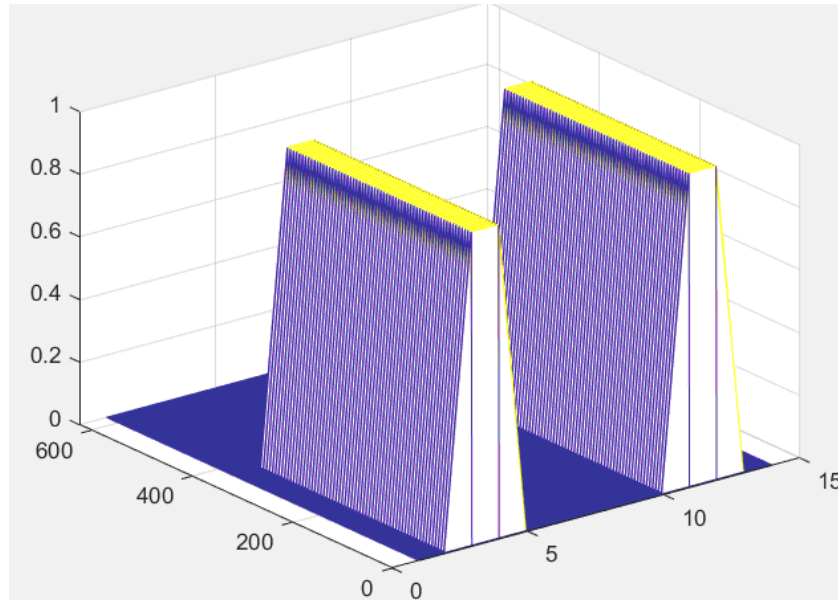


Рисунок 2.4 – Структура сітки ресурсів несучого сигналу OFDM

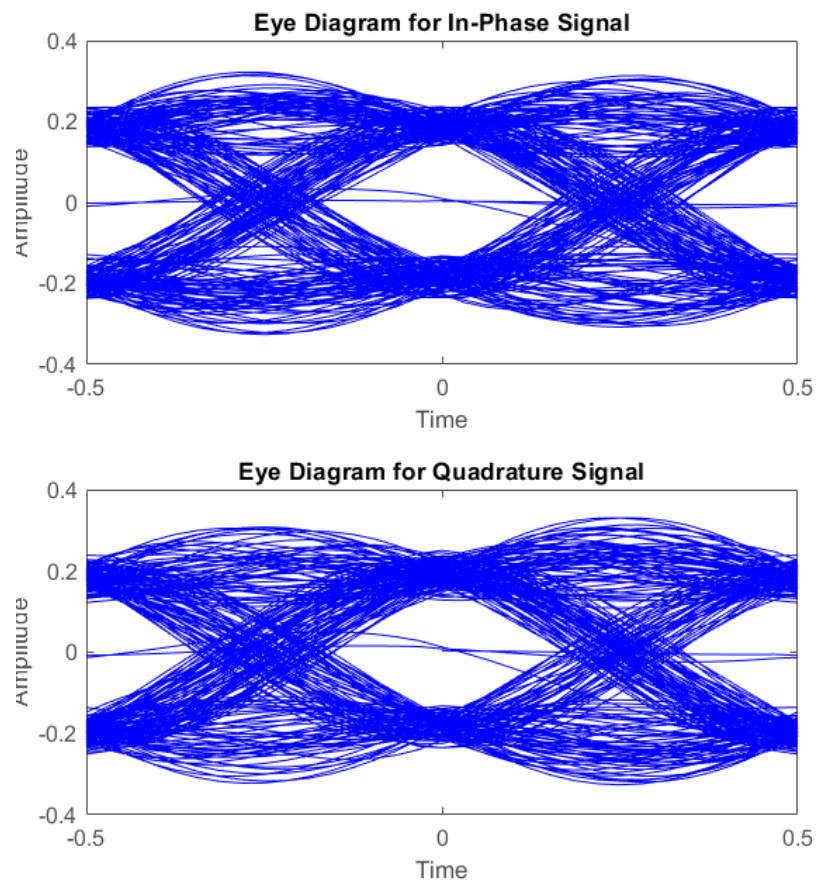


Рисунок 2.5 – Око-діаграма сигналу низхідного каналу зв'язку з модуляцією QPSK

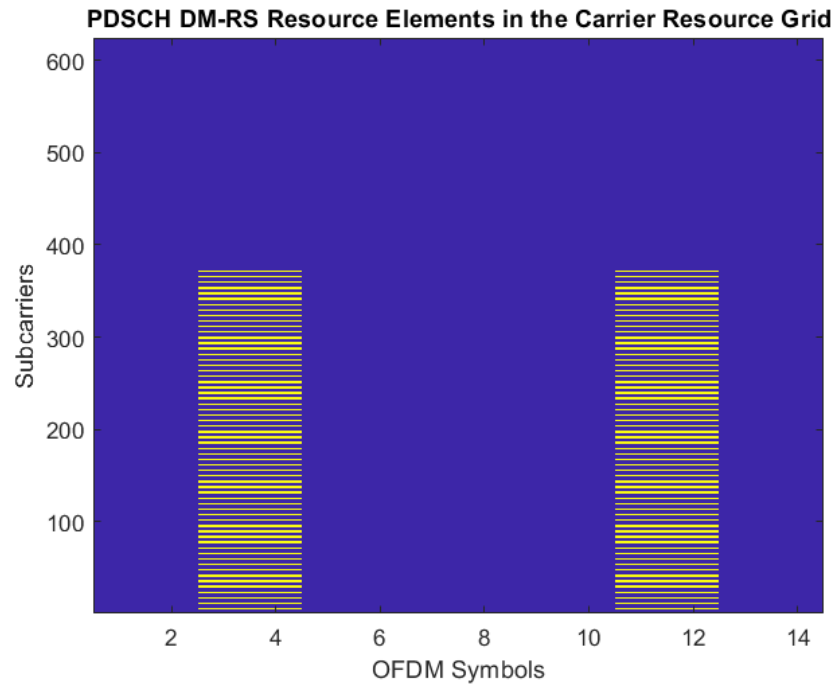


Рисунок 2.6: Розташування DM-RS в сітці ресурсів несучої.

Параметр N_{add}^{DMRS} визначає щільність DMRS в часі. При довжині слота 14 символів OFDM для передачі DMRS може бути виділено не більше 4 символів OFDM. Інші можливості конфігурації для подвійного символу і типу відображення B можна налаштувати у параметрах несучої.

2.6 Структура опорного сигналу відстеження фази

Опорний сигнал відстеження фази (PT-RS) використовується для оцінки і компенсації фазового шуму генератора для діапазонів частот вище 6 ГГц в 5G. Структура PTRS, що введена в 5G NR, призначена головним чином для компенсації CPE. Ефект CPE ідентичний для всіх піднесучих, але CPE не має значної кореляції для сусідніх символів OFDM. Отже, PT-RS має більш високу щільність в області часу в порівнянні з розподілом ресурсів в частотній області [6].

Є два основних параметри, які визначають конфігурацію PT-RS і розподіл ресурсів у сітці OFDM:

- Щільність часу d_{time}^{PTRS} : $d_{time}^{PTRS} \in \{1, 2, 4\}$ визначає щільність часу PT-RS символів в сітці OFDM. Символи PT-RS d_{time}^{PTRS} використовуються один раз для кожного символу OFDM.

- Частотна щільність d_{freq}^{PTRS} : $d_{freq}^{PTRS} \in \{2, 4\}$ визначає частотну щільність символів PTRS в сітці OFDM. Символи PT-RS d_{freq}^{PTRS} використовуються один раз в кожному ресурсних блоках (складаються з 12 піднесучих) в сітці OFDM.

Параметри конфігурації PTRS можуть бути визначені відповідно до якості генератора, частоти, рознесення піднесучих і схеми модуляції і кодування (MCS). Це основні індикатори впливу фазового шуму на зниження продуктивності. Зразкові конфігурації PTRS для різних додаткових застосувань DMRS можна визначити в параметрах несучої. Око-діаграма для опорного сигналу відстеження фази показана на рисунку 2.7.

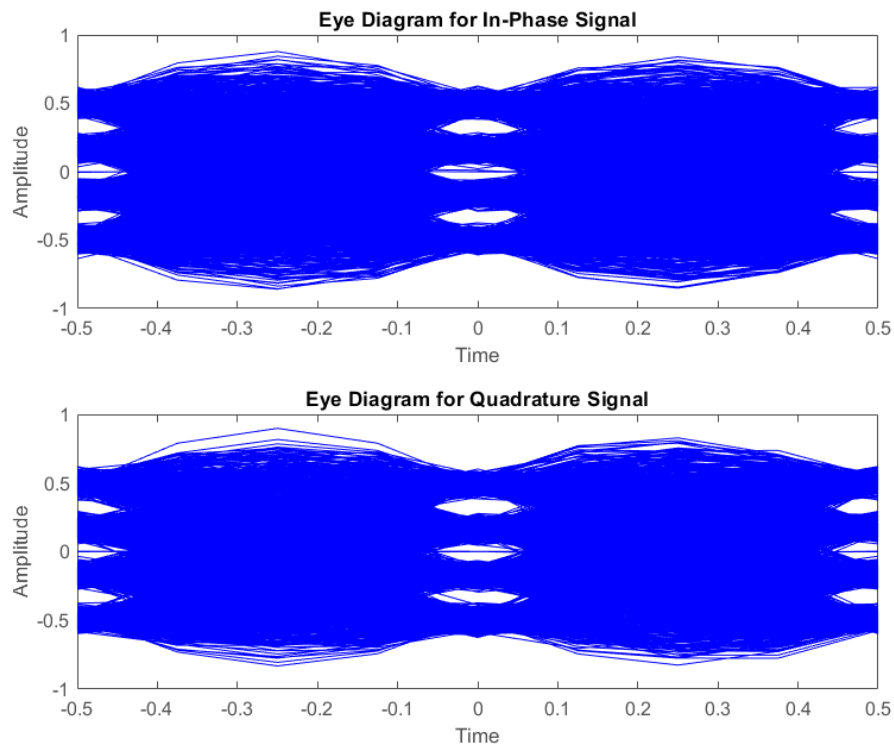


Рисунок 2.7 – . Око-діаграма для опорного сигналу відстеження фази

Діаграма сузір'я для опорного сигналу відстеження фази приведена на рисунку 2.8. Використовується модуляція 16QAM.

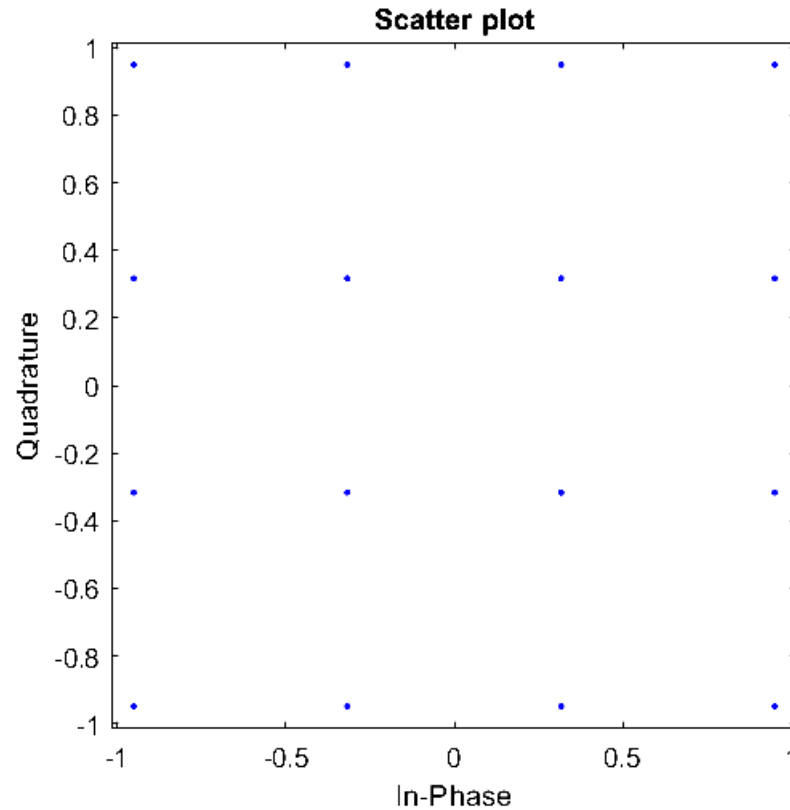


Рисунок 2.8 – Діаграма сузір'я для опорного сигналу відстеження фази

Модульований символ PT-RS для k -ої піднесучої визначається як символ DM-RS, який генерується в 10-й позиції в області часу і k -й піднесучій в частотній області. PT-RS передається тільки через один порт, який пов'язаний тільки з одним портом DMRS. Поставте у відповідність символи DM-RS з сіткою за допомогою індексів DM-RS

Поставте у відповідність індекси PDSCH, DM-RS і PT-RS RE з сіткою з масштабованими значеннями, щоб візуалізувати відповідні місця розташування в сітці. Тривімірна структура сітки несучої, що містить сигнали PDSCH, DM-RS і PT-RS приведена на рис. 2.9.

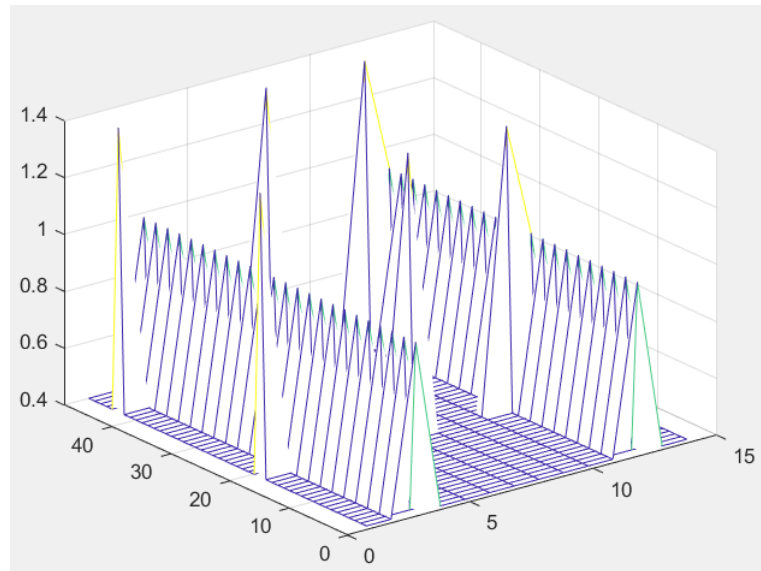


Рисунок 2.9 – Тривімірна структура сітки несучої, що містить сигнали PDSCH, DM-RS і PT-RS

Двовимірна структура сітки несучої, що містить сигнали PDSCH, DM-RS і PT-RS приведена на рис. 2.10.

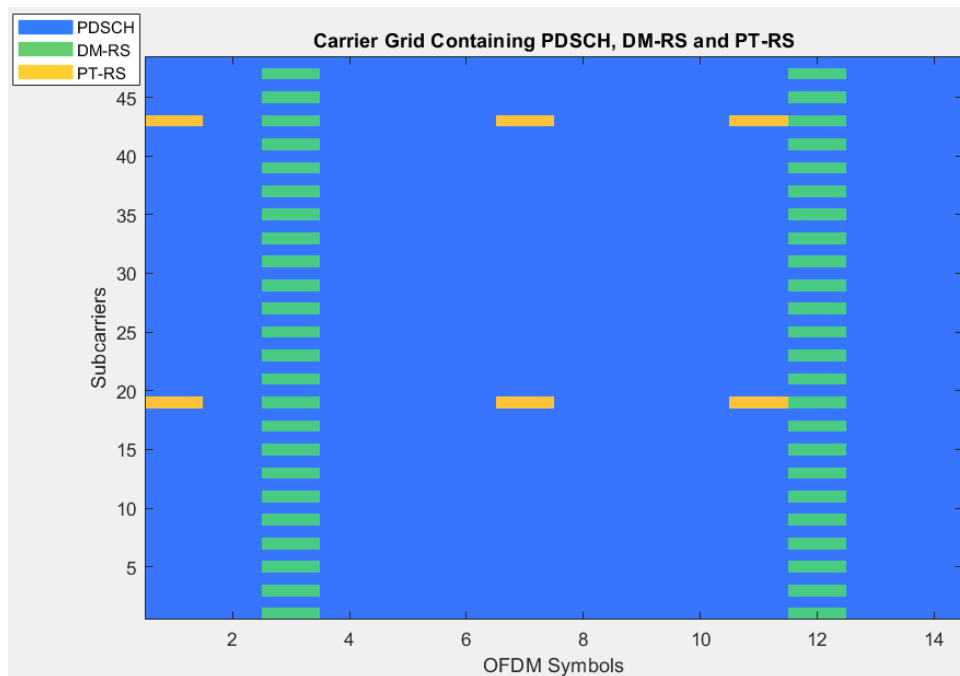


Рисунок 2.10 – Двовимірна структура сітки несучої, що містить сигнали PDSCH, DM-RS і PT-RS

2.7 Фазовий шум

У бездротовому зв'язку вплив каналу і адитивний шум на боці приймача є основними причинами, що погіршують загальну продуктивність системи. Більше того, фазовий шум через компоненти генератора може бути важливим фактором в деяких системах зв'язку. У разі 5G і mm-Wave продуктивність системи може значно погіршитися через фазовий шум, що вноситься гетеродом, особливо для більш високих несучих частот.

Вплив фазового шуму можна спостерігати в двох частинах: загальна фазова помилка (CPE) і завади між несучими (ICI). Коли ми розглядаємо сітку OFDM (частотну область) на стороні приймача, CPE є загальний поворот фази для кожної піднесучої. З іншого боку, ICI в основному складається з завад між сусідніми піднесучими, які не можна ігнорувати, особливо коли розглядаються сценарії з високою позиційністю модуляцією і схемами кодування. Опорні сигнали (DM-RS і PT-RS) використовуються для оцінки каналного і фазового шуму. Вплив параметрів опорного сигналу для DM-RS і PT-RS на продуктивність системи спостерігається спільно для різних моделей каналів. Оскільки ми працюємо з міліметровим хвильовим діапазоном, ми пропонуємо виконувати оцінку каналу як з наявним фазовим шумом, так і без нього, для символів PT-RS.

Визначимо модель системи шляхом здійснення процесу генерації фазового шуму і побудови моделі сигналу з урахуванням впливу каналного і фазового шуму. По-перше, ми пояснюємо процедуру отримання аналітичних моделей для сигналу фазового шуму в дискретному часі на основі запропонованих моделей спектральної густини потужності (PSD) фазового шуму. Потім ми представляємо найсучасніші моделі PSD, запропоновані для зв'язку в міліметровому діапазоні. Розглянемо модель сигналу OFDM разом з каналом і вплив фазового шуму на сигнал, що приймається.

В ідеальному сценарії синусоїдальний сигнал зі спектром потужності дельта-функції на несучій частоті міг би бути вироблений генератором. Однак на практиці як для передавача, так і для приймача гетеродина не ідеальні, і існує фазовий шум (ФШ), який погіршує загальні характеристики системи. Щоб дослідити цю ситуацію і пом'якшити ефекти фазового шуму, повинна існувати надійна статистична модель, щоб можна було розробити надійні алгоритми оцінки і компенсації.

У літературі в основному представлені моделі фазового шуму з дискретним часом. Використовується модель, яка передбачає, що вибірки випадкових фаз рівномірно розподілені в інтервалі $[-\pi, \pi]$. Інша можлива модель використовує випадковий процес Вінера для створення кореляції між дискретними вибірками в області часу для подання не рівного спектра.

