

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»**

**Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра**

студента Парфьонова Сергія Володимировича
 академічної групи 172м-22з-1
 спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 спеціалізації¹ _____
 за освітньо-професійною програмою Телекомунікації та радіотехніка
 на тему «Імітаційне моделювання технологій самоорганізованих мереж SON
для мереж мобільного зв'язку 5G»

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
розділів:	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
спеціальний	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
економічний	к.е.н., доц. Романюк Н.М.			
Рецензент				
Нормоконтролер	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			

м. Дніпро
2023 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
безпеки інформації та телекомунікацій
_____ д.т.н., проф. Корнієнко В.І.

« _____ » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

студенту _____ Парфьонову С.В. _____ академічної групи 172М-22з-1
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності _____ 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою _____ Телекомунікації та радіотехніка

на тему _____ «Імітаційне моделювання технологій самоорганізованих мереж SON
для мереж мобільного зв'язку 5G»

Затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
Стан питання. Постановка задачі	<i>Аналітичний погляд на літературу та публікації існуючі рішення на тему проекту</i>	<i>Вересень 2023 р</i>
Спеціальна частина	<i>Принцип роботи технологій самоорганізованих мереж SON для мереж мобільного зв'язку 5G». Розробка моделі у середовищі MATLAB. Оформлення пояснювальної записки.</i>	<i>Жовтень 2023 р</i>
Економічний розділ	<i>Розрахунок капітальних витрат</i>	<i>Листопад 2023 р</i>

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Гусєв О.Ю.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: 03 вересня 2023 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії: _____

Прийнято до виконання _____
(підпис студента)

Парфьонов С.В.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 137 с., 73 рис., 25 табл., 2 додатка, 17 джерел.

Об'єкт розробки: процес передачі обслуговування в межах бездротової мережі 5G на базі технології SDN.

Предмет розробки: методи забезпечення неперервної передачі обслуговування в межах бездротової мережі 5G на базі технології SDN.

Мета дипломного проекту: дослідження методів передачі обслуговування в системах мобільного зв'язку 5G на базі технології SDN.

Основним методом дослідження у цій роботі буде зміна концепції побудови архітектури стільника мобільного зв'язку за допомогою технологій самоорганізованих мереж SON.

Основним результатом та їх новизна у цій роботі буде: Конфігурація та обслуговування численного мережного обладнання, серверів та роутерів за такої щільності розгорнутої мережі 5G.

Основні техніко-експлуатаційні характеристики та показники будуть перебувати у точності прогнозування точності передачі даних 60% проти 75%.

Як галузь застосування запропонована концепція SDN буде роз'єднує дані і керує шарами за допомогою програмних компонентів для мобільних мереж 5G.

В першому розділі наведено базові терміни та основи мереж 5G. Також наведено опис базових структур програмно-конфігурованих мереж.

У другому розділі зроблено аналіз існуючої технології для мереж мобільного зв'язку 5G. Проведено дослідження затримок в мережі 5G на базі технології SDN. Проведено імітаційне моделювання технологій самоорганізованих мереж SON. Були проведені порівняльні характеристики.

У третьому розділі розроблено економічне обґрунтування актуальності використання запропонованої технології.

ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІ МЕРЕЖІ, SDN, 5G, OPENFLOW

ABSTRACT

Explanatory note: pp. 137, Fig. 73, Table 25, Append. 2, sources 17.

Object of development: the process of transferring services within a 5G drone-free network based on SDN technology.

Subject of the study: methods for ensuring uninterrupted transmission of services within a 5G drone-free network based on SDN technology.

Meta of the thesis project: research on methods of service transfer in 5G mobile communication systems based on SDN technology.

The main method of researching this robot will be to change the concept of the architecture of the mobile communication system for the additional technology of self-organizing networks SON.

The main result of this novelty of this robot will be: Configuration and maintenance of the digital network, servers and routers for such a high-volume 5G network.

The main technical and operational characteristics and indicators will have an accuracy of prediction of data transmission accuracy of 60% versus 75%.

As a result, the concept of SDN will be based on the data and distribution of balls using additional software components for 5G mobile networks.

The first section introduces the basic terms and basics of 5G. A description of the basic structures of software-configured networks has also been provided.

Another section contains an analysis of basic technologies for 5G mobile communications. The back-ends in the 5G network based on SDN technology were monitored. Simulation modeling of the technology of self-organizing SON measures was carried out. The equal characteristics were carried out.