Для представлення спектра фазового шуму (ФШ), можна знайти декілька моделей СГП ФШ, де вибірки PSD в дБн/Гц побудовані шляхом прямих вимірювань від реальних генераторів. Оскільки вплив ФШ залежить від характеристик генератора і його можна змодельовати за допомогою PSD фазового шуму генератора, це означає, що сигнал фазового шуму в дискретному часі може бути змодельований за допомогою властивостей PSD. Для представлення спектральної густини потужності ФШ, дБн/Гц використовується для фазового шуму ($\varphi(t)$) або потужності фазового вектора ($e^{j\varphi(t)}$), що відноситься до несучої частоти [2]. Можна також сказати, що використання моделей PSD замість випадкових процесів для генерації фазового шуму призводить до більш реалістичного моделювання, оскільки моделі PSD пропонуються шляхом спостереження за властивостями сучасних генераторів, особливо для міліметрових хвиль. Для даної моделі PSD ФШ аналітичний підхід до генерації сигналу фазового шуму з дискретним часом пояснюється наступним чином: Сигнал в області часу можна записати наступним чином:

$$x(t) = \operatorname{Re}\{u(t)\exp\{j(2\pi f_c t + \varphi(t))\}\} = \operatorname{Re}\{u(t)\exp j\varphi(t)\exp\{j2\pi f_c t\}\} \quad (2.1)$$

де $\varphi(t)$ - сигнал фазового шуму в області часу. Для заданої СГП фазового шуму $S_\varphi(f)$ ми генеруємо $\varphi(t)$. Нехай $w(t)$ буде білим гаусовим шумом для базової системи фільтрації, як показано на рис. 2.11:

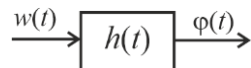


Рисунок 2.11 – Структура базової системи фільтрації

Тут $h(t)$ позначає імпульсну характеристику фільтра, а PSD WGN задається як $S_w(f) = N_0/2$ для всіх f . Звідси можна вивести наступне рівняння:

$$S_\varphi(f) = S_w(f)|H(f)|^2 \quad (2.2)$$

де $H(f)$ являє собою частотну характеристику фільтра. Просто маніпулюючи цим, $H(f)$ можна знайти за виразом

$$H(f) = \sqrt{\frac{2}{N_0}} \sqrt{S_\varphi(f)} \quad (2.3)$$

Застосування зворотного перетворення Фур'є до (2.3) дає $h(t)$ в даній системі як

$$h(t) = F^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{2}{N_0}} \sqrt{S_\varphi(f)} \right\} \quad (2.4)$$

Отже, для даної моделі СГП фазового шуму $S_\phi(f)$ і $w(t)$, що є AWGN, сигнал ФШ в області часу може бути згенерований таким чином:

$$\varphi(t) = w(t) * h(t) \quad (2.5)$$

де * позначає оператор згортки.

Існує три основні причини фазового шуму генератора: тактова частота генератора, компоненти схеми фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) і генератор, керований напругою (ГКН).

Для моделі спектральної густини потужності (СГП) фазового шуму використовується наведена нижче багатополісна/нульова модель.

$$S(f_0) = PSD \frac{\prod_{n=1}^N \left(1 + \left(\frac{f_0}{f_{z,n}} \right)^{\alpha_{z,n}} \right)}{\prod_{m=1}^M \left(1 + \left(\frac{f_0}{f_{p,m}} \right)^{\alpha_{p,m}} \right)} \quad (2.6)$$

Результуюча модель СГП фазового шуму показана на рис. 2.10.

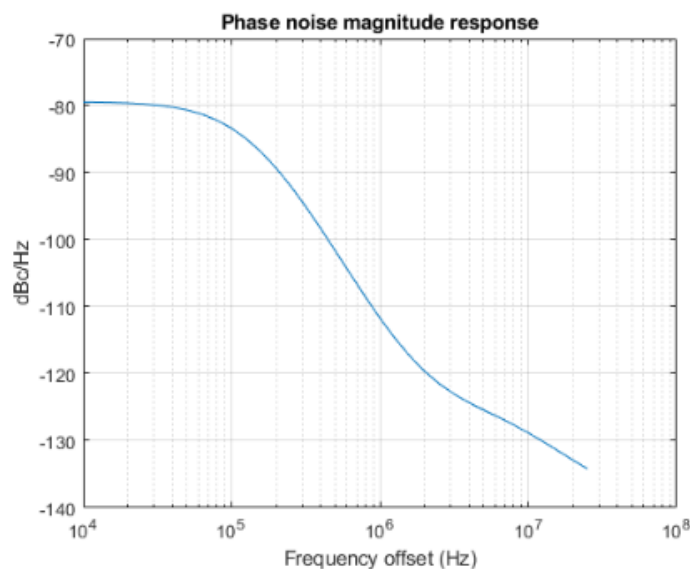


Рисунок 2.12: Модель СГП фазового шуму.

Враховуючи модель СГП, можна знайти фазовий шум в області часу.

Модель сигналу OFDM для 5G PDSCH представлена для тривалості одного символу OFDM з фазовим шумом і ефектами каналу. Передбачається, що канал не змінюється протягом одного символу OFDM. У моделі системи N піднесучих з рознесенням піднесучих Δf_{sub} використовуються в одному символі OFDM. Для смуги пропускання W частота дискретизації сигналу становить $T_s = 1/W$. Нехай X_k представляє передані символи на k -й піднесучій для $k = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$. Символ OFDM з тривалістю $T = NT_s$ секунд може бути знайдений шляхом застосування зворотного дискретного перетворення Фур'є до X_k наступним чином:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.7)$$

Нехай $\Phi = [\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{N-1}]$ - реалізація фазового шуму під час одного символу OFDM, яка може бути побудована шляхом дискретизації фазового шуму в області часу $\varphi(t)$, заданого в рівнянні (2.5), в моменти часу $t = nT_s$ для $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Включивши ефекти каналу, отриманий сигнал можна записати наступним чином:

$$r = \text{diag}(e^{j\Phi})(x \otimes h) \quad (2.8)$$

де x - сигнал OFDM, як зазначено в (2.7), h - імпульсна характеристика каналу, а \otimes позначає операцію кругової згортки. Застосовуючи ШПФ до r , отриманий сигнал в частотній області може бути заданий як

$$R = J \otimes (\text{diag}(X)H) \quad (2.9)$$

де $J_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\varphi_n} e^{\frac{-j2\pi ni}{N}}$ представляє компоненти частотної області ефекту ІСІ, а X і $H \in N \times 1$ векторів, що представляють перетворення Фур'є сигналів x і h в області часу.

Висновки до другого розділу

1. Смуги частот міліметрового діапазону можна вважати як один з основних аспектів 5G, оскільки він розглядається як фактор, що сприяє виконанню вимог до продуктивності 5G. Спектр міліметрового діапазону лежить в діапазоні від 10 до 300 ГГц, забезпечуючи набагато більш високу пропускну здатність і швидкість передачі даних в порівнянні з системами 4G.
2. Фазовий шум стає більшим для частот міліметрового діапазону, а затримка каналу стає меншою.
3. Опорний сигнал відстеження фази (PT-RS) використовується для оцінки і компенсації фазового шуму генератора для діапазонів частот вище 6 ГГц.

3 ФІЗИЧНІ КАНАЛИ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

3.1 Передача інформації управління низхідним каналом

DCI – інформація управління низхідним каналом. DCI передає таку важливу інформацію як: «ресурсний блок, який містить ваші дані» і «схему демодуляції, яку ви повинні використовувати для декодування даних» та інша додаткова інформація. Це означає, що отримувач спочатку повинен декодувати DCI. На основі цієї інформації можна декодувати реальні дані.

Канал DCI (інформація управління низхідним каналом) - це інформація керування низхідним каналом зв'язку: можуть бути визначені наступні етапи кодування, які включають мультиплексування інформаційних елементів, приєднання CRC, каналне кодування і узгодження швидкості. Канал DCI має такі функції:

- переносить керуючу інформацію, яку використовують для планування призначених для користувача даних (PDSCH або PUSCH);
- переноситься в PDCCH (фізичний канал управління низхідним каналом);
- вказує де дані для користувача (Час / частота);
- визначає схему модуляції і кодування;
- визначає аспекти, пов'язані з гібридним автоматичним запитом на повторення (HARQ) – версія надлишковості (RV), номер процесу, індикатор нових даних);
- вказує порти антени і кількість шарів;
- користувачам необхідно декодувати DCI, перш ніж вони зможуть декодувати або передавати дані.

Ланцюжок обробки DCI показаний на рис. 3.1:

- основна відмінність від LTE: використання полярного кодування;

- циклічний надлишковий код (CRC) зашифровано за RNTI.

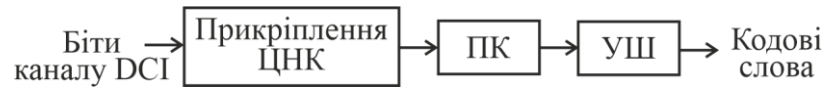


Рисунок 3.1 – Структурна схема передачі інформації управління низхідним каналом зв'язку

Послідовність операцій обробки PDCCH (фізичний канал управління низхідним каналом) приведена на рисунку 3.2.

Фізичний канал управління низхідним каналом виконує функції:

- несе інформацію управління низхідним каналом;
- модулюється за допомогою QPSK (квадратурна фазова маніпуляція).

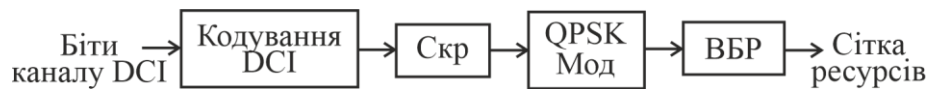


Рисунок 3.2 – Структурна схема фізичного каналу управління низхідним каналом (кодування DCI – кодування каналу управління для низхідної лінії зв'язку; Скр – скремблювання; QPSK мод – модуляція QPSK; ВБР – відображення на блоки ресурсів)

3.2 Планування фізичного низхідного каналу зв'язку

Планування - це процес розподілу ресурсів передачі даних. Планування NR диктується мережею, а обладнання користувача слідує тому, що повідомляє мережа. Що стосується фізичного рівня, існує дві категорії планування: планування у часовій області та планування у частотній області.

Структурна схема планування фізичного каналу управління низхідною лінією зв'язку приведено на рисунку 3.3.

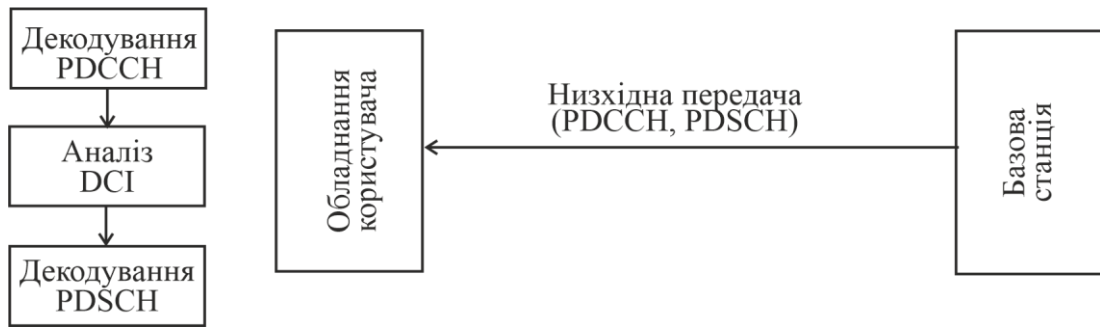


Рисунок 3.3 – Планування фізичного каналу управління низхідною лінією зв'язку

Планування має дати відповідь на запитання:

- де дані для користувача? (Час / частота)
- яка схема модуляції і кодування?
- аспекти, пов'язані з гібридним автоматичним запитом на повторення (HARQ), RV – версія надлишковості, номер процесу, індикатор нових даних;
- порти антени і кількість рівнів

3.3 Планування фізичного висхідного каналу зв'язку

DCI: планування PUSCH – фізичного спільного висхідного каналу зв'язку. Запит планування (scheduling request – SR) використовується при здійсненні запиту ресурсів UL-SCH для нової передачі.

Основна мета DCI (керуюча інформація низхідного каналу). Тобто це спеціальний набір інформації, який планує канал даних низхідної лінії зв'язку (наприклад, PDSCH) або канал даних висхідній лінії зв'язку (наприклад, PUSCH). DCI несе в собі наступну інформацію:

- розподіл ресурсів UL (постійне і непостійне);
- описи даних DL, переданих в UE.

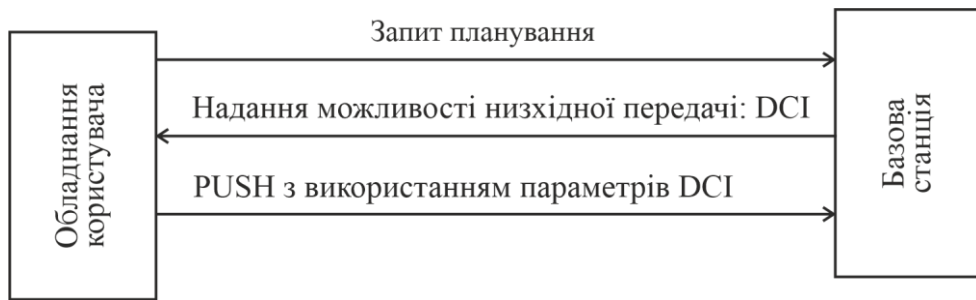


Рисунок 3.4 – Планування фізичного каналу управління висхідною лінією зв'язку

DCI містить наступну інформацію:

- де дані для користувача? (Час / частота);
- яка схема модуляції і кодування?
- аспекти, пов'язані з гібридним автоматичним запитом на повторення – HARQ (версія надлишковості – RV, номер процесу, індикатор нових даних);
- порти антени і кількість рівнів;
- попереднє кодування;
- запит CSI.

3.4 Дані низхідного каналу в 5G NR

Спільний канал низхідної лінії зв'язку (DL-SCH) виконує функції:

- переносить призначені для користувача дані;
- може також нести блок системної інформації (SIB);
- основна відмінність від LTE: використання кодування LDPC;
- підтримка до 8 рівнів, що відповідає режиму MIMO (багато входів – багато виходів);
- зіставлення з елементами каналу PDSCH.

Розглянемо низхідний спільний канал (DL-SCH), перетворення сигналів в якому наведено на рисунку 3.5.

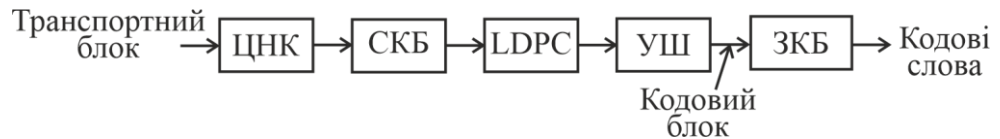


Рисунок 3.5 – Структурна схема низхідного спільного каналу зв'язку (ЦНК – циклічний надлишковий код; СКБ – сегментація кодового блоку; LDPC – кодування кодом з низькою щільністю перевірок на парність; УШ – узгодження швидкості; ЗКБ – зчеплення кодових блоків)

Особливості загального фізичного каналу низхідної лінії (PDSCH):

- широкі можливості налаштування;
- параметри налаштовуються;
- DCI (інформація управління низхідним каналом);
- RRC (Контроль радіоресурсів).

Структурна схема перетворення сигналів загального фізичного каналу низхідної лінії зв'язку приведена на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Структура загального фізичного каналу низхідної лінії зв'язку (НСК – низхідний спільний канал; Скр – скремблювання; Мод – модуляція; ВСП – відображення кодових слів на певний рівень; ПКБА – попереднє кодування для роботи з багатьма антенами; ЗР – зіставлення елементів ресурсів)

Розглянемо фізичний спільний низхідний канал зв'язку (PDSCH).
Схеми модуляції, що можуть використовуватись:

QPSK	2 біта на символ
16QAM	4 біта на символ
64QAM	6 бітів на символ
256QAM	8 бітів на символ

Попереднє кодування PDSCH для роботи з багатьма антенами:

- забезпечує формування променя і просторове мультиплексування;
- зіставляє рівні з портом антени;
- використовує матрицю попереднього кодування $W_{N_{\text{antennas}} \times N_{\text{layers}}}$;
- DM-RS повинен пройти ту ж операцію попереднього кодування.

Схематичне зображення роботи системи зв'язку з багатьма антенами приведено на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Схематичне зображення роботи з багатьма антенами (ПКБА – попереднє кодування для роботи з багатьма антенами)

Структурна схема перетворення сигналів фізичним низхідним спільним каналом (PDSCH) приведена на рисунку 3.8.

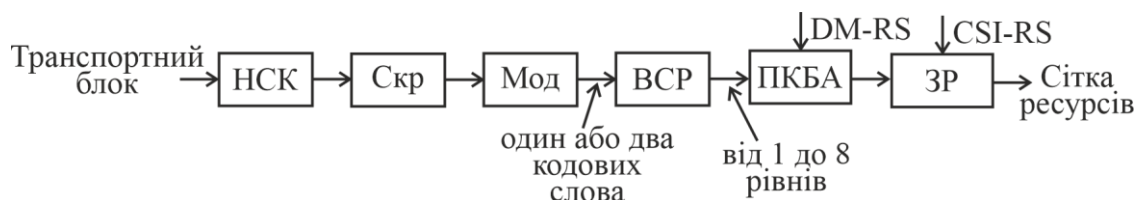


Рисунок 3.8 – Фізичний низхідний спільний канал (ВСК – висхідний спільний канал; Скр – скремблювання; Мод – модуляція; ВСП – відображення кодів слів на певний рівень; ПКБА – попереднє кодування для роботи з багатьма антенами; ЗР – зіставлення елементів ресурсів)

Типи зіставлення PDSCH:

- два типи зіставлення: тип зіставлення А, тип зіставлення В;
- перший DM-RS в символі 2 або 3 слота;
- DM-RS в першому символі розподілу;
- PUSCH частково підтверджено для слоту.

3.5 Канал довільного доступу

Канал довільного доступу (RACH) використовується для доступу до мережі або відправки запитів на планування.

Структурна схема каналу довільного доступу приведена на рисунку 3.9.

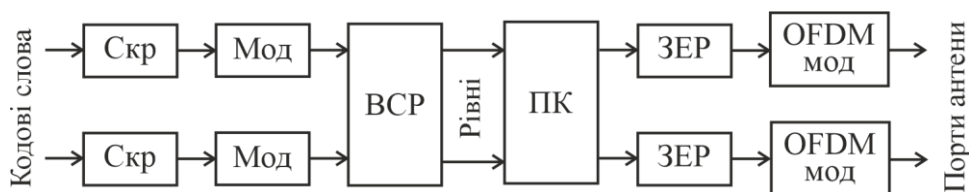


Рисунок 3.9 – Структурна схема каналу довільного доступу

(Скр – скремблювання; Мод – пристрій відображення бітів на сузір'я цифрової модуляції; ВСП – відображення сузір'я на певний рівень; ПК – попереднє кодування; ЗЕР – зіставлення елементів ресурсів; OFDM мод – модулятор сигналу мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів)

Відображення рівня: це процес, при якому кожне кодове слово відображається в один або кілька рівнів

DL/UL grant- це конкретна інформація про фізичний канал управління з мережі (eNodeB), що повідомляє UE «Тепер ви можете передавати дані».

Структурна схема передачі сигналів каналу довільного доступу приведена на рисунку 3.10.

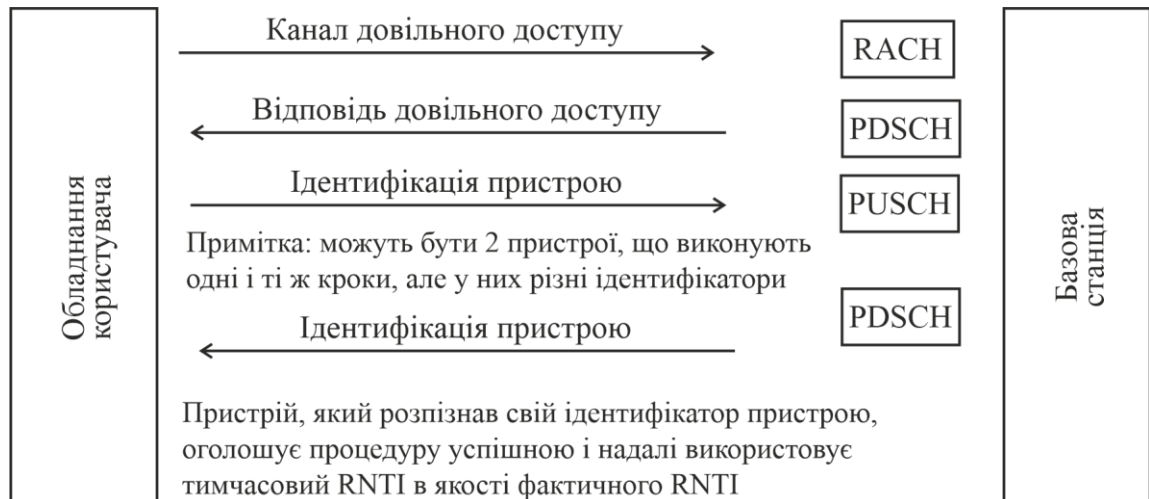


Рисунок 3.10 – Структурна схема передачі сигналів каналу довільного доступу

В системі зв'язку можуть бути 2 пристрої, що виконують одні і ті ж кроки, але у них різні ідентифікатори.

Пристрій, який розпізнав свій ідентифікатор пристрою, оголошує процедуру успішною і надалі використовує тимчасовий RNTI в якості фактичного RNTI.

Timing Advance - це спеціальна команда (повідомлення) від базової станції (eNB) до мобільного абонента (UE), яка дозволяє UE налаштувати свою передачу по висхідній лінії зв'язку. Цей вид регулювання висхідної лінії зв'язку (UL) застосовується до фізичного висхідного спільного каналу (PUSCH), фізичного висхідного каналу управління (PUCCH) і опорного сигналу зондування (SRS).

5G NR Radio Network Temporary Identifier (RNTI). RNTI означає тимчасовий ідентифікатор радіомережі. RNTI використовуються для розрізнення / ідентифікації підключеного UE до комірки конкретного радіоканалу, групи UE в разі пошукового виклику, групи UE, для яких управління потужністю видається eNB, системної інформації, переданої для

всіх UE допомогою 5G gNB. RNTI - це 16-бітний ідентифікатор, значення якого залежить від типу RNTI.

Для широкомовної передачі системної інформації використовується логічний канал BCCH, який потім відображається на транспортний канал DL-SCH, який потім відображається на фізичний канал PDSCH. UE повинні знати інформацію планування для PDSCH, який несе системну інформацію. Необхідна інформація планування міститься в DCI (Downlink Control Information), CRC якої скрембльований SI-RNTI.

Random Access RNTI – це RNTI довільного доступу (RA-RNTI) використовується під час процедури довільного доступу, MAC gNB генерує відповідь довільного доступу (Random Access Response – RAR) як відповідь на преамбулу довільного доступу, передану UE. RAR передається по транспортному каналу DL-SCH, який відображається на PDSCH. gNB скремблює CRC PDSCH з RA-RNTI для передачі PDSCH, який переносить RAR. Структурна схема передачі сигналів спільного низхідного каналу зв'язку приведена на рисунку 3.11.

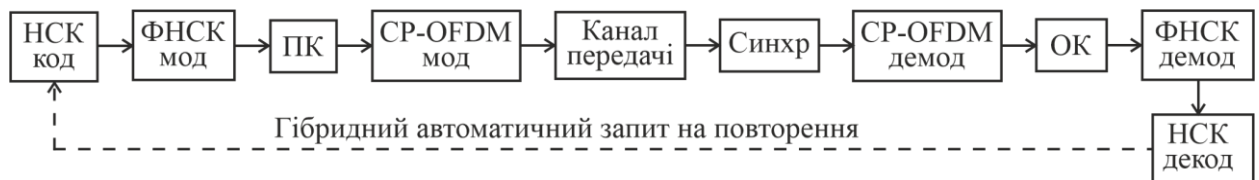


Рисунок 3.11 – Структурна схема передачі сигналів спільного низхідного каналу зв'язку (НСК код – кодування спільного низхідного каналу зв'язку; ФНСК мод – модуляція фізичного спільного низхідного каналу зв'язку; ПК – попереднє кодування; CP-OFDM мод – модуляція мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і циклічним префіксом; Синхр – синхронізація сигналів в області часу; CP-OFDM демод – демодуляція мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і циклічним префіксом; ОК – оцінка каналу; ФНСК демод – демодуляція фізичного спільного низхідного каналу зв'язку; НСК декод – декодування спільного низхідного каналу зв'язку)

Коли ми хочемо підключити UE до мережі 5G, воно повинно синхронізуватися як по низхідній, так і по висхідній лінії зв'язку. Синхронізація низхідної лінії зв'язку досягається після успішного декодування SSB. Щоб встановити синхронізацію висхідної лінії зв'язку і RRC-з'єднання, UE має виконати процедуру довільного доступу RACH.

5G Toolbox. Деталізація контенту:

- генерація сигналів;
- транспортні канали, фізичні канали і сигнали;
- синхронізація пакетів;
- передача та приймання для DL і UL;
- моделі каналів TDL і CDL;
- еталонні проекти в якості докладних прикладів;
- моделювання на рівні каналу і вимірювання пропускної здатності;
- процедури пошуку комірки;
- вимірювання (ACLR);
- процедури пошуку комірки базової станції;
- вимірювання (ACLR) Типи процедури RACH;
- випадковий доступ на основі конкуренції (CBRA);
- неконфліктний або безконфліктний довільний доступ (CFRA).

Довільний доступ на основі конкуренції (CBRA): при довільному доступі на основі конкуренції UE вибирає преамбулу випадковим чином з пулу преамбул, що спільно використовується з іншим обладнанням користувача (UE). Це означає, що UE має потенційні ризики вибору тієї ж преамбули, що й інше UE, і згодом може зіткнутися з конфліктом або підтвердженням. GNodeB використовує механізм вирішення конфліктів для обробки запитів доступу цього типу. У цій процедурі результат є випадковим, і не всі операції довільного доступу завершуються успішно. CBRA також відома як чотирьохетапна процедура RACH.

Крок 1. Передача преамбули довільного доступу (Msg1)

UE передає в преамбулі відповідного променя gNB

Крок 2: відповідь довільного доступу (Msg2)

Після приймання преамбули, gNodeB подає заявку на TC-RNTI і ресурси планування висхідної і низхідної лінії зв'язку. Потім gNodeB відправляє відповідь RA по PDSCH. Відповідь містить ідентифікатор преамбули RA, інформацію про синхронізацію, первинний дозвіл для висхідної лінії зв'язку і тимчасовий C-RNTI. Один PDSCH може передавати відповіді RA на декілька UE. Після того, як UE відправляє преамбулу, воно контролює PDCCH і чекає на відповідь RA у вікні відповіді RA:

- Якщо UE приймає відповідь, що містить ідентифікатор преамбули RA, який збігається з ідентифікатором, що містяться в переданій преамбулі RA, відповідь вважається успішною. Потім UE передає інформацію планування для висхідної лінії зв'язку.

- Якщо UE не отримує відповідь у вікні відповіді RA або не може перевірити відповідь, відповідь вважається невдалою. В цьому випадку, якщо кількість спроб RA менше верхньої межі (10), UE повторює RA. В іншому випадку RA не працює.

Крок 3. Запланована передача UL (Msg3)

UE відправляє інформацію планування для висхідної лінії зв'язку по PUSCH. Сигнальні повідомлення і інформація, що відправляється UE, варіюються в залежності від різних сценаріїв RA, і деякі з прикладів перераховані тут.

- Первісна установка RRC-з'єднання: повідомлення RRCSetupRequest (включено у повідомлення NAS UE_ID) передається по загальному каналу управління (CCCH) в TM на рівні RLC. Повідомлення не сегментоване.

- Відновлення RRC-з'єднання: повідомлення запиту на повторне відновлення RRC (що не несе повідомлення NSA) передається по CCCH в TM на рівні RLC. Повідомлення не сегментоване.

- Передача обслуговування: RA на основі конкуренції, замість RA, що не базується на конкуренції, запускається, якщо UE отримує доступ до цільової комірки і під час передачі обслуговування немає виділених преамбул. Повідомлення RRC Handover Confirm і C-RNTI передаються по виділеному каналу управління (DCCH). Якщо потрібно, також передається звіт про стан буфера (BSR).

- Інші сценарії: передаються за крайнім випадком C-RNTI UE.

Крок 4: Вирішення конфліктів (Msg4)

- Після того, як UE відправляє Msg3, запускається таймер вирішення конфліктів на 4 мс. GNodeB допомагає UE у вирішенні конфліктів, використовуючи C-RNTI на PDCCH або використовуючи ІЕ ідентифікатора вирішення конфліктів UE на PDSCH.

- UE продовжує відстежувати PDCCH до закінчення таймера і вважає вирішення конфлікту успішним і зупиняє таймер, якщо виконується одна з наступних умов:

- UE отримує C-RNTI за каналом PDCCH.

- UE отримує тимчасовий C-RNTI за каналом PDCCH, і PDU MAC може бути успішно декодованим. Зокрема, ІЕ ідентифікатора вирішення конфліктів UE, прийнятий по PDSCH, збігається з ІЕ, переданим в Msg3, що відправляється UE.

- Якщо таймер вирішення конфліктів закінчується, UE вважає, що вирішення конфліктів не вдалося. Потім UE знову виконує RA, якщо кількість спроб RA не досягло верхньої межі (10). Якщо кількість спроб RA досягло свого верхньої межі, процедура RA завершується помилкою.

Довільний доступ без конкуренції (CFRA): При довільному доступі без конкуренції преамбула виділяється gNodeB, і такі преамбули відомі як виділена преамбула довільного доступу. Виділена преамбула надається UE або через сигналізацію RRC (преамбула виділення може бути вказана в повідомленні RRC), або через сигналізацію рівня PHY (DCI на PDCCH). Отже, немає конфлікту преамбули. Коли виділених ресурсів недостатньо,

gNodeB інструктує UE ініціювати RA на основі конкуренції. CFRA також відомий як триетапна процедура RACH.

Крок 1. Призначення преамбули довільного доступу

GNodeB виділяє преамбулу RA для UE і відправляє її, використовуючи RRC Msg або DCI. Деякі сценарії перераховані тут.

- Передача: IE MobilityControlInfo, відправлений джерелом gNodeB, несе виділену преамбулу.

- Прибуття даних DL: коли дані низхідної лінії зв'язку прибувають в gNodeB, gNodeB інструктує UE ініціювати RA через DCI через PDCCH, який переносить виділену преамбулу.

- Мережа NSA: коли комірки NR додаються в NSA, gNodeB інструктує UE ініціювати RA через PDCCH, який переносить виділену преамбулу.

Крок 2: Передача преамбули довільного доступу (Msg1)

Крок 3: відповідь довільного доступу (Msg2)

- GNodeB відправляє відповідь RA.

- Передача обслуговування: відповідь RA повинен містити інформацію про узгодження синхронізації і надання первинного дозволу висхідній лінії зв'язку.

- Прибуття даних DL: коли дані низхідного каналу надходять в gNodeB, відповідь RA повинен містити інформацію про узгодження синхронізації і ідентифікатор преамбули RA (RAPID).

- Мережа NSA: при додаванні комірок NR в NSA відповідь RA повинен містити інформацію про узгодження часу і ідентифікатор преамбули RA (RAPID).

Розглянемо сценарії RACH і тип RACH

Випадок 1: Первісне налаштування RRC-з'єднання

- Випадковий доступ на основі конкуренції

Випадок 2: відновлення з'єднання RRC

- Випадковий доступ на основі конкуренції

Випадок 3: Передача

- Перший вибір - вибрати довільний доступ без конкуренції.

- CBRA можна використовувати, якщо все присвячені преамбули вже використовуються

Випадок 4: Прибуття даних по низхідній лінії зв'язку (порядок PDCCH)

- Перший вибір - вибрати довільний доступ без конкуренції.

- CBRA можна використовувати, якщо всі присвячені преамбули вже використовуються

Випадок 5: отримання даних висхідної лінії зв'язку

- Випадковий доступ на основі конкуренції

Випадок 6: надходження даних висхідної лінії L під час RRC_CONNECTED, коли немає доступних ресурсів PUCCH для SR

- Випадковий доступ на основі конкуренції

Випадок 7: Збій запиту планування

- Випадковий доступ на основі конкуренції

Випадок 8: перехід від RRC_INACTIVE до RRC_CONNECTED

- Перший вибір - вибрати довільний доступ без конкуренції.

- CBRA можна використовувати, якщо все присвячені преамбули вже використовуються

Випадок 9: Запит конкретної системної інформації (SI на вимогу)

- Довільний доступ без конкуренції

Випадок 10: додавання комірок NR для мереж АНБ

- Довільний доступ без конкуренції

Випадок 10: Відновлення променя

Довільний доступ без конкуренції

- CBRA можна використовувати, якщо все присвячені преамбуль вже використовуються

Розглянемо передачу сигналів низхідної лінії зв'язку (PDSCH). Структурна схема передачі сигналів фізичного спільного низхідного каналу приведена на рисунку 3.12.

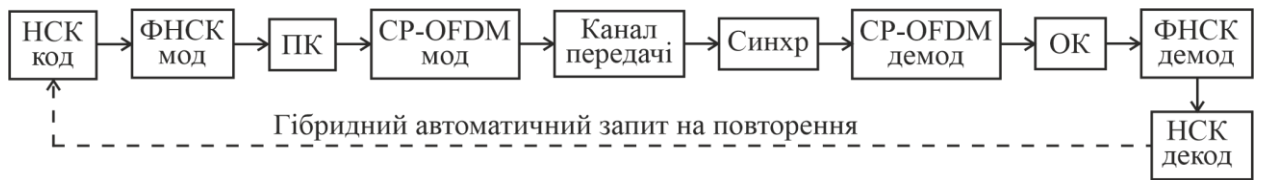


Рисунок 3.12 – Структурна схема передачі сигналів фізичного спільного низхідного каналу (НСК код – кодування низхідного спільного каналу; ФНСК мод – модуляція фізичного низхідного спільного каналу; ПК – попереднє кодування; CP-OFDM мод – модулятор мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і циклічним префіксом; Синхр – синхронізація сигналів в області часу; CP-OFDM демод – демодулятор мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і циклічним префіксом; ОК – оцінка каналу; ФНСК демод – демодуляція фізичного низхідного спільного каналу; НСК декод – декодування низхідного спільного каналу)

Це еталонне моделювання показує, як визначити пропускну здатність фізичного спільно використовуваного каналу низхідної лінії зв'язку (PDSCH) каналу 5G New Radio (NR), як визначено стандартом 3GPP NR. Приклад реалізує PDSCH і спільний канал низхідної лінії зв'язку (DL-SCH). Модель передавача включає в себе опорні сигнали демодуляції PDSCH (DM-RS), опорні сигнали відстеження фази PDSCH (PT-RS) і пакети сигналів синхронізації (SS). Приклад підтримує канали поширення як з кластерною лінією затримки (CDL), так і лінію затримки з відгалуженнями (TDL). Ви можете виконати ідеальну або практичну синхронізацію і оцінку каналу. Щоб скоротити загальний час моделювання, ви можете виконувати точки SNR в циклі SNR паралельно з допомогою Parallel Computing Toolbox™.

У прикладі моделюються наступні функції 5G NR:

- кодування транспортного каналу DL-SCH;
- декілька кодів слів в залежності від кількості шарів;
- генерація PDSCH, PDSCH DM-RS і PDSCH PT-RS;

- генерація пакетів SS (PSS / SSS / PBCH / PBCH DM-RS);
- змінний інтервал між піднесучими і нумерологія кадрів ($2^n * 15$ кГц);
- нормальний і розширений циклічний префікс;
- моделі каналів поширення TDL і CDL;

Інші особливості симуляції:

- попереднє кодування піддіапазону PDSCH з використанням SVD;
- модуляція CP-OFDM;
- відображення PDSCH і DM-RS за слотами і без них;
- генерація пакета SS (випадки A-E, управління бітовою схемою блоку SS / PBCH);
- ідеальна або практична синхронізація і оцінка каналу;
- робота HARQ з 16 процесами;
- у прикладі використовується одна частина смуги пропускання для всіх несучих.

Розглянемо передачу сигналів фізичного висхідного спільного каналу (PUSCH). Використовуються наступні функції 5G NR:

- кодування транспортного каналу UL-SCH;
- покоління PUSCH і PUSCH DM-RS;
- змінний інтервал між піднесучими і нумерологія ($2^n * 15$ кГц);
- нормальний та розширений циклічний префікс;
- моделі каналів поширення TDL і CDL.

Інші особливості симуляції:

- схеми передачі PUSCH на основі і не на основі кодової книги;
- додаткове попереднє кодування перетворення PUSCH;
- слотове і неслотове відображення PUSCH і DM-RS;
- ідеальна або практична синхронізація і оцінка каналу;
- робота HARQ з 16 процесами;

На рисунку 3.13 представлена реалізована блок-схема. Для ясності використання сигналу DM-RS опущено.

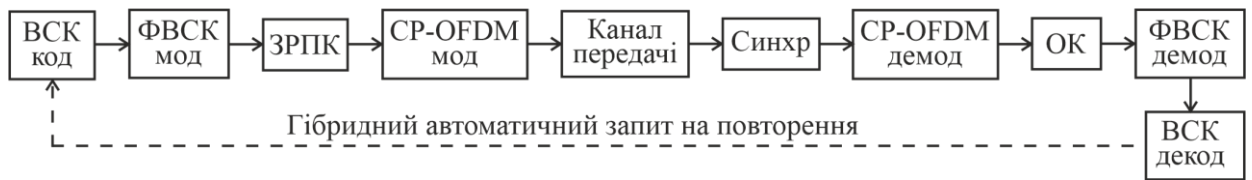


Рисунок 3.13 – Структурна схема передачі сигналів фізичного спільного висхідного каналу (ВСК код – кодування висхідного спільного каналу; ФВСК мод – модуляція фізичного висхідного спільного каналу; ЗРПК – залежне від реалізації попереднє кодування; CP-OFDM мод – модулятор мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і циклічним префіксом; Синхр – синхронізація сигналів в області часу; CP-OFDM демод – демодулятор мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і циклічним префіксом; ОК – оцінка каналу; ФВСК демод – демодуляція фізичного висхідного спільного каналу; ВСК декод – декодування висхідного спільного каналу)

Для передачі на основі кодової книги матриця попереднього кодування MIMO, яка використовується всередині модуляції PUSCH, може бути обрана за допомогою параметра TPMI.

Залежна від реалізації матриця попереднього кодування MIMO (для передачі, яка не базується на кодовій книзі, або попереднього кодування MIMO між портами передавальної антени і антенами для передачі на основі кодової книги) є матрицею ідентичності.

Процедури пошуку та вибору комірки базової станції:

- отримати ідентифікатор комірки та вихідну системну інформацію, включаючи головний інформаційний блок (MIB);
- швидка генерація;
- розгортка променя;
- модель каналу розповсюдження TDL та AWGN;
- синхронізація та демодуляція приймача.

Структурна схема передачі сигналів системи зв'язку п'ятого покоління приведена на рисунку 3.14.