The third section includes an economical explanation of the relevance of the newly developed technology.

SOFTWARE-CONFIGURED NETWORKS, SDN, 5G, OPENFLOW

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЦОД або ЦХОД (data center) - центр (зберігання та) обробки даних, об'єкт, що є пов'язаною системою ІТ-інфраструктури, підключений до зовнішніх мереж, як інженерних, так і телекомунікаційних;

BS (Base station) – базова станція;

BYOD (Bring your own device) - це ІТ-політика, згідно з якою співробітникам дозволено або рекомендується використовувати особисті мобільні пристрої (телефони, планшети, ноутбуки) для доступу до корпоративних даних та систем;

CDMA (Code-division multiple access) - технологія радіозв'язку, при якій канали передачі мають загальну смугу частот, але різні послідовності, що кодують;

C-RAN - централізована архітектура для мобільних мереж радіодоступу;

DOS (Denial-of-service attack) - атака на відмову в обслуговуванні;

eMBB (Enhanced Mobile Broadband) - розширений мобільний широкопasmовий зв'язок;

E2E (End-to-end, E2E, Chain testing) - наскрізне тестування;

Handoff - процес передачі обслуговування абонента під час виклику чи сесії передачі від однієї базової станції до іншої (переадресація);

ІКС - інформаційно-комунікаційна система;

IoT (Internet of Things, IoT) – інтернет речей;

NFV (Network function virtualization) – віртуалізація функцій мережі;

NGN (Next Generation Network) – мультисервісна мережа зв'язку;

OpenFlow - протокол управління процесом обробки даних, що передаються мережею передачі даних маршрутизаторами і комутаторами, що реалізує технологію програмно-конфігурованої мережі;

RAN (radio access network) - мережі радіодоступу **NBI** (North Bound interface) – північний інтерфейс;

SDN (Software-Defined Networking) - програмно-конфігуровані мережі;

URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Cellular network) - надзвичайно надійна мобільна мережа;

Wi-Fi (Wireless Fidelity, Wi-Fi, WiFi) - бездротова точність.

3GPP - стандарт з вдосконалення UMTS для задоволення майбутніх потреб у швидкості;

5G - 5-е покоління мобільних мереж.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	12
1.1 Аналіз способів побудови мобільного радіозв'язку стільникової системи.....	19
1.1.1 Етапи розробки стандартів бездротового зв'язку.....	19
1.1.2 Специфікації, що визначають стандарти та роботу 3GPP.....	23
1.1.3 Новаторські мережеві технології 5G.....	25
1.2 Аналіз технологічних вимог до стандартів 5G мереж.....	27
1.2.1 Особливості та технологічні вимоги до мереж 5G.....	29
1.2.2 Особливості вимог до технологій SON при застосуванні у мережах 5G.....	32
1.2.3 Аналіз проблем у технології 5G мереж.....	34
1.3 Аналіз основних технологічних напрямів розвитку мереж 5G.....	41
1.3.1 Розвиток сервісної системи 5G.....	42
1.3.2 Розвиток системи радіоінтерфейсу для мереж 5G.....	44
1.3.3 Аналіз категорій використання 5G мереж.....	48
1.3.4 Аналіз перспектив розвитку технології та архітектура мережі 5G.....	50
1.4 Аналіз перспектив розвитку віртуалізації у мережах 5G.....	52
1.4.1 Оцінки ринку віртуалізації.....	53
1.4.2 Переваги віртуалізації.....	53
1.5 Аналіз впровадження технологій SON у мережах 5G.....	55
1.5.1 Аналіз перспектив розвитку самоорганізації супутникової мережі 5G.....	56
1.5.2 Побудова логічної моделі у мережах 5G.....	57
1.5.3. Побудова архітектури мережи на основі SDN технології.....	60
1.5.4 Побудова алгоритму роботи SON у мережах 5G.....	63