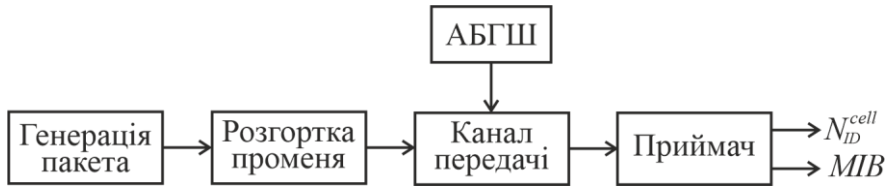


Рисунок 3.14 – Структурна схема передачі сигналів системи зв'язку п'ятого покоління

PDSCH throughput

`mesh(real(estChannelGrid(:,:,1,1)))`

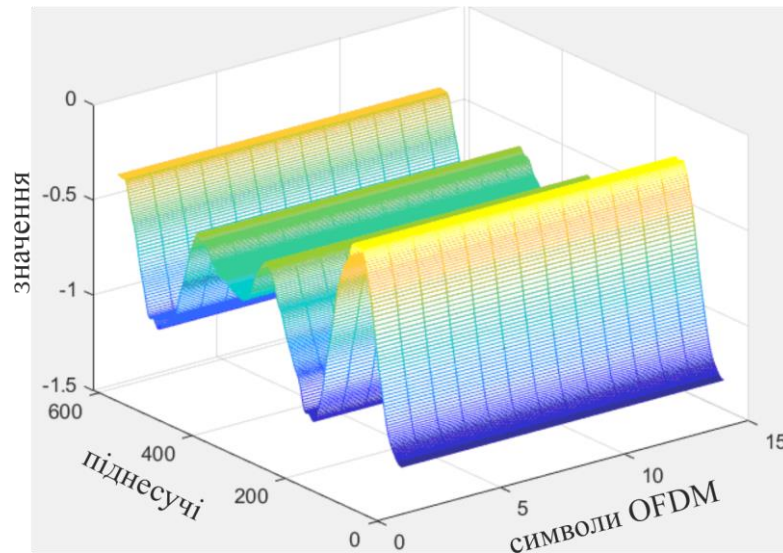


Рисунок – Структура каналу для мобільного зв'язку п'ятого покоління

Висновки до третього розділу

1. Канал DCI (інформація управління низхідним каналом) - це інформація керування низхідним каналом зв'язку: можуть бути визначені наступні етапи кодування, які включають мультиплексування інформаційних елементів, приєднання CRC, канальне кодування і узгодження швидкості.

2. Канал довільного доступу використовується для доступу до мережі або відправки запитів на планування.

3. Коли ми хочемо підключити обладнання користувача до мережі 5G, воно повинно синхронізуватися як по низхідній, так і по висхідній лінії зв'язку. Синхронізація низхідної лінії зв'язку досягається після успішного декодування SSB. Щоб встановити синхронізацію висхідної лінії зв'язку, обладнання користувача має виконати процедуру довільного доступу RACH.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ ФІЗИЧНИМ НИЗХІДНИМ СПІЛЬНИМ КАНАЛОМ ЗВ'ЯЗКУ

4.1 Передача сигналів у системах зв'язку п'ятого покоління

Щоб мати можливість передавати дані через мережу радіодоступу 5G, дані та інформація організовані в кілька каналів даних.

Організуючи дані по різних каналах, система зв'язку 5G здатна впорядковано управляти передачею даних, і система може розуміти, які дані надходять, і, отже, може обробляти їх необхідним чином.

Оскільки існує багато різних типів даних, які необхідно передавати, очевидно, що необхідно передавати дані користувача, а також керуючу інформацію для керування лінією радіозв'язку, а також для забезпечення синхронізації, доступу, тощо. Всі ці функції дуже важливі і вимагають передачі даних через мережу радіодоступу.

У системі мобільного зв'язку 5G використовується рівень доступу, аналогічний тому, що використовується в 4G LTE.

Хоча існує два стеки протоколів: площину користувача та площину управління, вони, як і раніше, використовують знайому еталонну модель OSI.

В результаті існують різні рівні протоколу та, відповідно, кілька рівнів каналів даних, які визначені для радіозв'язку.

Розглянемо ієрархію каналів системи зв'язку п'ятого покоління. Щоб згрупувати дані, які мають бути надіслані через мережу радіодоступу 5G NR, дані організовані дуже логічним чином. Оскільки для дати, що надсилається каналом радіозв'язку, існує багато різних функцій, вони повинні бути чітко позначені і мати певні позиції і формати.

Щоб це сталося, використовується кілька різних форм каналу даних. Канали вищого рівня «відображаються» або містяться в інших до тих пір, поки, нарешті, фізично канал не будуть містити дані з каналів вищого рівня.

У системах мобільного зв'язку використовуються три основні типи каналів даних. Це правильно для систем 5G, і відповідно ієрархія наведена нижче. Логічний канал: логічні канали можуть бути однією з двох груп: канали управління та канали трафіку.

Канали управління: канали управління використовуються для передачі даних з площині управління.

Канали трафіку: логічні канали трафіку використовуються для передачі даних у площині користувача.

Транспортний канал: це мультиплексування логічних даних, що передаються фізичним рівнем та його каналами через радіоінтерфейс.

Фізичний канал: фізичні канали - це ті, які найбільш близькі до фактичної передачі даних через мережу радіодоступу / радіочастотного сигналу 5G. Вони використовуються для передачі даних по радіоінтерфейсу.

Фізичні канали часто мають канали вищого рівня, зіставлені із нею для надання певної послуги. З іншого боку, фізичні канали несуть дані корисного навантаження чи деталі конкретних показників передачі: модуляція, мультиплексування опорних сигналів, потужність передачі, радіочастотні ресурси, тощо.

З вдосконаленням мобільних засобів телекомунікацій підвищується швидкість передачі інформації, якість зв'язку, зменшується затримка, з'являються нові функції. Зв'язок п'ятого покоління 5G будується на основі стандарту LTE Advanced Pro, який являє собою еволюцію LTE Advanced і підтримує передачу даних на швидкостях до 3 Гбіт/с, дозволяє використовувати для передачі даних ліцензований і неліцензований спектр LTE. Крім того, він включає в себе декілька нових технологій, пов'язаних з 5G, таких як 256-QAM, Massive MIMO, LTE-Unlicensed і інтернет речей, що дозволяє існуючим LTE-A Pro мереж надалі підтримувати 5G. Розгортання 5G NR відбувається на основі сполучення з існуючою інфраструктурою LTE в неавтономному режимі (NSA). Неавтономний 5G NR використовується для eMBB. Початкова модель NSA 5G NR буде спрямована на поліпшення якості

мобільного широкосмугового інтернету для підвищення обсягу та надійності передачі даних шляхом використання частот міліметрового діапазону. Мобільний зв'язок 5G використовує фізичні, транспортні та логічні канали для даних.

Неавтономний 5G NR (відомий як NSA) є ранньою версією Автономного 5G NR і, головним чином, використовується для eMBB. NSA, в якому використовується LTE RAN (Radio Access Network) і ядро з додаванням несучої компонента 5G, в даний час тестується на багатьох ринках. Початкова модель NSA 5G NR буде спрямована на поліпшення якості мобільного широкосмугового інтернету для підвищення обсягу та надійності передачі даних шляхом використання частот міліметрового діапазону. Однак технологія 5G в міліметровому діапазоні матиме набагато менше, в порівнянні з попередніми поколіннями, охоплення і буде більшою мірою схильна до завад. Запуск NSA дозволить інженерам проаналізувати і вирішити дані проблеми.

Автономний 5G NR ще більше підвищить ефективність роботи мережі в порівнянні з LTE і неавтономним варіантом. Поява автономної версії технології 5G NR призведе до зниження витрат операторів і підвищення продуктивності для користувачів. Автономна версія передбачає наявність абсолютно нової RAN і ядра мережі. Подібно NSA, автономна версія буде використовувати частоти міліметрового діапазону, а також частоти низького і середнього діапазонів, що дозволить забезпечити широке покриття територій і зв'язок на швидкості в декілька гігабіт.

Неавтономний 5G використовує два радіочастотних діапазони. Перший діапазон захоплює поточний 4G LTE і називається діапазоном середніх частот до 6 ГГц,. Другий високочастотний діапазон називається міліметровим (верхнім діапазоном і відноситься до частот вище 24 ГГц. Цей частотний діапазон пропонує значно збільшену пропускну здатність у порівнянні з іншими. Для досягнення хорошого покриття в 5G на міліметрових хвилях потрібно багато невеликих малопотужних сот.) . У той

час як останній пропонує потенціал максимально високих швидкостей, частоти sub-6 ГГц здатні проникати крізь тверді об'єкти, наприклад, крізь стіни будівель. Тому оператори мобільного зв'язку намагаються збалансувати наявні у них діапазони частот для забезпечення якісного підключення по швидкості і площі покриття.

Динамічний розподіл частот - технологія, що дозволяє розгортати 4G LTE і 5G мережі в межах одних і тих же частотних смуг, пропорційно розподіляючи частоти між користувачами мереж різних поколінь.

Динамічний розподіл частот вирішує проблему спільного використання 4G LTE і 5G за допомогою алгоритмів, що дозволяють операторам обмінюватися частотами між пристроями 4G LTE і 5G, а також постійно оптимізувати розподіл по мірі переходу клієнтів з 4G LTE на мережу 5-го покоління. Динамічний розподіл частот полегшує перехід на 5G.

Автономний 5G - метод, заснований на використанні хмарної мережі. Автономний 5G вимагає створення нової інфраструктури для підтримки підвищених швидкостей передачі даних.

Ця архітектура включає в себе нове ядро мережі 5G, а також базову станцію 5-го покоління, що підвищує пропускну здатність даних на границі мережі за рахунок одночасного використання міліметрових хвиль, і також низьких і середніх частот.

5G NR - це нова технологія радіодоступу для стандарту мобільного зв'язку наступного покоління, що істотно відрізняється від LTE за наступними показниками:

- Нові діапазони частот нижче і вище 6 ГГц, з перспективою введення глобально доступних частотних діапазонів з областями від 3,4 до 4 ГГц і від 26 до 29 ГГц.

- Підтримка формування діаграми спрямованості для сигналів синхронізації і ширококомовних каналів

- Більша гнучкість таких фізичних параметрів радіозв'язку, як смуга пропускання каналу, інтервал піднесучих і тривалість символу

Ці характеристики впливають на якість сигналу і швидкість передачі даних; відповідно підвищується потреба в точних вимірах покриття для коректності планування мереж 5G NR і розгортання базових станцій.

Моделі розгортання можуть також відображати варіанти використання: NSA використовується в міських районах для забезпечення поліпшеної пропускної здатності і швидкості, а SA розгортається вибірково, наприклад, в кампусних зонах для виробництва і конкретних галузей, таких як порти і видобуток корисних копалин.

Фізичний рівень має виконувати наступні функції для надання послуги передачі даних:

- Виявлення помилок в транспортному каналі;
- завадостійке кодування і декодування транспортного каналу;
- гібридний автоматичний запит на повторення;
- узгодження швидкості кодованого транспортного каналу з фізичними каналами;
- відображення кодованого транспортного каналу на фізичні канали;
- Збереження потужності фізичних каналів;
- Модуляція і демодуляція фізичних каналів;
- Частотна і часова синхронізація;
- Вимірювання характеристик і індикація на більш високі рівні;
- Обробка антен з багатьма входами і виходами (MIMO);
- радіочастотна обробка обробка.

Функції L1 моделюються для кожного транспортного каналу.

4.2 Модель фізичного рівня обладнання користувача

Модель фізичного рівня 5G-NR відображає ті характеристики фізичного рівня 5G-NR, які актуальні з точки зору більш високих рівнів. Зокрема, модель фізичного рівня фіксує:

- структура даних більш високого рівня, що передаються вниз або вгору від фізичного рівня;
- засоби, за допомогою яких вищі рівні можуть налаштовувати фізичний рівень;
- Різні індикатори (індикатори помилок, індикатори якості каналу, тощо), які надаються фізичним рівнем на більш високі рівні.

У мережі 5G NR є два основних компоненти: UE (мобільний абонент) і gNB (базова станція). З'єднання від gNB до UE відомо як низхідна лінія зв'язку, яка використовує канали PDSCH, PUSCH і PDCCH для передачі інформації даних і управління. Структурна схема фізичного рівня моделі передачі DL-SCH приведена на рисунку 4.1.

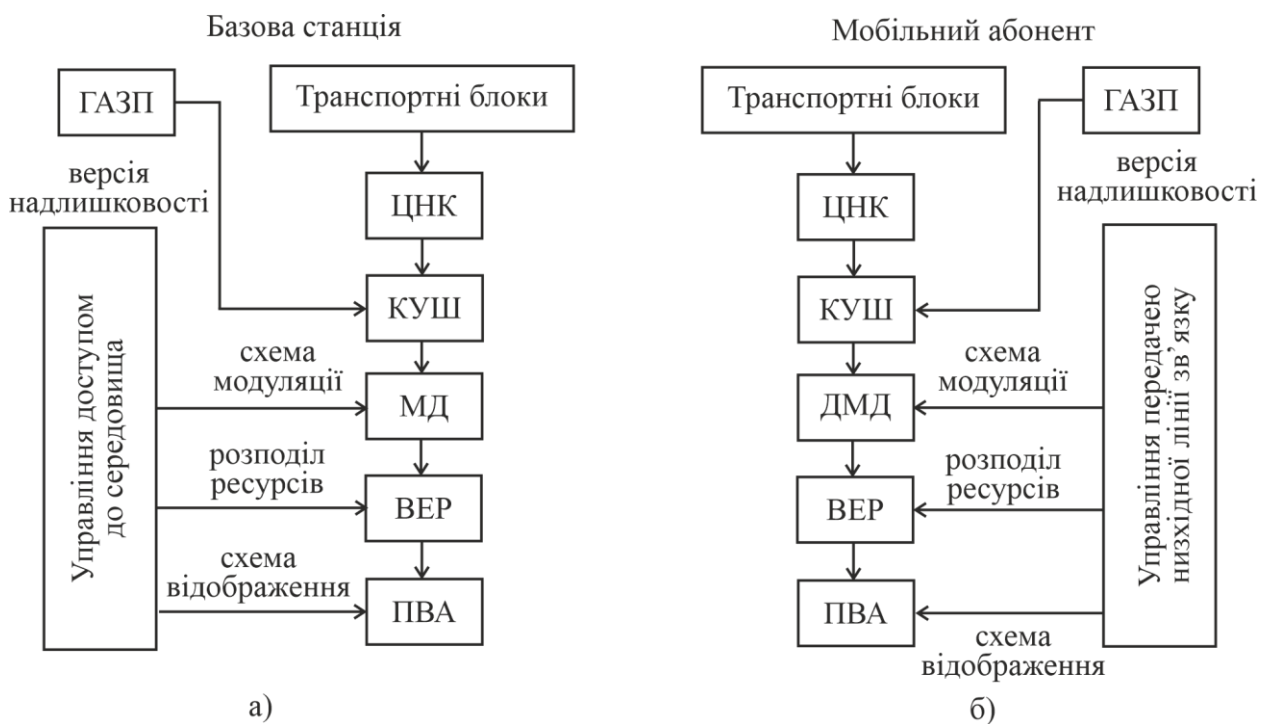


Рисунок 4.1 – Структурна схема фізичного рівня моделі передачі DL-SCH

Мобільний зв'язок 5G використовує фізичні, транспортні та логічні канали для даних. Фізичний рівень має виконувати наступні функції для надання послуги передачі даних (рис.1):

- виявлення помилок циклічним надлишковим кодом (ЦНК);
- завадостійке каналне кодування і узгодження швидкості (КУШ);

- гібридний автоматичний запит на повторення (ГАЗП);
- модуляція даних (МД);
- відображення на елементи ресурсів (ВЕР);
- перетворення для випромінювання антеною (ПВА);
- демодуляція даних (ДМД);
- канальне декодування і узгодження швидкості(ДУШ);

У мережі 5G NR є два основних компоненти: UE (мобільний абонент) і gNB (базова станція), як зображено на рис. 1. З'єднання від gNB до UE відомо як низхідна лінія зв'язку, яка використовує канали PDSCH, PDCCH і PDCSCh.

4.3 Передача символів у системі зв'язку п'ятого покоління

Підтримуються множинні нумерології OFDM, циклічний префікс для частини смуги пропускання виходять з параметрів верхнього рівня `subcarrierSpacing` і `cyclicPrefix`, відповідно. На рисунку 4.2 наведена структура низхідного каналу зв'язку.

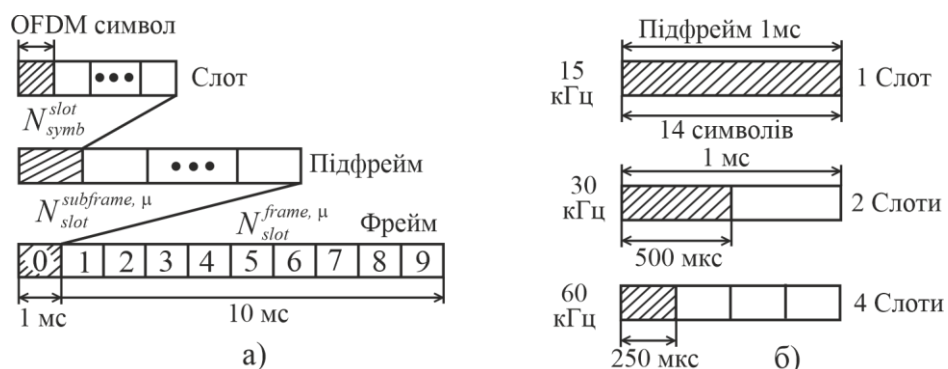


Рисунок 4.2 – Структура низхідного каналу зв'язку

Для конфігурації рознесення піднесучих μ слоти пронумеровані $n_s^\mu \in \{0, \dots, N_{slot}^{subframe, \mu} - 1\}$ в порядку зростання всередині підфрейму, і

$n_{s,f}^{\mu} \in \{0, \dots, N_{slot}^{frame, \mu} - 1\}$ - в порядку зростання всередині фрейму. $\in N_{symb}^{slot}$ послідовних символів OFDM, де N_{symb}^{slot} залежить від циклічного префікса. Початок слоту n_s^{μ} в підфреймі вирівнюється за часом з початком символу OFDM $n_s^{\mu} N_{symb}^{slot}$ в тому ж підфреймі.

OFDM-символи в слоті можуть бути класифіковані як «низхідна лінія зв'язку», «гнучка» або «висхідна лінія зв'язку».

У слоті в фреймі низхідної лінії зв'язку UE знає, що передачі по низхідній лінії зв'язку відбуваються тільки в символах «низхідної лінії зв'язку» або «гнучких» символах.

В інтервалі кадру висхідної лінії зв'язку UE має передавати тільки символи «висхідній лінії зв'язку» або «гнучкі» символи.

Для ілюстрації виконання операції ВЕР (рисунок 4.1) на рисунку 4.3 наведена сітка ресурсів символів OFDM у слотах на несучій частоті і на рисунку 4.4 наведена сітка ресурсів передавача. На рисунку 4.5 наведена залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум НЛЗ з різною модуляцією. На рисунку 4.6 наведена залежність величини вектора помилки (EVM) від відношення сигнал-шум НЛЗ з різною модуляцією. З отриманих залежностей можна зробити висновок, що модуляція QPSK у каналі НЛЗ підвищує завадостійкість, але має найвищу величину вектора помилки (ВВП). Тому при проектуванні НЛЗ виходять з компромісу між бажаною швидкістю передачі даних і допустимою ВВП. Найменший ВВП має модуляція 256QAM при малих відношеннях сигнал-шум, але вона потребує збільшення потужності передавача на 17 дБ у порівнянні з QPSK.

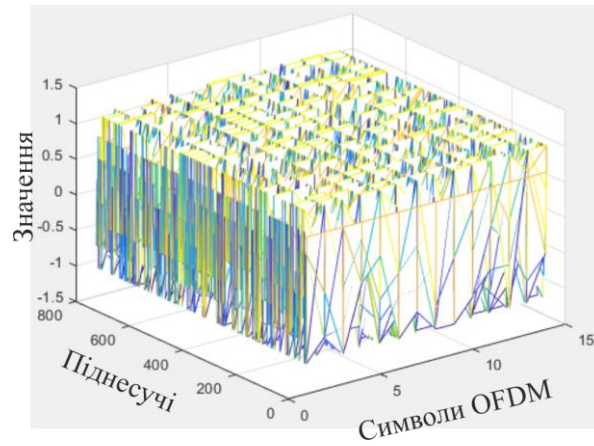


Рисунок 4.3 – Символи OFDM у слотах на несучій

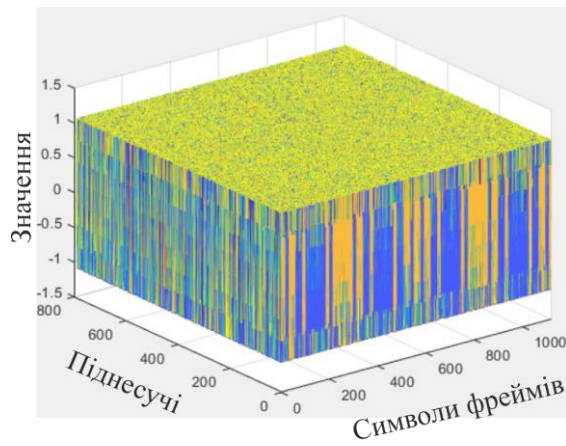


Рисунок 4.4 – Створення хвилі передавача

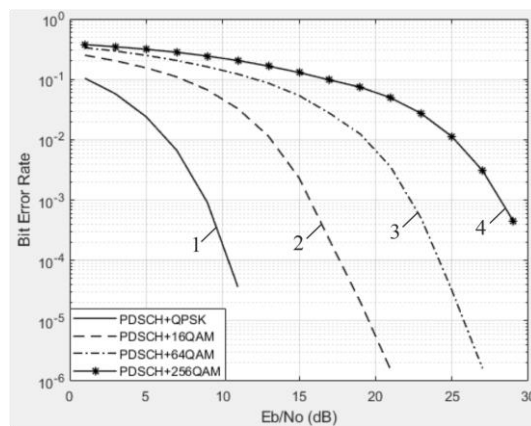


Рисунок 4.5 – Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум НЛЗ і модуляцією (1 – QPSK; 2 – 16QAM; 3 – 64QAM; 4 – 256QAM)

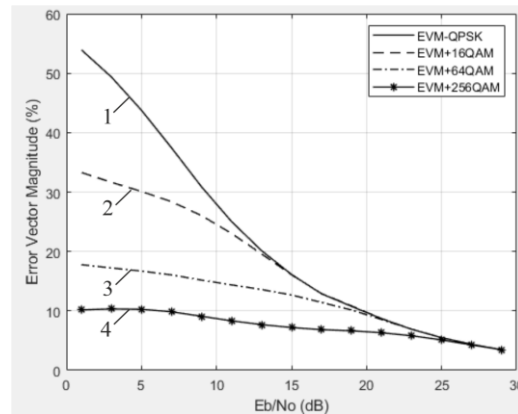


Рисунок 4.6 – Залежність величини вектора помилки (EVM) від відношення сигнал-шум НЛЗ і модуляцією (1 – QPSK; 2 – 16QAM; 3 – 64QAM; 4 – 256QAM)

Початкові запуски 5G NR залежали від сполучення з існуючою інфраструктурою LTE (4G) в неавтономному режимі (NSA).

Неавтономний 5G NR (відомий також як NSA) є ранньою версією Автономного 5G NR і, головним чином, використовується для eMBB. NSA, в якому використовується LTE RAN і ядро з додаванням несучої компонента 5G, в даний час тестується на багатьох ринках. Початкова модель NSA 5G NR буде спрямована на поліпшення якості мобільного широкосмугового інтернету для підвищення обсягу та надійності передачі даних шляхом використання частот міліметрового діапазону. Мобільний зв'язок 5G використовує фізичні, транспортні та логічні канали для даних.

існує багато різних типів даних, які необхідно зберігати і передавати – це дані користувача. Також необхідно передавати керуючу інформацію для управління лінією радіозв'язку, дані для забезпечення синхронізації, доступу, тощо. У системі мобільного зв'язку 5G використовується рівень доступу, аналогічний тому, який використовується в 4G LTE.

Спільний канал низхідної лінії зв'язку (DL-SCH) є основним транспортним каналом, використовуваним для передачі даних низхідної лінії

зв'язку в NR. Він підтримує ключові функції NR, такі як динамічна адаптація швидкості і залежне від каналу планування в часовій і частотній областях.

Модель фізичного рівня для передачі спільно використовуваного каналу низхідної лінії зв'язку описується на основі відповідного PDSCH.

Послідовність операцій обробки фізичного рівня:

- дані більш високого рівня, що передаються на фізичний рівень;
- індикація помилок CRC і транспортного блоку;
- FEC і узгодження швидкості;
- модуляція даних;
- відображення на фізичний ресурс;
- мульти антенна обробка;
- підтримка управління L1 і сигналізації, пов'язаної з гібридним ARQ.

Модель фізичного рівня 5G-NR відображає ті характеристики фізичного рівня 5G-NR, які актуальні з точки зору більш високих рівнів. Зокрема, модель фізичного рівня фіксує:

- структура даних більш високого рівня, що передаються вниз або вгору від фізичного рівня;
- засоби, за допомогою яких вищі рівні можуть налаштовувати фізичний рівень;
- Різні індикації (індикація помилок, індикація якості каналу і т. д.),

Надані фізичним шаром на більш високі рівні.

HARQ - Гібридний автоматичний запит повторної передачі (ГАЗП)

MAC - управління доступом до середовища, (УДС)

Базові станції 5G-NR gNodeB (gNb) для підключення 5G-SA і 5G-NSA

Відображення на елементи ресурсів BWP

Перетворення для випромінення антеною ПВА

Resource/power assignment – розподіл ресурсів (потужності)

Основою системи радіодоступу мережі 5G-NR є технологія мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

У низхідному напрямку від базової станції до абонентського терміналу (Downlink - DL) використовується простий метод CP-OFDM (Cyclic Prefix OFDM), при якому кожен призначений для користувача канал на певному часовому інтервалі складається із сукупності паралельно випромінюваних сигналів на безлічі тих, що піднесуть частот.

У висхідному напрямку від абонентського терміналу до базової станції (Uplink - UL) можливі два варіанти - CP-OFDM (по аналогії з DL) і DFT-s-OFDM (схожий з технологією SC-FDMA мережі 4G-LTE). Останній включає блок "Transform Precoding", фактично реалізує операцію дискретного перетворення Фур'є (DFT) і дозволяє знизити пік фактор (відношення максимального та середнього рівнів потужності).

Неавтономний (NSA) режим 5G NR відноситься до варіанту розгортання 5G NR, який залежить від площини управління існуючої мережі 4G LTE для функцій управління, в той час як 5G NR орієнтований виключно на площину користувача. Повідомляється, що це прискорює впровадження 5G, однак деякі оператори і постачальники критикують пріоритетність впровадження 5G NR NSA на тій підставі, що це може завадити реалізації автономного режиму мережі.

Виконаємо практичну оцінку каналу на отриманій сітці ресурсів rxGrid, використовуючи опорну сітку ресурсів, що містить опорні символи refSym в місцях розташування refInd. Функція повертає оцінку каналу h , оцінку дисперсії шуму $nVar$ і додаткову інформацію.

Оцінку каналу ми отримаємо у середовищі Матлаб.

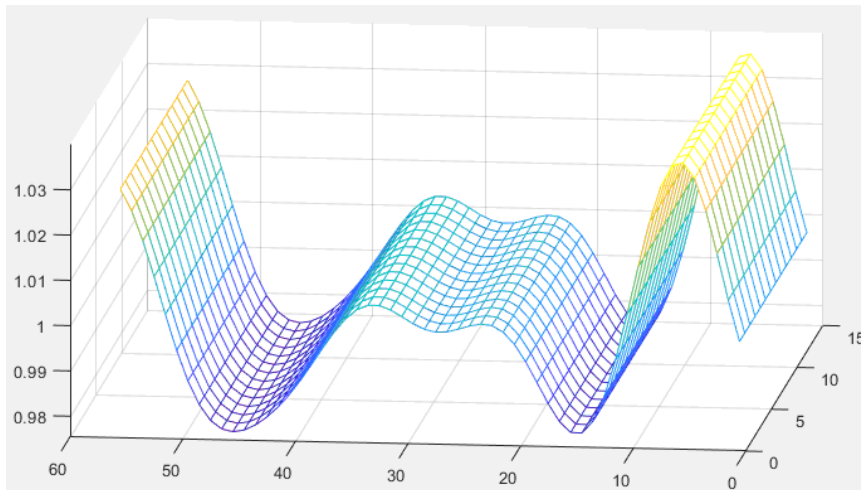


Рисунок 4.7 – Оцінка каналу системи зв'язку п'ятого покоління

Оцінка дисперсії шуму $\text{noiseEst}=0,002$.

Об'єкт `nrCarrierConfig` встановлює параметри конфігурації несучої для конкретної нумерології OFDM. Об'єкт визначає рознесення піднесучих, ширину смуги частот і параметри зміщення від точки A, центру піднесучої 0 в загальному блоці ресурсів 0 (CRB 0). Для рознесення піднесучих 60 кГц можна вказати нормальний або розширений циклічний префікс. Доступні тільки для читання властивості цього об'єкта забезпечують вимірювання в часовій області сітки ресурсів оператора зв'язку. За замовчуванням об'єкт вказує несучу 10 МГц, що відповідає 52 ресурсним блокам (RB) і рознесення піднесучих 15 кГц. Ви можете використовувати об'єкт в слот-орієнтованій обробці, вказавши поточний слот і номер кадрів.

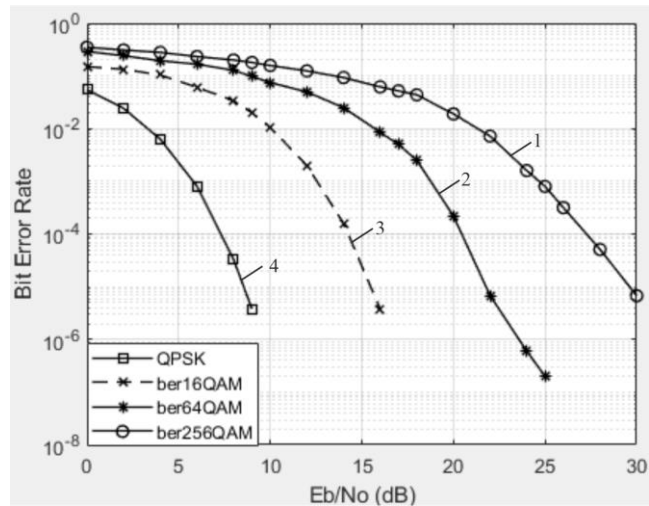


Рисунок 4.8 – Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для F-OFDM системи зв'язу з модуляцією (1 – 256QAM; 2 – 64-QAM; 3 – 16QAM; 4 – QPSK)

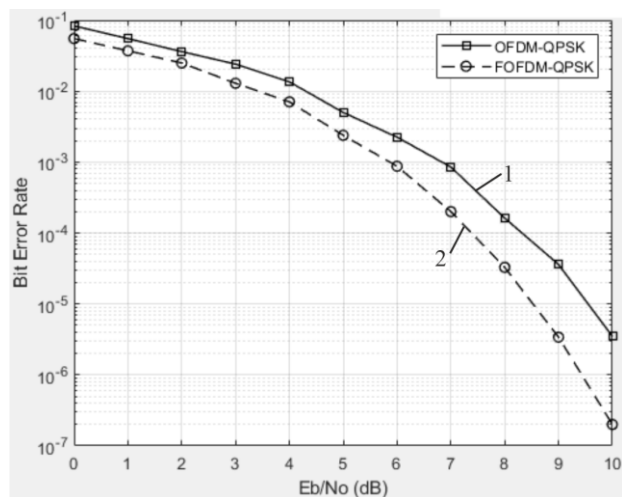


Рисунок 4.9 – Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для:

1 – CP-OFDM системи зв'язу з модуляцією QPSK;

2 – F-OFDM системи зв'язу з модуляцією QPSK

Дослідження ймовірності бітової помилки (BER) в залежності від відношення сигнал-шум (E_b/N_0) для системи зв'язу п'ятого покоління. Найбільшу ефективність має модуляція QPSK. При збільшенні швидкості

інформації з 2 біт на символ до 8 біт на символ – 256QAM потрібно збільшити відношення сигнал-шум на 22 дБ при $BER=10^{-6}$. Дослідження ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигнал-шум (E_b/N_0) для систем зв'язку з QPSK. Системи зв'язку з F-OFDM на 1 дБ ефективніше, систем зв'язку з CP-OFDM.

4.4 Модель фазового шуму

Фазовий шум в генераторах викликаний шумом в активних компонентах і елементах з втратами, який перетворюється з підвищенням частоти до значень несучої частоти. Синтезатори частоти зазвичай складаються з опорного генератора (або синтезатора частот), генератора, керованого напругою (ГУН), і контуру фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) з подільником частоти, накачування заряду фазочастотного детектора і контурного фільтра. Характеристика фазового шуму зазвичай пояснюється його спектром потужності. Таким чином, для аналізу розроблено декілька способів зробити гарне наближення до практичних спектрів фазового шуму. Найпростіша - це модель з одним полюсом / нулем, яка прийнята в IEEE P802.15. Однак це проста лінійна модель ФАПЧ, тому вона не враховує інші джерела фазового шуму. В [4] пропонується нова модель, що враховує три основних джерела шуму, такі як опорна частота, ФАПЧ і ГУН, але смугу пропускання контуру не так легко налаштувати. Тому в якості компромісного рішення між простотою аналізу та хорошою апроксимацією для відображення практичних характеристик фазового шуму ми запропонували багатополісную / нульову модель, яка розширена від однополісної / нульової моделі шляхом додавання додаткових членів полюс / нульова частота наступним чином:

$$S(f) = PSD0 \prod_{n=1}^N \frac{1 + \left(\frac{f}{f_{z,n}}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_{p,n}}\right)^2}, \quad (4.1)$$

де $PSD0$ - спектральна густина потужності для нульової частоти ($f = 0$) в дбн/Гц, $f_{z,n}$ - нульові частоти, а $f_{p,n}$ - полюсні частоти.

Багатополюсна/нульова модель має наступні переваги:

- надає просту структуру для перетворення PSD аналогового фазового шуму в PSD фазового шуму в дискретному часі (тобто версію основної смуги частот) для моделювання з використанням білінійного перетворення з заданими полюсами / нулями;

- практичні спектри потужності фазового шуму можуть бути добре апроксимовані за допомогою декількох полюсів / нулів.

Якщо робоча несуча частота змінюється, PSD зсувається на $20 \lg\left(\frac{f_c}{f_{c,base}}\right)$ дбн/Гц.

Коли виникає розбіжність частот генератора між передавачем і приймачем, різниця частот означає зсув спектра сигналу в основній смузі частот. В OFDM це створює неузгодженість між елементами FFT і піками сінк-імпульсів прийнятого сигналу. Це порушує ортогональність між піднесучими, що призводить до витoku спектра між ними. Кожна піднесуча заважає одна одній (хоча ефект переважає між сусідніми піднесучими), а оскільки піднесучих багато, це випадковий процес, еквівалентний гаусовому шуму. Таким чином, цей зсув частоти знижує SINR приймача. Приймач OFDM має відстежувати і компенсувати фазовий шум.

Сигнал, що приймається в основній смузі частот при наявності тільки фазового шуму і при відсутності адитивного білого гауссовського шуму (AWGN) задається наступним рівнянням:

$$y[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{\frac{j2\pi kn}{N}} e^{j\Theta[n]}, \quad (4.2)$$

де переданий сигнал множиться на несучу з шумом $e^{j\Theta[n]}$.

Прийнятий сигнал проходить через ШПФ, щоб отримати символ, переданий на m -й піднесучій в символі OFDM, в такий спосіб:

$$S_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-\frac{j2\pi mn}{N}} = S_m \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\Theta[n]} + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k \sum_{n=0}^{N-1} e^{\frac{j2\pi m}{N}(k-m)} e^{j\Theta[n]}, \quad (4.3)$$

Оскільки перший член правої частини в (3) (тобто середнє значення функції $e^{j\Theta[n]}$ протягом одного символу OFDM) не залежить від індексу m піднесучої, він називається загальною фазовою помилкою (CPE). Цей член викликає звичайне обертання фаз в отриманих символах. CPE можна оцінити по опорним сигналам і видалити. А другий член викликає інтерференцію між несучими (ICI). ICI через наявність фазового шуму створює нечітке сузір'я.

Фазовий шум основної смуги може бути згенерований. При нуль-багатополісному моделюванні (включаючи нуль-однополісне моделювання) PSD фазового шуму безперервної області часу (або s -області) можна легко перетворити в дискретну область часу (або z -область) з використанням білінійного перетворення з заданим набором параметрів фазового шуму і частотою дискретизації для моделювання основної смуги.

Частота дискретизації, використовувана для генерації фазового шуму, становить 614,4 МГц. Точка зупинки оцінки PSD становить 307,2 МГц, що становить половину частоти дискретизації.

Ми розглянули базовий інтервал піднесучих 15 кГц (такий самий, як в LTE) і коефіцієнт масштабування один з $\{1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 64\}$ (2^{n5^m}). Розмір ШПФ фіксований і дорівнює 2048, тому частота дискретизації збільшується зі збільшенням коефіцієнта масштабування. Кількість піднесучих також фіксована і дорівнює 1200 (як в LTE). Ми

розрахували величину вектора помилок (EVM) символів 64QAM в двох випадках; один - це EVM до компенсації CPE (тобто вплив чистого фазового шуму) для нижньої межі продуктивності, а інший - EVM після застосування компенсації CPE на основі Genie для верхньої межі продуктивності. Ми застосували ослаблення фазового шуму як в передавачі, так і в приймачі, використовуючи один і той же набір параметрів. Також передбачається, що немає AWGN, що дозволяє бачити тільки ефекти фазового шуму.

Обговорення взаємозв'язку між рознесенням піднесучих OFDM і фазовим шумом ефективно тільки тоді, коли CPE фазового шуму скомпенсовано належним чином.

З огляду на фазовий шум, великий інтервал між піднесучими може допомогти підвищити продуктивність EVM, коли повинна підтримуватися на більш високих частотах велика смуга пропускання до декількох ГГц.

Для більш високих частот набір рознесення піднесучих $f_0 * 2^n$ показує занадто великий розрив в характеристиках EVM між значеннями рознесення сусідніх піднесучих з урахуванням фазового шуму. З іншого боку, набір рознесення піднесучих $f_0 * 2^n * 5^m$ з кінцевими цілими числами, такими, що $n = 0,1,2,3,4,5,6,7,8$ і $m = 0,1,2$, здається досить хорошим для підтримки великої смуги пропускання з точки зору впливу фазового шуму.

Хоча більший інтервал піднесучих допомагає більшою мірою підвищити продуктивність EVM, але в області часу тривалість символу OFDM стає коротшою, так що службові дані CP можуть бути збільшені для підтримки заданого покриття. Отже, набір нумерології OFDM для NR слід ретельно вибирати після детального аналізу.

Висновки до четвертого розділу

Проведене дослідження оцінки впливу фазового шуму на рознесення піднесучих OFDM. Досліджена нуль-багатополюсна модель з налаштованими параметрами, такими як PSD0 і нуль-багатополюсні частоти, для практичних оцінок характеристик фазового шуму.

Взаємозв'язок між рознесенням піднесучих OFDM і фазовим шумом ефективно досліджувати тільки тоді, коли CPE фазового шуму скомпенсовано належним чином.

З огляду на фазовий шум, великий інтервал між піднесучими може допомогти підвищити продуктивність EVM, коли велика смуга пропускання до декількох ГГц повинна підтримуватися на більш високих частотах.

Для більш високих частот набір рознесення піднесучих $f_0 * 2^n$ показує занадто великий розрив в характеристиках EVM між значеннями рознесення сусідніх піднесучих з урахуванням фазового шуму. З іншого боку, набір рознесення піднесучих $f_0 * 2^n * 5^m$ з кінцевими цілими числами, такими, що $n = 0,1,2,3,4,5,6,7,8$ і $m = 0,1,2$, здається достатньо хорошим для підтримки великої смуги пропускання до декількох ГГц з точки зору впливу фазового шуму.