1.5.5	Балансування навантаження у мережі LTE-SON за рахунок використання властивостей самоорганізації.....	69
1.5.6	Аналіз застосування протоколу OpenFlow у мережах 5G концепції SDN.....	70
1.6	Висновки першого розділу.....	72
РОЗДІЛ 2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....		73
2.1	Розробка системи модулювання моделі.....	73
2.1.1.	Застосування технології Network Slicing для поділу мобільної мережі на логічні кулі нейромережі.....	73
2.1.2	Розробка системи імітаційного моделювання мережі 5G.....	78
2.1.3.	Розробка моделі самоорганізованих мереж SON для хмарного простору Edge.....	81
2.2	Математичний розрахунок моделі.....	81
2.2.1	Matlab – короткий опис.....	82
2.2.2.	Додаткові можливості Matlab	82
2.2.3	Моделювання покоління 5G мережі у MATLAB Simulink.....	83
2.2.4	Проектування бездротової системи в Matlab.....	95
2.3	5G в MIMO – формування архітектури.....	105
2.4	Покращення SNR і пропускної здатності бездротового зв'язку за допомогою антенних решіток.....	107
2.5	Канал SIMO LOS.....	109
РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....		114
3.1	Актуальність впровадження бізнес-плану мереж SON для стандарту 5G.....	114
3.2	Організація та планування робіт для мереж SON.....	115
3.3.	Аналіз ринкових можливостей запропонованого проекту.....	116
3.4.	Розроблення маркетингової програми проекту.....	117
3.5	Визначення трудомісткості розробки моделі.....	122
3.6	Розрахунок витрат на розробку моделі.....	124

3.7 Розрахунок капітальних витрат	125
3.8 Висновки третього розділу	128
ВИСНОВКИ.....	129
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	131
Додаток А.....	133
Додаток Б.....	135
Додаток В.....	136

ВСТУП

Сучасні тенденції, такі як зростання числа підключених до Інтернету пристроїв, експоненційне зростання обсягів інформації, розвиток хмарних технологій, BYOD, великі дані, що на увазі змінюють корпоративний телевізор. Йде нарощування обсягів мережного трафіку, і бізнес все частіше виникає потреба конфігурувати великомасштабні мережі.

Спростити це завдання можуть технології програмно-конфігурованих мереж SDN (Software-Defined Networking) та функціональної віртуалізації мереж NFV (Network Function Virtualization), що дозволяють перевести мережеві елементи під контроль програмного забезпечення, зробити їх більш інтелектуальними, полегшити керування ними. [8]

Традиційне керування мережами зазвичай потребує налаштування кожного пристрою, підключеного до мережі, окремо. Наприклад, конфігурація списку контролю доступу віртуальної частини локальної мережі (VLAN access control list) на кількох комутаторах Cisco неминуче спричиняє вхід та виконання необхідних налаштувань. Подібний підхід успішно працював у минулому, але може стати таким, що вимагає значних тимчасових витрат, коли організації додадуть в мережі пристрої, принесені співробітниками, і численні хмарні сервіси.

SDN може допомогти, тому що мета управління мережею - дозволяти різним пристроям (неважливо - чи належать компанії, співробітникам, а також різним виробникам) підключатися до мереж і використовувати їх ресурси з обмеженнями, заснованими на принципах "хто-що-як-чому". підключення Це вимагає постійного застосування політик серед усіх пристроїв. Надалі змінюючий політики адміністратор не буде змушений проводити годинник, роблячи зміни в кожному пристрої окремо, і ці зміни повинні узгоджуватися по всьому підприємству. Ось у чому роль SDN. Вони надають узгоджене, відносно швидке керування мережами, дозволяючи зміни по всій мережі з єдиної консолі керування.

Також важливо, що механізм віртуалізації мереж побудований на базі вільного програмного забезпечення, що дозволяє мережним адміністраторам

швидше та ефективно управляти великими потоками даних з однієї консолі. Віртуалізація руйнує бізнес-виробників серверів: сьогодні немає сенсу купувати новий сервер для нової програми, тож вартість заліза вже не можна підвищувати. Виробникам потрібно шукати нові джерела доходів, наприклад, краще адаптувати свої продукти до віртуалізації, і сьогодні продукти багатьох компаній спочатку оптимізовані до роботи гіпервізорів. З появою SDN аналогічна ситуація спостерігатиметься і на ринку мережевого обладнання – мережна віртуалізація покликана зняти фундаментальне для розвитку хмар обмеження їх масштабування. Вручну можна керувати мережами всередині кількох кластерів, що знаходяться в рамках одного ЦОДу, проте коли таких кластерів багато і вони територіально рознесені, то завдання ускладнюється багаторазово. Коли йдеться про організацію взаємодії між різними ЦОД, то це якраз поле для компанії Cisco. [3].