ВИСНОВКИ

1. Епоха розвитку 5G і хмарних технологій передбачає, що хмарні обчислення, великі дані і штучний інтелект будуть інтегруватися з метою інтелектуальної модернізації підприємств і галузей.

2. Досліджена залежність величини вектора помилки (EVM) від відношення сигнал-шум НЛЗ з різною модуляцією. З отриманих залежностей можна зробити висновок, що модуляція QPSK у каналі низхідної лінії зв'язку підвищує завадостійкість, але має найвищу величину вектора помилки (ВВП). Тому при проектуванні виходять з компромісу між бажаною швидкістю передачі даних і допустимою величиною вектора помилки. Найменший ВВП має модуляція 256QAM при малих відношеннях сигнал-шум, але вона потребує збільшення потужності передавача на 17 дБ у порівнянні з QPSK.

3. Дослідження ймовірності бітової помилки (BER) в залежності від відношення сигнал-шум (E_b/N_0) для системи зв'язку п'ятого покоління. Найбільшу ефективність має модуляція QPSK. При збільшенні швидкості інформації з 2 біт на символ до 8 біт на символ – 256QAM потрібно збільшити відношення сигнал-шум на 22 дБ при $BER=10^{-6}$. Дослідження ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигнал-шум (E_b/N_0) для систем зв'язку з QPSK. Системи зв'язку з F-OFDM на 1 дБ ефективніше, систем зв'язку з CP-OFDM.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пятін І.С. Дослідження енергетичної ефективності каналного кодування даних користувача кодами LDPC для систем зв'язку 5G /І.С. Пятін, Ю.М. Бойко // Вісник ХНУ. - 2020. - №3. - С.170-181
2. 3GPP TS 38.212. "Multiplexing and channel coding" 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
3. 3GPP TS 38.202. "5G; NR; Services provided by the physical layer (Release 15)." 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
4. Xi Zhang, Ming Jia, Lei Chen, Jianglei Ma, and Jing Qiu, "Filtered-OFDM – Enabler for Flexible Wave-form in the 5th Generation Cellular Networks", in Proc.2015 IEEE GLOBECOM, San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
5. Hugu Tulberg et'al "The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements", IEEE Communications Magazine Volume: 54, Issue: 12, Dec 2016.
6. J. Park, E. Lee, S. Park, S. Raymond, S. Pyo and H. Jo, "Modeling and Analysis on Radio Interference of OFDM Waveforms for Coexistence Study," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35132-35147, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896280.
7. Пятін І.С. Моделювання спотворень сигналу у каналі передачі/ І.С. Пятін, Д.А. Макаришкін // Вісник ХНУ. - 2020. - №5. – С. 39-45.
8. 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

9. Морелос-Сарагосса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005 – 320 с.
10. H. Li, B. Bai, X. Mu, J. Zhang and H. Xu, "Algebra-Assisted Construction of Quasi-Cyclic LDPC Codes for 5G New Radio," in IEEE Access, vol. 6, pp. 50229-50244, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2868963.
11. J. Bae, A. Abotabl, H. Lin, K. Song, and J. Lee, "An overview of channel coding for 5G NR cellular communications," APSIPA Trans. on Signal and Inform. Proces., 8, E17, June 2019. <https://doi.org/10.1017/ATSIP.2019.10>.
12. T.T.B. Nguyen, Tan, T. Nguyen and H. Lee, "Efficient QC-LDPC Encoder for 5G New Radio," Electronics, 8, 668, June 2019. <https://doi.org/10.3390/electronics8060668>.
13. Y. Fang, G. Bi, Y. L. Guan and F. C. M. Lau, "A Survey on Protograph LDPC Codes and Their Applications," in IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, pp. 1989-2016, Fourthquarter 2015, <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2436705>.
14. 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 : Логос, 2018. - 227 с.
15. Бойко Ю. М. Дослідження ефективності алгоритмів каналного кодування в захищених телекомунікаційних системах передавання інформації /Ю. М. Бойко, Д. А. Макаришкін, О. І. Пасічник // Зв'язок: загальногалуз. наук.-вироб. журн. – Київ, 2016. – № 5. – С. 56-67.
16. A. D. Liveris, Z. Xiong and C. N. Georghiades "Compression of binary sources with side information at the decoder using LDPC codes," IEEE communications letters, vol. 6, no. 10, pp. 440-442, 2002. 10. S. Myung, Y. Kyeongcheol, and K. Jaeyoel. "Quasi-cyclic LDPC codes for fast encoding." IEEE Transactions on Information Theory, vol. 51, no. 8, pp. 2894-2901, 2005.

Додаток А
(довідковий)
Презентація

Слайд1

Моделювання фізичного низхідного каналу для мобільного зв'язку п'ятого покоління

Михальчук В.О., гр. ТРМ-20-1
Керівник – к.в.н., доц. Лужанський В.І.

Слайд 2

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження моделі фізичного низхідного каналу зв'язку, дослідження енергетичної ефективності передачі сигналу.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання.

- провести огляд фізичних каналів, що використовуються у мобільному зв'язку п'ятого покоління;
- розглянути і дослідити вплив відношення сигнал-шум на кількість бітових помилок низхідної лінії зв'язку;
- дослідити модель низхідної лінії зв'язку і оцінити вплив умов розповсюдження сигналу на наявність помилок.

Об'єктом дослідження є процес формування сигналу низхідної лінії у цифрових системах зв'язку п'ятого покоління.

Предметом дослідження є методи та засоби формування сигналу і якість його передачі низхідною лінією зв'язку.

Слайд 3

Наукова новизна одержаних результатів :

1. Вперше проведена оцінка енергетичної ефективності передачі сигналів низхідною лінією зв'язку з різними видами модуляції.
2. Набув подальшого розвитку метод оцінки каналу і аналізу сигналів у складі низхідної лінії зв'язку.

Практичне значення одержаних результатів:

Перед виділенням символів широкоповного каналу відбувається демодуляція символів OFDM, оцінка каналу і вирівнювання середньоквадратичної помилки, що дозволяє підвищити точність виділення символів фізичного широкоповного каналу.

Слайд 4

Спільний канал низхідної лінії зв'язку

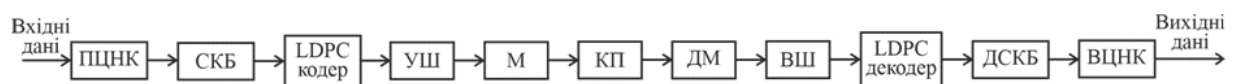


Рисунок 4.1 – Структурна схема спільного каналу низхідної лінії зв'язку (ПЦНК - прикріплення циклічного надлишкового коду; СКБ – сегментація кодового блоку; УШ – узгодження швидкості; М – модулятор; КП – канал передачі з адитивним білим гаусовим шумом; ДМ – демодулятор; ВШ – відновлення швидкості; ДСКБ – десеґментація кодового блоку; ВЦНК – вилучення циклічного надлишкового коду)

Слайд 5

Модель фізичного рівня низхідного каналу зв'язку

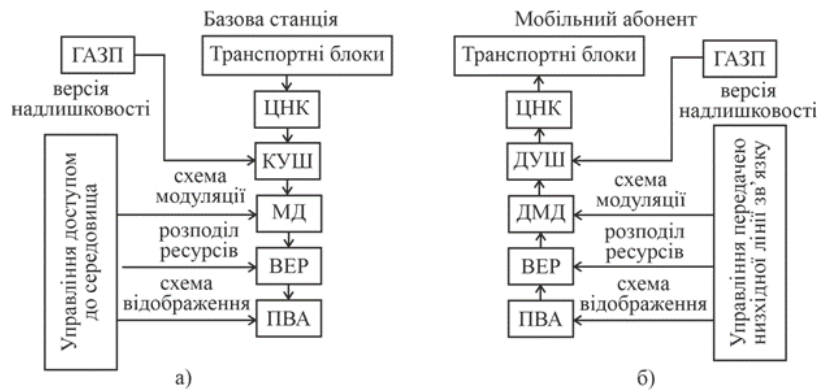


Рисунок 5.1 - Модель фізичного рівня низхідного каналу зв'язку

(ЦНК - виявлення помилок циклічним надлишковим кодом; КУШ - завадостійке каналне кодування і узгодження швидкості; ГАЗП - гібридний автоматичний запит на повторення; МД - модуляція даних; ВЕР - відображення на елементи ресурсів; ПВА - перетворення для випромінювання антеною; ДМД - демодуляція даних; ДУШ - каналне декодування і узгодження швидкості;)

Слайд 6

Узгодження швидкості

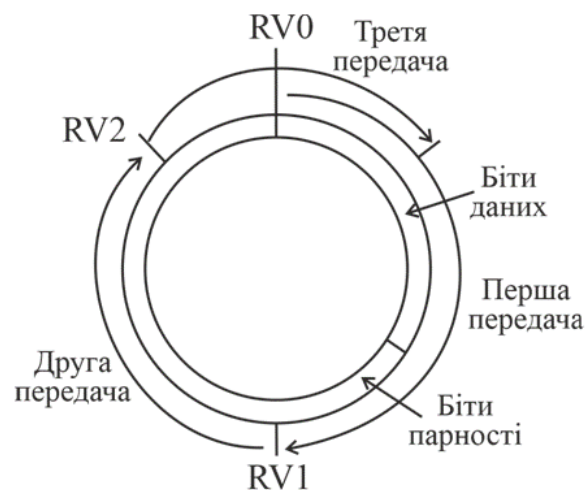


Рисунок 6.1 - Кільцевий буфер для зберігання бітової послідовності з виходу кодера каналу (RV0, RV1, RV2 - версія надлишковості)

Структура фрейма 5G

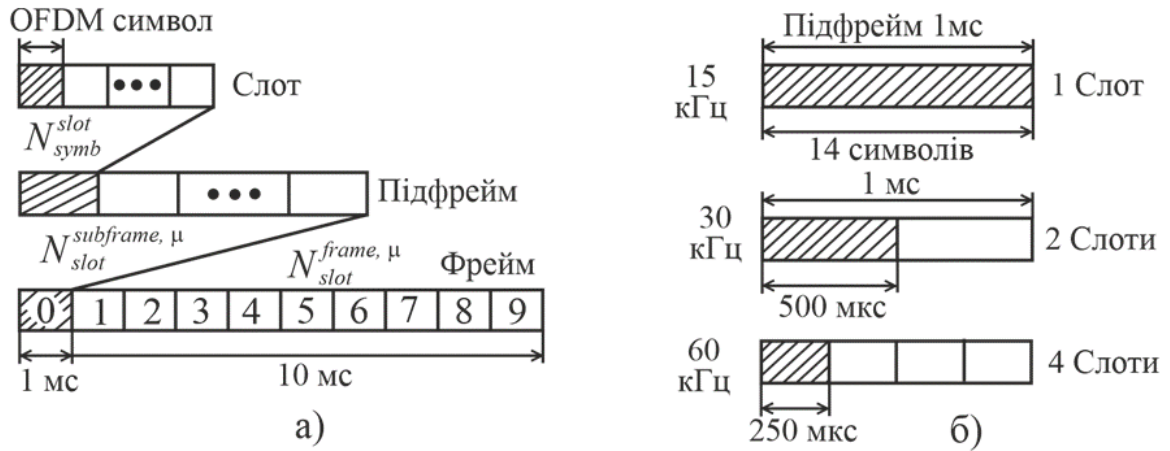


Рисунок 7.1 - Структура фрейму низхідної лінії зв'язку

Сітка ресурсів низхідного каналу 5G

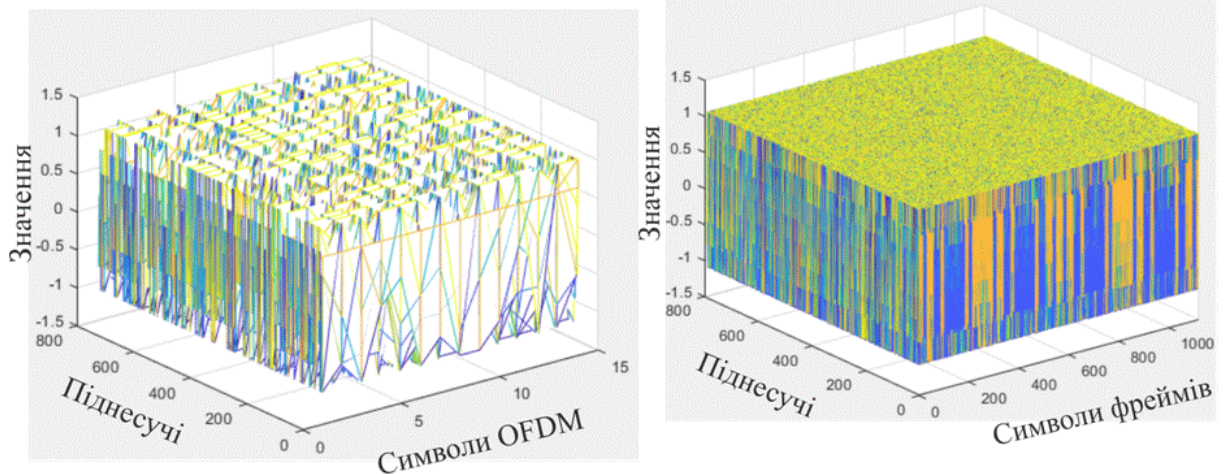


Рисунок 8.1 - Сітка ресурсів символів OFDM у слотах на несучій частоті

Рисунок 8.2 - Сітка ресурсів передавача

Слайд 9

Дослідження енергетичної ефективності низхідного каналу

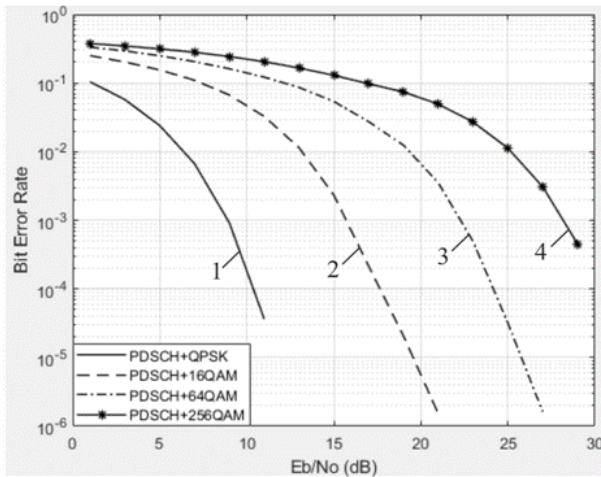


Рисунок 9.1 - Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум НЛЗ і модуляцією (1 – QPSK; 2 – 16QAM; 3 – 64QAM; 4 – 256QAM)

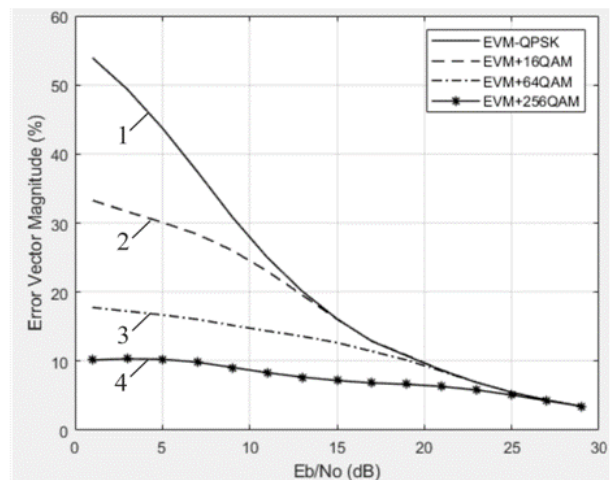


Рисунок 9.2 - Залежність величини вектора помилки (EVM) від відношення сигнал-шум НЛЗ і модуляцією (1 – QPSK; 2 – 16QAM; 3 – 64QAM; 4 – 256QAM)

Слайд 10

Дослідження сигналів OFDM

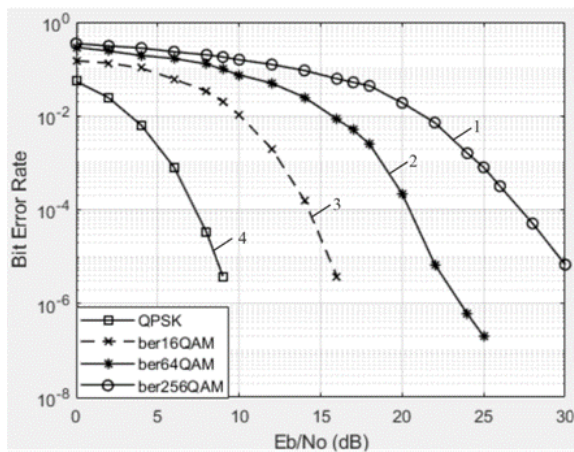


Рисунок 10.1 – Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для F-OFDM системи зв'язу з модуляцією (1 – 256QAM; 2 – 64QAM; 3 – 16QAM; 4 – QPSK)

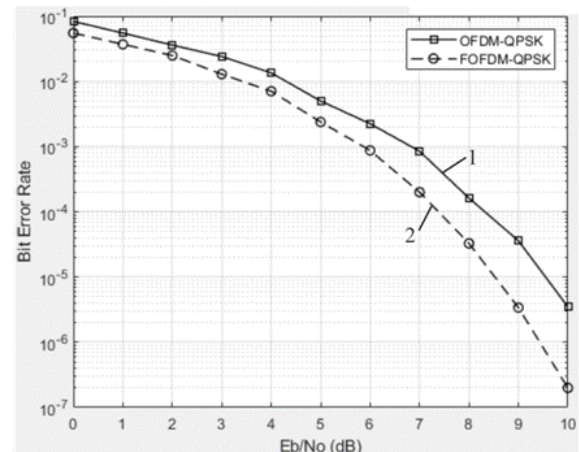


Рисунок 10.2 – Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для: 1 – CP-OFDM системи зв'язу з модуляцією QPSK; 2 – F-OFDM системи зв'язу з модуляцією QPSK

Слайд 11

ВИСНОВКИ

1. Епоха розвитку 5G і хмарних технологій передбачає, що хмарні обчислення, великі дані і штучний інтелект будуть інтегруватися з метою інтелектуальної модернізації підприємств і галузей.

2. Досліджена залежність величини вектора помилки (EVM) від відношення сигнал-шум НЛЗ з різною модуляцією. З отриманих залежностей можна зробити висновок, що модуляція QPSK у каналі низхідної лінії зв'язку підвищує завадостійкість, але має найвищу величину вектора помилки (ВВП). Тому при проектуванні виходять з компромісу між бажаною швидкістю передачі даних і допустимою величиною вектора помилки. Найменший ВВП має модуляція 256QAM при малих відношеннях сигнал-шум, але вона потребує збільшення потужності передавача на 17 дБ у порівнянні з QPSK.

3. Дослідження ймовірності бітової помилки (BER) в залежності від відношення сигнал-шум (E_b/N_0) для системи зв'язку цього покоління. Найбільшу ефективність має модуляція QPSK. При збільшенні швидкості інформації з 2 біт на символ до 8 біт на символ – 256QAM потрібно збільшити відношення сигнал-шум на 22 дБ при $BER=1e-6$. Дослідження ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигнал-шум (E_b/N_0) для систем зв'язку з QPSK. Системи зв'язку з F-OFDM на 1 дБ ефективніше, систем зв'язку з CP-OFDM.

Додаток Б
(довідковий)
Апробація роботи

УДК 621.396.2

DOI:

ПЯТИН І.С., ГАВРОНСЬКИЙ В. Є.

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»

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

ORCID ID: 0000-0002-1529-1272 e-mail: gavronskiy@gmail.com

ЛУЖАНСЬКИЙ В.І., МИХАЛЬЧУК В. О.

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0002-2698-3450 e-mail: luzhanskiy56@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-2924-2041 e-mail: 1306vadim1306@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З СИГНАЛАМИ F-OFDM

Системи зв'язку п'ятого покоління (5G) забезпечують збільшення швидкості передачі даних, використання наднадійного зв'язку із малою затримкою (URLLC), мають високу спектральну ефективність, широкі можливості підключення та підвищену енергоефективність. Мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і фільтром (F-OFDM) є сигналом, який отримують на виході фільтра. F-OFDM порівняно з OFDM забезпечує зниження позасмугового випромінювання, що покращує характеристики системи. Стаття присвячена порівнянню сигналів CP-OFDM і F-OFDM.

Ключові слова: сигнали CP-OFDM, сигнали F-OFDM, спектральна густина потужності, sinc-фільтр, ймовірність помилки на біт.

PYATIN I.S., GAVRONSKIY V.E.

Khmelnyskiy Politechnic Professional College by Lviv Politechnic National University

LUZHANSKIY V.I., MIKHALCHUK V.O.

Khmelnyskiy National University

RESEARCH COMMUNICATION SYSTEMS WITH F-OFDM SIGNALS

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) signals are widely used in modern mobile standards. They have a number of disadvantages, such as the high ratio of peak power to average power (PAPR), large out-of-band components of the sinc shape spectrum, and the like. OFDM provides high spectrum efficiency due to orthogonal frequency multiplexing. To achieve orthogonality and avoid interference, it is necessary to align the signals of the transmitter and receiver in time and frequency. Imperfect synchronization can lead to suboptimal performance. Fifth generation (5G) communication systems promise several advantages over previous systems, including high data rates, ultra-low latency (URLLC), high spectral efficiency,

extensive connectivity, and increased energy efficiency. In addition, machine-type (MTC) and Internet of Things (IoT) communication is expected to be handled better and more efficiently by the 5G system. Multiplexing with orthogonal frequency division multiplexing and a filter (F-OFDM) is a multi-carrier signal that is received at the output of the filter. F-OFDM in comparison with OFDM provides reduction of out-of-band radiation that allows to use the allocated spectrum effectively. Filtration is an effective way to suppress side petals in OFDM. As the side lobes of the spectrum decrease, a large amount of signal power is concentrated in the main lobe, which helps to reduce interference between channels. The mathematical description of signals CP-OFDM, Windowed OFDM, Filtered OFDM in the field of time and frequency is analyzed in the work. A study of the transmission and reception of F-OFDM signals. The requirements for the filter and its characteristics in the field of time and frequency are given. The block diagrams of the transmitter and receiver are given. In F-OFDM, the CP-OFDM signal is passed through the developed filter. Because the filter bandwidth corresponds to the signal bandwidth, only a few subcarriers close to the boundary are affected. The key consideration is that the length of the filter may exceed the length of the cyclic prefix for F-OFDM. The resulting inter-character interference is minimized due to the design of the filter using windows. The received signal passes through a matched filter and then through a conventional CP-OFDM receiver. It takes into account both the increase in filtration and the delay before the FFT operation. The spectra of CP-OFDM and F-OFDM signals were compared. The dependences of the error error per bit on the signal-to-noise ratio for F-OFDM signals have been studied.

Keywords: CP-OFDM signals, F-OFDM signals, power spectral density, sinc filter, bit error ratio.

Постановка проблеми

Сигнали OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) широко використовуються у сучасних стандартах мобільного зв'язку. Вони мають ряд недоліків, таких як високе відношення пікової потужності до середньої потужності (PAPR), великі позасмугові компоненти спектру форми sinc, тощо. Оскільки OFDM забезпечує високу ефективність використання спектра за рахунок ортогонального частотного мультиплексування, його позасмугове випромінювання може бути неприйнятним без захисних смуг [1]. Зокрема, в 4G LTE близько 10% виділеної смуги пропускання зарезервовано як захисну смугу для уникнення завад між каналами. Щоб досягти ортогональності та уникнути міжсимвольних чи канальних завад, необхідно суворе вирівнювання за часом та частотою. Це призводить до ускладнень передачі сигналів для досягнення ідеальної синхронізації, особливо для передачі по висхідній лінії зв'язку. Недосконала синхронізація може призвести до неоптимальної продуктивності. Нове покоління систем мобільного зв'язку буде мати більш високі швидкості передачі даних, малу затримку та підтримку великої кількості пристроїв. Крім цього, очікується, що зв'язок машинного типу (MTC) та Інтернет речей (IoT) будуть оброблятися системою 5G краще та ефективніше. Мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і

фільтром (F-OFDM) є сигналом з декількома несучими, який отримують на виході добре спроектованого фільтра. F-OFDM порівняно з OFDM забезпечує зниження позасмугового випромінювання, що дозволяє ефективно використовувати виділений спектр.

Різноманітні системи п'ятого покоління (5G) мають низку переваг у порівнянні з попередніми системами, включаючи високу швидкість передачі даних, наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC), високу спектральну ефективність, широкі можливості підключення та підвищену енергоефективність [2]. Фільтрація - це перевірений та ефективний спосіб придушення бічних пелюсток у OFDM. Коли бічні пелюстки спектру зменшуються, велика потужність сигналу концентрується в головній пелюсті, що допомагає знизити потужність витоку у суміжному каналі.

Авторами роботи [1] встановлено, що оскільки OFDM забезпечує високу ефективність використання спектра за рахунок ортогонального частотного мультиплексування, його позасмугове випромінювання може бути неприйнятним без захисних смуг. Частотні та часові ресурси OFDM рівномірно розділені на декілька елементів рівного розміру для перенесення інформації. Щоб досягти ортогональності та уникнути міжсимвольних чи каналних завад, необхідно суворе вирівнювання за часом та частотою. Фільтрація - це перевірений та ефективний спосіб придушення бічних пелюсток у OFDM [2-5].

Аналіз останніх джерел

У роботах [1-3] було показано перевагу фільтрованого OFDM над звичайним OFDM з точки зору придушення бічних пелюсток. Автори створили математичну модель для системи OFDM з фільтром, і OFDM з багатшвидкісною фільтрацією. У зазначених роботах відсутні дані про залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для F-OFDM системи зв'язку з різними видами модуляції і ефективність систем F-OFDM.

Метою роботи є: дослідження блоків передачі і приймання сигналів F-OFDM, дослідження бітрової помилки систем зв'язку з сигналами F-OFDM при малих відношеннях сигнал-шум, дослідження спектральної ефективності F-OFDM у порівнянні з CP-OFDM.

Математичний опис сигналів мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів в області часу і області частоти

Радіочастотні завади, які є сигналом, випромінюваним небажаним передавачем, можуть погіршити характеристики приймача. Рівень потужності завад на вході приймача (вихід ПЧ) визначається виразом: [4]

$$I = P_T - L_{FL,T} + G_T + G_R - L_{FL,R} - L_{POL} - L_P - L_{FDR} \quad (1)$$

де - P_T вихідна потужність передавача в дБВт, $L_{FL,T}$ - втрати у фідерній лінії між виходом передавача і входом передавальної антени, G_T і G_R - коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен, $L_{FL,R}$ - втрати у фідерній лінії між виходом приймальної антени та входом приймача; L_{POL} - втрати через неузгодженість поляризації приймальної антени, L_P - втрати при поширенні (включаючи втрати через завади) між

передавальною та приймальною антеннами L_{FDR} - втрати через FDR (Frequency Dependent Rejection – частотно-залежне придушення).

FDR (Frequency Dependent Rejection) - це міра придушення, що створюється кривою вибіркості приймача на частотах небажаного випромінювання передавача. FDR визначається виразом:

$$L_{FDR} = 10 \lg \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) \Psi(f - \Delta f) df} \quad (2)$$

де $\Phi(f)$ - спектральна густина потужності (СГП) комплексної огибаючої сигналу радіозавад, $\Psi(f)$ - нормалізована частотна характеристика приймача, Δf - частотне зміщення між передавачем, що заважає, і приймачем. Для ідеального плоского відгуку $\Psi(f - \Delta f)$ для $\Delta f - W_v / 2 \leq f \leq \Delta f + W_v / 2$, FDR спрощується:

$$L_{FDR} = 10 \lg \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) df}{\int_{\Delta f - W_v / 2}^{\Delta f + W_v / 2} \Phi(f) df}, \quad (3)$$

де W_v - Смуга пропускання приймача. Площа СГП сигналу дорівнює потужності сигналу, і, таким чином, ми отримуємо рівняння: $P_T = 10 \lg \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) df$.

Спектральна густина потужності сигналів CP-OFDM

Переданий сигнал CP-OFDM основної смуги частот може бути описаний виразом:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} c_{n,k} p\left(t - n(T_s + T_g)\right) e^{-j2\pi k \frac{1}{N}(T_s + T_g)}, \quad (4)$$

де $c_{n,k}$ - комплексний символ даних, модульований на k -й піднесучій n -го символу OFDM, $p(t)$ - вікно формування імпульсу, $T_{tot} = T_s + T_g$ - загальна тривалість символу T_s і T_g - тривалість символу даних та захисний інтервал, відповідно.

У припущенні, що комплексні сигнали на кожній піднесучій є статистично незалежними та взаємно ортогональними, вираз СГП сигналу OFDM з довільною формою імпульсу задається виразом [5-6]:

$$\Phi_s(f) = \frac{P_s}{T_{tot}} \sum_{k=0}^{N-1} \left| P \left(f - \frac{k}{T_s} \right) \right|^2, \quad (5)$$

де P_s - дисперсія символів даних $c_{n,k}$, а також потужність однієї піднесучої OFDM, $1/T_s$ - інтервал між піднесучими; $P(f)$ - перетворення Фур'є вікна формування імпульсу. Застосуємо прямокутне формування імпульсу до (6), що визначається виразом:

$$p(t) = \Pi \left(\frac{t - T_{tot}/2}{T_{tot}} \right), \quad (6)$$

$$\text{де: } \Pi \left(\frac{t}{T_{tot}} \right) = \begin{cases} 0, & |t| > \frac{T_{tot}}{2} \\ \frac{1}{2}, & |t| = \frac{T_{tot}}{2} \\ 1, & |t| < \frac{T_{tot}}{2} \end{cases}$$

Використовуючи властивість зсуву перетворення Фур'є в області часу, $|P(f)|^2$ визначається виразом:

$$|P(f)|^2 = |F\{p(t)\}|^2 = \left| F \left\{ \Pi \left(\frac{t}{T_{tot}} \right) \right\} e^{-j\pi T_{tot} f} \right|^2 = T_{tot}^2 \text{sinc}^2(T_{tot} f), \quad (7)$$

де функція sinc визначається виразом: $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ для $x \neq 0$, інакше вона дорівнює одиниці.

Комбінуючи (7) та (9), СГП CP-OFDM з прямокутним формуванням імпульсів визначається виразом:

$$\Phi_s^{(CP)}(f) = P_s T_{tot} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \text{sinc} \left[\left(f - \frac{k}{T_s} \right) T_{tot} \right] \right\}^2. \quad (8)$$

Віконний OFDM

Для придушення позасмугових випромінювань віконне OFDM використовує функції згладжування часових вікон для формування імпульсу. Як типовий приклад використовується функція піднесеного косинуса $w_{rc}(t)$ тривалості $T_w = T_{tot} + T_{tr}$, яка визначається виразом: $p(t) = w_{rc}\left(t - \frac{T_{tot}}{2}\right)$,

$$w_{rc}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |t| < (T_{tot} - T_{tr}) / 2 \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{\pi (|t| - (T_{tot} - T_{tr}) / 2)}{T_{tr}} \right) \right), & (T_{tot} - T_{tr}) / 2 \leq |t| < (T_{tot} + T_{tr}) / 2, \\ 0, & (T_{tot} + T_{tr}) / 2 \leq |t| \end{cases} \quad (9)$$

де T_{tr} - час переходу.

Виходячи з (5) та (9), СГП віконного OFDM задається виразом:

$$\Phi_s^{(w)}(f) = P_s T_{tot} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \text{sinc} \left[\left(f - \frac{k}{T_s} \right) T_{tot} \right] \frac{\cos \left(\pi T_{tr} \left(f - \frac{k}{T_s} \right) \right)}{1 - 4T_{tr}^2 \left(f - \frac{k}{T_s} \right)^2} \right\}^2. \quad (10)$$

Фільтрований OFDM

Сигнал F-OFDM $x(t)$ виходить шляхом пропускання сигналу CP-OFDM (4) через фільтр. Таким чином, $x(t)$ визначається згорткою $s(t)$ та імпульсною характеристикою фільтра $h(t)$:

$$x(t) = s(t) * h(t) \quad (11)$$

Дія фільтра полягає у застосуванні функції часового вікна $w(t)$ до імпульсної характеристики фільтра:

$$h(t) = g(t) \cdot w(t), \quad (12)$$

де $g(t) = W_g \text{sinc}(W_g t)$.

Частотна характеристика $g(t)$ є прямокутним вікном з смугою пропускання W_g , тобто $\Pi(f/W_g)$. Для придушення позасмугових випромінювань базовий фільтр обмежується за рахунок застосування функцій часового вікна, таких як вікно Хеннінга, Хеммінга та Блекмана. Як типовий приклад приймається вікно Хеннінга тривалості T_w , задане наступним чином:

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi|t|}{T_w}\right), & |t| \leq \frac{T_w}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T_w}{2} \end{cases} \quad (13)$$

СГП відфільтрованого сигналу OFDM визначається виразом:

$$\Phi_x(f) = \frac{P_s T_{tot}}{16\pi^2} [2Si(\pi f_u) - 2Si(\pi f_l) + Si(\pi - \pi f_l) - Si(\pi - \pi f_u) + Si(\pi + \pi f_u) - Si(\pi + \pi f_l)]^2 \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \text{sinc} \left[\left(f - \frac{k}{T_s} \right) T_{tot} \right] \right\}^2 \quad (14)$$

де $f_u = T_w(f + W_g/2)$ і $f_l = T_w(f - W_g/2)$.

Експериментальні дослідження

Порівняємо модуляцію OFDM з фільтром (F-OFDM) із загальною модуляцією OFDM з циклічним префіксом (CP-OFDM) за допомогою Matlab. Для F-OFDM до символу OFDM в часовій області застосовується смуговий фільтр для обмеження спектра і зменшення позасмугового випромінювання сигналу з збереженням ортогональності піднесучих. Визначимо параметри для проведення моделювання:

- смуга пропускання: 10 МГц;
- розрядність ШПФ: 1024;
- кількість піднесучих в блоці ресурсів: 12;
- довжина циклічного префікса: 72 відліка.

Фільтрація для F-OFDM повинна задовольняти наступним критеріям:

- плоска смуга пропускання для піднесучих;
- різка перехідна смуга для мінімізації захисних смуг;
- достатнє загасання в смузі затримування.

Цим критеріям задовольняє фільтр з прямокутною частотною характеристикою, тобто сінк-імпульсною характеристикою. Фільтр нижніх частот реалізований з використанням вікна, яке ефективно обрізає імпульсну характеристику і виконує плавні переходи до нуля на обох кінцях [3].

Фільтр прямої форми з кінцевою імпульсною характеристикою, спроектований у Матлаб містить:

- помножувачі – 511;
- підсумовувачі – 510.

Імпульсна характеристика фільтра представлена на рис. 1, АЧХ фільтра представлена на рис. 2.

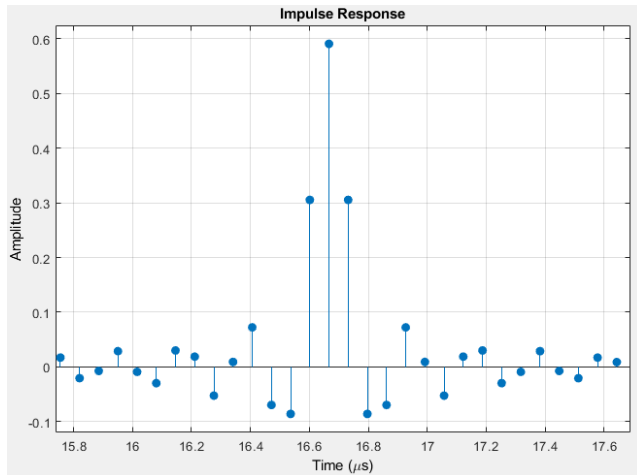


Рис. 1. Імпульсна характеристика формуючого фільтра

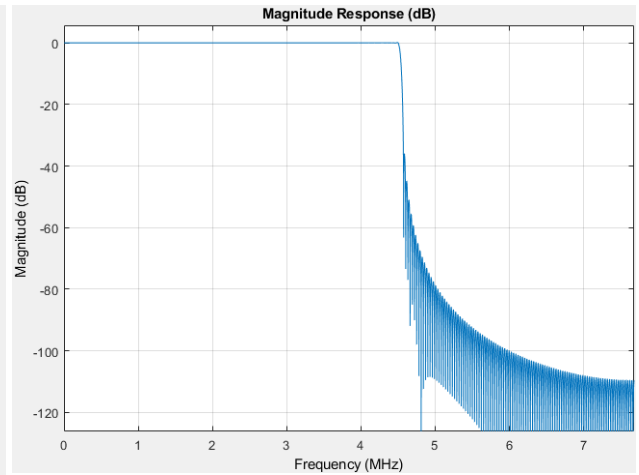


Рис. 2. АЧХ формуючого фільтра

Передавач сигналу F-OFDM

У F-OFDM сигнал CP-OFDM пропускається через розроблений фільтр. Оскільки смуга пропускання фільтра відповідає смузі пропускання сигналу, зачіпаються тільки декілька піднесучих, близьких до границі. Ключовим міркуванням є те, що довжина фільтра може перевищувати довжину циклічного префікса для F-OFDM [1]. Міжсимвольні завади зводяться до мінімуму завдяки конструкції фільтра з використанням вікон.

Структурна схема передавача F-OFDM представлена на рис. 3.

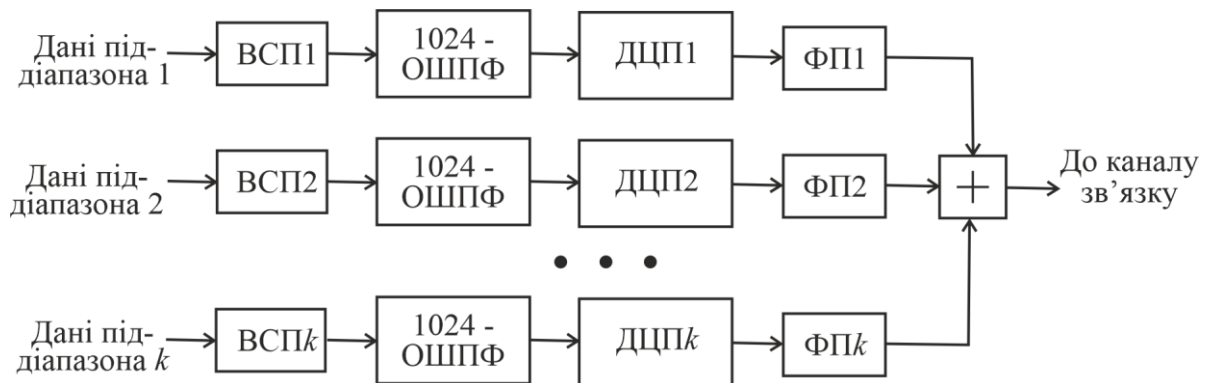


Рис. 3 – Передавач F-OFDM (ВСП – відображення символів піддіапазона; 1024-ОШПФ – 1024-точкове обернене швидке перетворення Фур'є; ДЦП – додавання циклічного префікса; ФП – фільтр піддіапазона)

Порівняння спектральних густин сигналів F-OFDM і CP-OFDM представлено на рис. 4.