SDN ставить перед виробниками мережевого обладнання нові завдання щодо підтримки нових сценаріїв роботи з хмарами, наприклад, забезпечення можливості передачі безлічі пакетів на великі відстані. Разом з тим, VMware планує випустити незалежні від виробників апаратного забезпечення системи віртуалізації мережевого обладнання.

1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.

На мій погляд майбутній напрямок розвитку у сфері зв'язку та телекомунікацій України все більшою мірою буде зосереджено на розробці мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління 5G, особливістю даних мереж є застосування нових діапазонів радіочастот покриття FR2, використання у складі базових станцій систем Massive MIMO, використання технологій неортогонального множинного доступу (NOMA) та N-OFDM-сигналів, що у свою чергу дає можливість підвищення швидкості передачі даних – до 10 Гбіт/с. і дає можливість у разі збільшує кількість абонентів, що обслуговуються. Так само 5G мережа широко надає можливість забезпечення гнучкості архітектури для функціонування різноманітних додатків та хмарних сервісів. [11].

Максимальне надання всього сервісу мобільного зв'язку, його швидке відновлення на деокупованих територіях, активний розвиток та інтеграція в Європейський інформаційний простір, неможлива без застосування технологій програмно-конфігурованої мережі SDN та віртуалізації мережевих функцій NFV.

Цілі та завдання магісторської роботи:

- будуть розкриті способи моделювання алгоритмів SON;
- будуть проведені та описані експерименти та підведені висновки під час роботи з алгоритмами SON
- буде розроблено та запропоновано оптимальну модель організації сегменту мережі під управлінням протоколу OpenFlow та формату пакетів з урахуванням можливостей з управління рівнем передачі даних.
- буде проаналізовано отримані характеристики затримки та пропускну здатності змодельованого сегмента мережі, які демонструють перевагу SDN мереж при використанні запропонованого формату пакетів, що управляють.

Актуальність теми обраною магістерської роботи

У сучасному світі та у світовій економіці телекомунікаційна галузь все

активніше впроваджується у всі сфери життя та економіки, а використання нового п'ятого покоління мобільного зв'язку 5G відіграє в цьому процесі ключову роль.

У 2022 році світовий ринок виділив на розвиток мереж п'ятого покоління 5G понад \$1,7 млрд євро. Витрати оборонного комплексу на 5G-мережі у світі становили \$765,2 млн євро. У 2022 році мережі 5G, запустили як свою основну послугу 223 оператори в 79 країнах світу. Разом із 5G найактивніше використовуються штучний інтелект та штучну реальність VR/AR, що дає активний поштовх розвитку не лише телекомунікаційної, а й інших галузей економіки. Сучасні статистики та аналітики стверджують, що світовий ринок Software-Defined Networks щорічно збільшується більш ніж на 75%. [13].

Актуальна ситуація в Україні станом на кінець першого півріччя 2023 року, пов'язана з тривалим ковідним періодом, військовою агресією з боку Російської Федерації (Московії), викликає потреби нових технологій мобільного широкопasmового доступу, що стрімко зростає.

Ця тенденція продовжуватиме активно розвиватися і надалі, оскільки залишається велика потреба у проведенні процесів дистанційного навчання, віддаленої роботи, управління бізнесу та технологіями виробництва, процесами логістики в тому числі військової техніки та аграрних «зернових коридорів». У багатьох деокупованих територіях мобільний зв'язок на сьогоднішній день є єдиним джерелом отримання інформації та засобом оповіщення для громадянського населення, єдиним способом проведення фінансових операцій, онлайн-сервісів та державних програм.

Також у процесі майбутнього відновлення та розвитку інфраструктури України застосування 5G технологій у телекомунікаційній галузі сприятиме економічному розвитку та зростанню цифрової економіки в цілому, за рахунок автоматизації та впровадження нових технологій у різних сферах економіки та діяльності людини.

Майбутній розвиток ІТ технологій в Україні, перспективні розробки вчених, інженерів більшою мірою будуть пов'язані з вирішенням завдання створення штучного інтелекту та його застосування в тому числі і для технологій

телекомунікаційної галузі. у тому числі й мобільних мереж.

Даний напрямок у сукупності з автоматизацією процесів може вирішити багато існуючих завдань щодо створення мережевої архітектури та інфраструктури, бізнес-моделей та абонентських пристроїв телекомунікацій у післявоєнний період.