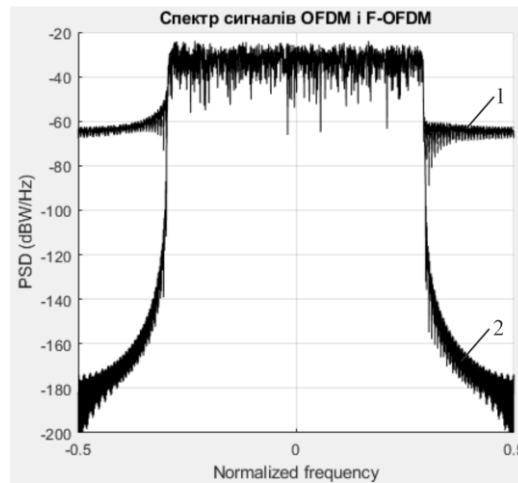


Рис. 4. Спектральна густина сигналів: 1 – CP-OFDM; 2 - F-OFDM

Порівнюючи графіки спектральних густин для схем CP-OFDM і F-OFDM, можна сказати, що сигнал F-OFDM має більш низькі (на 130 дБ) бічні пелюстки, ніж OFDM. Це зменшує позасмугове випромінювання і дозволяє ефективніше використовувати виділений спектр, що призводить до збільшення спектральної ефективності.

Приймач сигналу F-OFDM

Прийнятий сигнал проходить через узгоджений фільтр, а потім через звичайний приймач CP-OFDM. Циклічний префікс враховує як наростання сигналу при фільтрації, так і затримку для операції ШПФ.

Операції обробки на боці приймача F-OFDM показані на рис. 5.

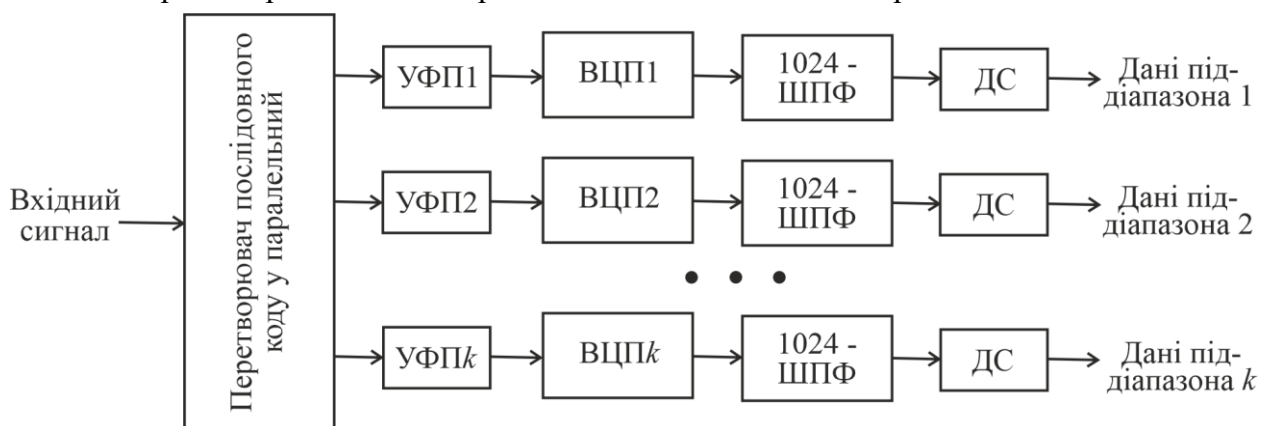


Рис. 5. Структурна схема приймача сигналу F-OFDM (УФП – узгоджений фільтр піддіапазона; ВЦП – видалення циклічного префікса; 1024-ШПФ – 1024-точкове швидке перетворення Фур'є; ДС – детектування сигналу)

Для формування сигналу F-OFDM додається етап фільтрації до існуючої обробки CP-OFDM як на передавальному, так і на приймальному боці.

Результати проведеного дослідження залежностей ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для F-OFDM системи зв'язу з різними видами модуляції приведені на рис. 6. Дослідження залежностей ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для F-OFDM і CP-OFDM систем зв'язу з модуляцією QPSK приведені на рис. 7.

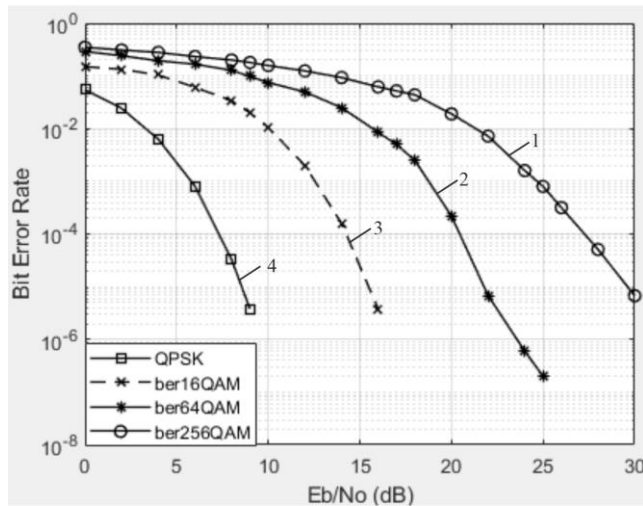


Рис. 6. Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для F-OFDM системи зв'язу з модуляцією (1 – 256QAM; 2 – 64-QAM; 3 – 16QAM; 4 – QPSK)

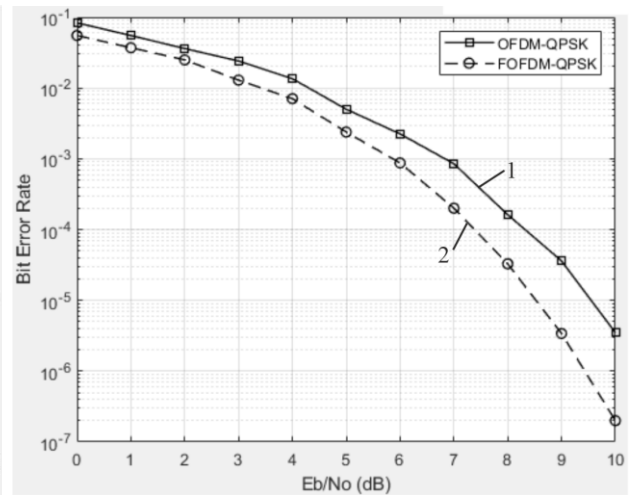


Рис. 7. Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для: 1 – CP-OFDM системи зв'язу з модуляцією QPSK; 2 – F-OFDM системи зв'язу з модуляцією QPSK

Висновки

У статті проаналізований математичний опис сигналів мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (CP-OFDM, віконний OFDM, F-OFDM) в області часу і області частоти. Спроекований формуючий КІХ фільтр з смугою пропускання 10 МГц, що обмежує спектр на боці передавача і боці приймача. Проведене порівняння модуляції F-OFDM з модуляцією CP-OFDM. Порівнюючи графіки спектральних густин для схем CP-OFDM і F-OFDM, можна сказати, що сигнал F-OFDM має більш низькі (на 130 дБ) бічні пелюстки, ніж OFDM. Це зменшує позасмугове випромінювання і дозволяє ефективніше використовувати виділений спектр, що призводить до збільшення спектральної ефективності. Проведене дослідження залежностей ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для F-OFDM системи зв'язу з різними видами модуляції. Це дозволяє зробити висновок, що найбільш ефективним є використання модуляції QPSK. Для збільшення швидкості передачі інформації у 4 рази (з 2 біт на символ – QPSK до 8 біт на символ – 256QAM) необхідно збільшувати відношення сигнал-шум на боці приймача на 22 дБ для $BER=10^{-6}$. Проведене дослідження залежностей ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для CP-OFDM і F-OFDM систем зв'язу з модуляцією QPSK. Це дозволяє зробити висновок, що F-OFDM на 1 дБ ефективніше, ніж CP-OFDM для $BER=10^{-6}$.

Література

1. Xi Zhang, Ming Jia, Lei Chen, Jianglei Ma, and Jing Qiu, "Filtered-OFDM – Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks", in Proc.2015 IEEE GLOBECOM, San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
2. Hugu Tulberg et'al "The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements", IEEE Communications Magazine Volume: 54, Issue: 12, Dec 2016.
3. J. Park, E. Lee, S. Park, S. Raymond, S. Pyo and H. Jo, "Modeling and Analysis on Radio Interference of OFDM Waveforms for Coexistence Study," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35132-35147, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896280.

4. Пятін І.С. Моделювання спотворень сигналу у каналі передачі/ І.С. Пятін, Д.А. Макаришкін // Вісник ХНУ. - 2020. - №5. – С. 39-45.
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. Пятін І.С. Дослідження низхідної лінії зв'язку 5G / І.С. Пятін, Ю.М. Бойко // Праці VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негаусівських процесів» 25-26 травня 2021 р., м Черкаси, 2021 – с.68-70
8. J. Boiko, V. Tolubko, O. Barabash, O. Eromenko and Y. Havrylko, "Signal processing with frequency and phase shift keying modulation in telecommunications", *Telkommika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, no 4, pp. 2025-2038, August 2019.
9. Бойко Ю.М. Особливості квазікогерентної обробки сигналів у засобах телекомунікацій з частотною маніпуляцією / Ю.М. Бойко, І.С. Пятін // Телекомунікаційні та інформаційні технології №1, 2018 – С. 107-119.
10. 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 : Логос, 2018. – 227 с. URL: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6291>.
11. B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, and O. Eromenko, "Increasing the efficiency of information transmission in communication channels," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 3, September 2020, pp. 1306-1315. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1306-1315>.

References

1. Xi Zhang, Ming Jia, Lei Chen, Jianglei Ma, and Jing Qiu, "Filtered-OFDM – Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks", in Proc.2015 IEEE GLOBECOM, San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
2. Hugu Tulberg et'al "The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements", *IEEE Communications Magazine* Volume: 54, Issue: 12, Dec 2016.
3. J. Park, E. Lee, S. Park, S. Raymond, S. Pyo and H. Jo, "Modeling and Analysis on Radio Interference of OFDM Waveforms for Coexistence Study," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35132-35147, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896280.
4. Piatin I.S. Modeliuvannia spotvoren syhnalu u kanali peredachi/ I.S. Piatin, D.A. Makaryshkin // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. - 2020. - №5. – S. 39-45.
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 tekhnolohii 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. Piatin I.S. Doslidzhennia nyzkhidnoi linii zviazku 5G / I.S. Piatin, Yu.M. Boiko // Pratsi VIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Obrobka syhnaliv i nehausivskykh protsesiv» 25-26 travnia 2021 r., m Cherkasy, 2021 – s.68-70

8. J. Boiko, V. Tolubko, O. Barabash, O. Eromenko and Y. Havrylko, "Signal processing with frequency and phase shift keying modulation in telecommunications", *Telkommika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, no 4, pp. 2025-2038, August 2019.

9. Boiko J. M. Osoblyvosti kvazikoherentnoi obrobky syhnaliv u zasobakh telekomunikatsii z chastotnoiu manipuliatsiieiu / J.M. Boiko, I.S. Piatin // *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii* №1, 2018 – S. 107-119.

10. Boiko J. M. Teoretychni aspekty pidvyshchennia zavadostiikosti y efektyvnosti obrobky syhnaliv v radiotekhnichnykh prystroiakh ta zasobakh telekomunikatsiinykh system za naiavnosti zavad : monohrafija / J. M. Boiko, V. A. Druzhinin, S. V. Tolyupa. – Kyjiv : Loghos, 2018. – 227 s. URL: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6291>.

11. B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, and O. Eromenko, "Increasing the efficiency of information transmission in communication channels," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 3, September 2020, pp. 1306-1315. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1306-1315>.

Надійшла / Paper received : заповнюється редакцією

Надрукована/Printed : заповнюється редакцією

ДОВІДКА № 11/27-1

Затверджує те, що стаття «**ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З СИГНАЛАМИ F-OFDM**» авторів **ПЯТІН І.С., ГАВРОНСЬКИЙ В. Є.** (Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка») та **ЛУЖАНСЬКИЙ В.І., МИХАЛЬЧУК В. О.** (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: 11%

ID: 98088 Назва: Магістерська кваліфікаційна робота Додано в БД: 2021-12-06 Автора: Михальчук В.О. Керівники: Лужанський В.І. Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	108994	853	1282 (1%)	15 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми



Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1009534882

Дата перевірки:
06.12.2021 09:49:36 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet

Дата звіту:
06.12.2021 10:06:44 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: Михальчук-антиплагіат

Кількість сторінок: 84 Кількість слів: 16084 Кількість символів: 119497 Розмір файлу: 3.10 MB ID файлу: 1009496511

3.3% Схожість

Найбільша схожість: 1.6% з Інтернет-джерелом (<http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/30-5.p>).

3.3% Джерела з Інтернету

97

Сторінка 86

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

8

ВІДГУК

на дипломну роботу магістра Михальчука В.О.

«Моделювання фізичного низхідного каналу для мобільного зв'язку
п'ятого покоління»

Актуальність дипломної роботи обумовлена стрімким розвитком систем зв'язку і вимогам до підвищення якості зв'язку.

В роботі проведені особливості систем зв'язку п'ятого покоління, приведена структура сигналів фізичного низхідного каналу. Виконано моделювання передачі сигналів фізичним низхідним спільним каналом зв'язку.

Перший розділ присвячений вивченню архітектури 5G, яка складається з трьох частин: мережі радіодоступу, транспортної мережі та опорної мережі. Транспортна інфраструктура - це частина комплексної системи оператора, де всі модулі повинні вбудовуватися в систему управління. Зроблений висновок, що епоха розвитку 5G і хмарних технологій передбачає, що хмарні обчислення, великі дані і штучний інтелект будуть інтегруватися з метою інтелектуальної модернізації підприємств і галузей.

Другий розділ присвячений дослідженню фізичного низхідного каналу зв'язку. Смуги частот міліметрового діапазону можна вважати як один з основних аспектів 5G, оскільки він розглядається як фактор, що сприяє виконанню вимог до продуктивності 5G. Фазовий шум стає більшим для частот міліметрового діапазону, а затримка каналу стає меншою. Опорний сигнал відстеження фази (PT-RS) використовується для оцінки і компенсації фазового шуму генератора для діапазонів частот вище 6 ГГц.

Третій розділ присвячений дослідженню фізичних каналів систем зв'язку п'ятого покоління. Канал DCI (інформація управління низхідним каналом) - це інформація керування низхідним каналом зв'язку: можуть бути визначені наступні етапи кодування, які включають мультиплексування інформаційних елементів, приєднання CRC, каналне кодування і узгодження швидкості. Канал довільного доступу використовується для доступу до мережі або

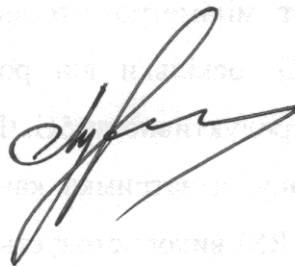
відправки запитів на планування. При підключенні обладнання користувача до мережі 5G, воно повинно синхронізуватися як по низхідній, так і по висхідній лінії зв'язку. Синхронізація низхідної лінії зв'язку досягається після успішного декодування SSB. Щоб встановити синхронізацію висхідної лінії зв'язку, обладнання користувача має виконати процедуру довільного доступу RACH.

Четвертий розділ присвячений дослідженню передачі сигналів фізичним низхідним спільним каналом зв'язку. Зроблений висновок, що взаємозв'язок між рознесенням піднесучих OFDM і фазовим шумом ефективно досліджувати тільки тоді, коли CPE фазового шуму скомпенсовано належним чином. З огляду на фазовий шум, великий інтервал між піднесучими може допомогти підвищити продуктивність EVM, коли велика смуга пропускання до декількох ГГц повинна підтримуватися на більш високих частотах. Для більш високих частот набір рознесення піднесучих показує занадто великий розрив в характеристиках EVM між значеннями рознесення сусідніх піднесучих.

Результати дипломної роботи опубліковані у журналі «Вісник ХНУ».

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

Канд. військ. наук, доц.



Лужанський В.І.

Рецензія опонента

на дипломну роботу магістра Михальчука В.О. за темою:

«Моделювання фізичного низхідного каналу для мобільного зв'язку п'ятого покоління»

З вдосконаленням мобільних засобів телекомунікацій підвищується швидкість передачі інформації, якість зв'язку, зменшується затримка, з'являються нові функції. Організуючи дані за різними каналами, система зв'язку 5G здатна впорядковано управляти передачею даних, тому тема роботи актуальна.

Наукова новизна полягає у оцінці енергетичної ефективності передачі сигналів низхідною лінією зв'язку з різними видами модуляції.

Перший розділ присвячений вивченню архітектури 5G, яка складається з мережі радіодоступу, транспортної мережі та опорної мережі. Зроблений висновок, що епоха розвитку 5G передбачає, що хмарні обчислення, великі дані і штучний інтелект будуть інтегруватися з метою інтелектуальної модернізації підприємств і галузей.

Другий розділ присвячений дослідженню фізичного низхідного каналу зв'язку. Смуги частот міліметрового діапазону можна вважати як один з основних аспектів 5G. Фазовий шум стає більш відчутним для частот міліметрового діапазону, а затримка каналу стає меншою. Опорний сигнал відстеження фази (PT-RS) використовується для оцінки і компенсації фазового шуму генератора.

Третій розділ присвячений дослідженню фізичних каналів систем зв'язку п'ятого покоління. Канал DCI (інформація управління низхідним каналом) - це інформація керування низхідним каналом зв'язку. Канал довільного доступу використовується для доступу до мережі або відправки запитів на планування. При підключенні обладнання користувача до мережі 5G, воно повинно синхронізуватися як по низхідній, так і по висхідній лінії зв'язку. Синхронізація низхідної лінії зв'язку досягається після успішного декодування SSB. Щоб встановити синхронізацію висхідної лінії зв'язку, обладнання користувача має виконати процедуру довільного доступу RACH.

Четвертий розділ присвячений дослідженню передачі сигналів фізичним низхідним спільним каналом зв'язку. Досліджена залежність величини вектора помилки (EVM) від відношення сигнал-шум НЛЗ з різною модуляцією. З отриманих залежностей

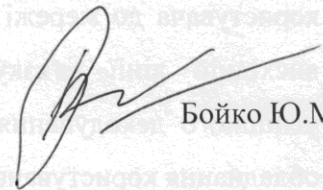
можна зробити висновок, що модуляція QPSK у каналі низхідної лінії зв'язку підвищує завадостійкість, але має найвищу величину вектора помилки (ВВП). Тому при проектуванні виходять з компромісу між бажаною швидкістю передачі даних і допустимою величиною вектора помилки. Найменший ВВП має модуляція 256QAM при малих відношеннях сигнал-шум, але вона потребує збільшення потужності передавача на 17 дБ у порівнянні з QPSK. Дослідження ймовірності бітової помилки (BER) в залежності від відношення сигнал-шум (E_b/N_0). Найбільшу ефективність має модуляція QPSK. При збільшенні швидкості інформації з 2 біт на символ до 8 біт на символ потрібно збільшити відношення сигнал-шум на 22 дБ. Дослідження ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигнал-шум (E_b/N_0) для систем зв'язку з QPSK. Системи зв'язку з F-OFDM на 1 дБ ефективніше, систем зв'язку з CP-OFDM.

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 повний аналіз сигналів фізичного низхідного каналу в середовищі Матлаб.

В цілому, магістерська робота виконана на сучасному науково-технічному рівні і заслуговує оцінку «добре», а Михальчук В.О. – 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

Мартинюк В.В.

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

Михальчук В.О.

ч. ТРМ-20-1

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.

2.12.2021

дата

Михальчук В.О.
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: Модельовані вивірки м'язової мускулатури людини
 Автор: Модельовані вивірки м'язової мускулатури людини
 Спеціальність: Телекомунікації та радіотехніка
 Освітня програма: _____
 Науковий керівник: Луканський В.І.
 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.	Вігноріає
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 дорацьована 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:

5.12.2021р

5.12.2021р
Дата

Науковий керівник роботи Луканський В.І.
 Зав. каф. АКІТ Маринчук В.В.
 Підписи