Об'єкт дослідження магістерської роботи:

Об'єкт дослідження в даній магістерській роботі буде мережі 5G, які надає величезні можливості такі як:

- наявність необхідних частот із можливістю використання переваг SDN;
- бездротовий зв'язок зі збільшеною швидкістю бездротової передачі даних та пропускнуою здатністю;
- мережу із значно скороченою повною затримкою та зниженим споживанням енергії;
- розгалужену мережу зі швидкістю передачі даних у значеннях від 1 до 10 Гбіт/с у реальних мережах, що майже в 10 разів більше, ніж теоретична пікова швидкість передачі даних у мережі LTE, яка нині не перевищує 150 Мбіт/с;
- мобільну мережу із симетричною затримкою на рівні не більше 1 мс, тобто майже в 10 разів менше, ніж у мережах стандарту 4G;
- інформаційну мережу з кращою пропускнуою здатністю у перерахунку на одиничну площу покриття та величезну кількість підключених пристроїв;
- мережі стандарт 5G, дають можливість активно розвивати доповнену реальність інтернет речей (IoT), інтернет транспортних засобів (IoV), зв'язок між пристроями (D2D), зв'язок між машинами (M2M) та розумні фінансові технології (FinTech) та віртуалізацію мережевих функцій (NFV);
- надання користувачам мобільного широкопasmового доступу 5G/UMTS, HSDPA (High Speed Packet Access), HSPA (High Speed Packet Access), HSPA (High Speed Packet Access), HSPA+ (High Speed Packet Access Evolved).) та LTE (Long Term Evolution), а також мережі, що підтримують мережеві протоколи передачі

даних, такі як WiMAX.

Підтримка цього величезного та швидкозростаючого сегмента використання даних та підтримка значної кількості підключень є надзвичайно складним технічним завданням. Наприклад, при максимальній теоретичній швидкості передачі даних 150 Мбіт/с базова станція стандарту LTE-A Pro з режимом MIMO 2×2 може підтримувати лише до (150/4) одночасних потоків відеотрансляцій рівня Full HD (при швидкості 4 Мбіт/с у кожному потоці). Крім того, стандартні мережі LTE були розроблені для підтримки до 600 підключених користувачів на соту, але зв'язок для M2M і IoT вимагає підтримки десятків тисяч підключених пристроїв в одній соті.

Для підвищення пропускної спроможності та швидкості передачі даних до стандарту LTE включаються результати нових досліджень та розробок, такі як MIMO, малі стільники, скоординована багатоточкова передача Coordinated Multi-Point, CoMP, режим HetNets та використання кількох антен.

Одним із напрямків для вирішення зазначених проблем - це зміна самого підходу до організації опорної мережі стандарту зв'язку та залучення нових ідеологій для його побудови. Ці технології потребують додаткових змін поточних станів. У міру поширення SDN в опорній мережі 5G зміст конкретного обладнання почне втрачати сенс, оскільки, як і трафік управління, так і трафік користувача будуть оброблятися різними логічними об'єктами, які віртуалізовані в хмарній інфраструктурі як розподілені системи.

Найефективнішим вирішенням зазначених проблем може послужити технологія SON – мережа, що самоорганізується (Self-Organization Network), і метод штучного інтелекту – машинне навчання. Алгоритми SON складаються з 3 основних завдань, вирішення яких дозволить охопити весь життєвий цикл мережі, такий як:

- самоконфігурація;
- самооптимізація та самовідновлення мережі.

Впровадження алгоритмів можна провести на різних етапах побудови мережі, таких як встановлення алгоритмів на заводі виробника обладнання,

додатковому обладнанні, а також на блоках управління мережею. Встановивши алгоритми обладнання мережі дозволить з мінімальним втручанням оператора, за принципом “plug-and-work” (встанови і працюй), розгортати мережу. У такій мережі однією з переваг буде оптимізація кількості підключених абонентів та інших параметрів. А також у моніторинговому центрі алгоритми машинного навчання допоможуть передбачати навантаження та знаходити потенційні рішення для покращення мережі. Тому вважаю тему моєї магістерської роботи актуальною та дуже перспективною.

Мета даної магістерської роботи:

Всі технології мобільної CSI мають свої технічні параметри, такі як швидкість передачі даних, час відгуку та пропускна спроможність. Тому не всі запропоновані технології можуть забезпечити високу якість послуг. Найбільш актуальною та перспективною технологією в плані проектування та вирішення цієї проблеми є LTE Advanced.

Головною метою даної магістерської роботи є дослідження методів передачі обслуговування в системах мобільного зв'язку 5G на базі технології SDN для більш надійної підтримки розвитку послуг інтернету та мобільної мережі. Популяризація підключених пристроїв є найсильнішим каталізатором розвитку галузі телекомунікацій, особливо високошвидкісних, віртуалізації та хмарних сервісів. І це питання не у заміні існуючої матеріальної бази та організації роботи оператора, а скоріше у розвитку в повному обсязі вже існуючих технологій та їх включенні до них нових можливостей.

Методи дослідження даної магістерської роботи:

Основним методом дослідження в даній роботі буде зміна концепції побудови архітектури стільники мобільного зв'язку.

Запропонований метод значно збільшить пропускну спроможність бездротової інфраструктури, змінить методи проектування мобільних мереж, змішає акценти на численні малі стільники на протизагу до вихідного гексагонального покриття великих площ.

Для досягнення поставленого завдання в даній магістерській роботі будуть розглянуті та виконані такі питання та завдання:

— визначення основних параметрів, характеристик і принципів роботи бездротової мобільної мережі, що розглядається, з використанням технологій стандарту 5G;

— визначення особливостей архітектури та програмної конфігурації аналізованої бездротової мобільної мережі стандарту 5G;

— виконаний процес моделювання системи для оптимального обслуговування у мережі 5G на базі технології SDN.

Основне практичне застосування отриманих у роботі результатів полягатиме в тому, що архітектура, що розрахована в даному проекті, дозволяє знизити технологічну затримку в мобільній мережі шляхом поділу системи на площину даних і площину управління.

Основні результати та новизна даної магістерської роботи:

В даний час зусилля розробників зосереджені на способах проектування мереж, де орієнтований на користувач більше не є просто кінцевим вузлом бездротової мережі, тепер він, як очікується, братиме участь у зберіганні, ретрансляції та доставці контенту та підтримці обчислень всередині мережі.

Нові спроектовані мережі з'єднують різні вузли в стільники різної дальності дії. Розгортання малих, мікро-, піко- і фемтосот вже йде і виявляється успішним, таким чином, щільні мережі 5G матимуть сильні взаємні перешкоди під час використання поточних радіоінтерфейсів. Отже, слід вводити секторізацію та поділ у напрямку роботи антен, що призводить до концепції множинного доступу з просторовим поділом та використанням керованих діаграм спрямованості антен.

Поділ рівнів користувачів та рівнів управління поряд із безшовною сумісністю між різними мережами лягає в основу систем 5G для усунення конфліктів пікосот.

Зміни в архітектурі та радіоінтерфейсі наголошують у розвитку стандарту 5G на маленькі розміри сот і збільшена кількість антен. Конфігурація та

обслуговування численного мережного обладнання, серверів та роутерів за такої щільності розгорнутої мережі 5G це дуже складне завдання.

Програмно-визначена мережа (англ. Software Design Network, SDN) пропонує спрощене рішення для цього складного завдання.

В описаному в даній магістерській роботі методі:

Для визначення якості вибірки та точності передбачення були використані функції score для кваліфікованої програми.

У результаті імітаційної роботи мережі точність передбачення становить 60% для тестової та головної вибірок.

Неточності у прогнозуванні обумовлені тим, що вибірка є досить маленькою, для точності 80-90% необхідні вибірки з розмірами близько 1 000 000. Так само точність вибірки залежить від

можливостей комп'ютера Для обробки 144 000 елементів моєї програмі знадобилося 20-25 секунд з тактовою частотою комп'ютера 1.8 Гц.

Так само на якість передбачення в цій роботі впливає функція регресії та її параметри.

Для передбачення вибірки в даному проекті застосовувалося дерево з максимальною під вибіркою від 7 до 17. Зростання точності передбачення незначне, але під вибіркою більше 10 000 помітна різниця, 60% проти 75%.

Галузь та сфера застосування:

Основний принцип SDN – поділ мережі між шаром управління та шаром передачі даних, це забезпечує швидкість та гнучкість у мережах 5G, а також використання існуючої архітектури мереж та зниження вимог до обчислювальної потужності мережного обладнання.

Збільшення ємності шару користувачів можливо, незалежно від ресурсів шару управління. Концепція SDN роз'єднує дані та керує шарами за допомогою програмних компонентів для мобільних мереж 5G.

1.1 Аналіз способів побудови мобільного радіозв'язку стільникової системи

1.1.1 Етапи розробки стандартів бездротового зв'язку

Сьогодні вже не дивно, що інтернет на смартфоні швидше, ніж Інтернет вдома. Буква «G» після цифри, це переклад англійського слова «generation» походить від значення «покоління» бездротової мережі.

Стандарт першого покоління бездротової мережі був запущений в столиці Японії, в місті Токіо в 1979 році, а до кінця 1980-х років було введено три стандарти: північний мобільний телефон (NMT), американська система мобільного телефону (AMPS) і система зв'язку з повним доступом (TACS). Перше покоління 1G забезпечувало аналогову передачу даних, за допомогою власного модему. Даний модем активно намагався усунути шум та спотворення сигналу, які вважалися головними перешкодами бездротового зв'язку. Загальна швидкість передачі даних підключення становила приблизно 1,9 кбіт/с. [7].

До 1990-х років загальна кількість користувачів Інтернет в усьому світі становила 20 мільйонів. Тоді було помічено низку недоліків мережі: низька швидкість передачі даних, різні стандарти в різних країнах, дорогі дзвінки та недоступність пристрою. [11].

Технологія 2G з'явилася в м. Гельсінкі – столиця Фінляндії, Скандинавія у 1991 році. Головним нововведенням тут стали цифрові технології користувачі могли отримувати та відправляти текстові повідомлення (SMS) та мультимедійні повідомлення (MMS), а телефонні розмови стали вперше закодовані в цифровому форматі. Стрімкий розвиток мережі сприяв появі двох стандартів: D-AMPS в Америці і GSM в Європі. Але друге покоління використовувалося лише як гібрид аналогового та цифрового зв'язку. Швидкість передачі даних зросла до 14,4 кбіт/с.

Найголовнішим нововведенням стало впровадження стандарту 2.5G або GPRS (General Packet Radio Service) у 1997 році. Головною особливістю GPRS була безперервна передача пакетних даних і можливість обміну графічною інформацією.

Тепер зв'язуватися з кимось не потрібно було: пристрій завжди був підключений до Інтернету, що в свою чергу забезпечувало операторам безперервну передачу даних, а не дзвінків. А швидкість зросла до 115 кбіт/с.

Наступним етапом розвитку стала технологія EDGE (Enhanced Data-rates for GSM Evolution). Іноді його класифікують як 2,75G. Хоча це не принесло істотних новин з точки зору якості, 2.75G без проблем збільшив швидкість апаратної частини до 384 Кбіт/с.

Поява наступного покоління 3G в 2002 знову в Японії, почав свій шлях розвитку стандарт третього покоління. Його перевагою стала велика швидкість передачі даних до таких мір, що можливо було дивитись відео в мережі Інтернет, та брати участь у відео-конференціях. Це стало можливим через перехід від множинного доступу з тимчасовим поділом каналів (TDMA) до множинного доступу з кодовим каналом. Завдяки цьому переходу телефон має можливість підключатися до Інтернету, навіть коли йде дзвінок.

Зрушення в технології зробили можливим також надсилати аудіо- та відеоповідомлення. Максимальна швидкість досягала 3,6 Мбіт/с, хоча швидкість інтернет-з'єднання становила 145 Кбіт/с. [13].

Наступне оновлення під назвою 3.5G набуло великої популярності в 2006-2007 роках. Стандарт HSPA цього покоління суттєво збільшив швидкість.

Покоління 4G було анонсовано набагато раніше його фактичної реалізації. Це покоління, випущене в 2008 році, мало мати швидкість 1 Гбіт/с для стаціонарного модему та 100 Мбіт/с для мобільного пристрою. Однак жоден оператор не міг досягти такої швидкості. Також стандарт HSPA+, відповідний третьому поколінню, офіційно введено в четверте покоління.

Нарешті, у 2012 році у Великобританії стартувала технологія 4G, яка надала можливість грати у ігри через мережу Інтернет, дивитись відео та телебачення в HD. На це вплинули стандарти LTE (Long Term Evolution) і WiMAX. Швидкість для цих сучасних стандартів досягла від 100 Мбіт/с до 1 Гбіт/с. Мережі 4G мали ряд технологічних особливостей: збільшену пропускну здатність мережі, пріоритезацію трафіку пристроїв, IP-орієнтацію, стандартизацію в різних країнах.

На початку 20 років 21 століття активно розвивається інфраструктура промислового та цивільного бездротового зв'язку зіштовхнулася з вимогами необхідності збільшити швидкість у 100-500 разів і довести рівень швидкості до 10-50 Гбіт/с. Виконати ці амбітні плани неможливо без необхідності оновити обладнання станцій з застосуванням «Розумних» антени. Сучасні мережі можуть інтегрувати кілька антен для підвищення рівня звуку. Але цього недостатньо, щоб досягти мети. Для цього необхідно об'єднати багато антен, які виконують окремі функції.

Зараз використовується смуга частот 3,5 ГГц, а для впровадження нової мережі потрібні смуги більш високих частот. Цього можна досягти, посиливши хвилі до десятків гігагерц. Навіть якщо вирішити проблему комплексної інтеграції «розумних» антен, доведеться вирішити проблему розміру та енергоспоживання цих антен. Тобто необхідно застосування стандартів нового покоління 5G.

Основні етапи розвитку стандартів мобільного зв'язку показано на (рис. 1.1).

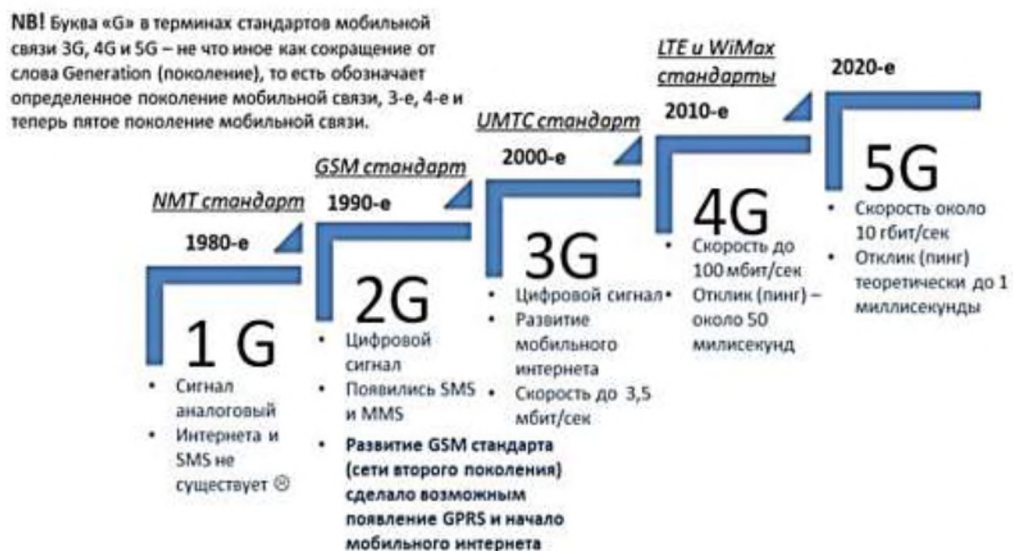


Рисунок 1.1 – Основні етапи розвитку стандартів мобільного зв'язку

Ще однією вимогою до нового покоління зв'язку, це можливість пересилати інформацію з одного пристрою на інший на відстані в десятки метрів. У свою чергу, оператор може приймати лише «сигнальний трафік», а реальна інформація передається лише між пристроями. Навряд чи це оновлення замінить технологію

Bluetooth або навіть технологію NFC, але багато в чому воно однозначно буде іншим. Мережа 5G є логічним продовженням 2G і 3G, 4G стандартів телекомунікацій. [9].

Порівняльна характеристика від технології 3G до 5G; поточна і планова пропускна здатність наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Від 3G до 5G: основні системні характеристики технологій

Технічні характеристики	3G	HSPA+	LTE	LTE+A	5G
Смуга пропускання, МГц	5	5	20	100	100+
Сота спектральна ефективність, біт\с\Гц \сота	0,5	2	4	-8	10+
Пауза, мс	50	20	10	10	0,1-1
Власна пропускна здатність в зоні покриття одиниці, Гбіт\с\км ²			50		

Рисунок 1.2 ілюструє розвиток і еволюцію стандарту 5G по відношенню до стандарту LTE. Хоча розробляються нові стандарти, підтримка стандартів попереднього покоління не припиняється.

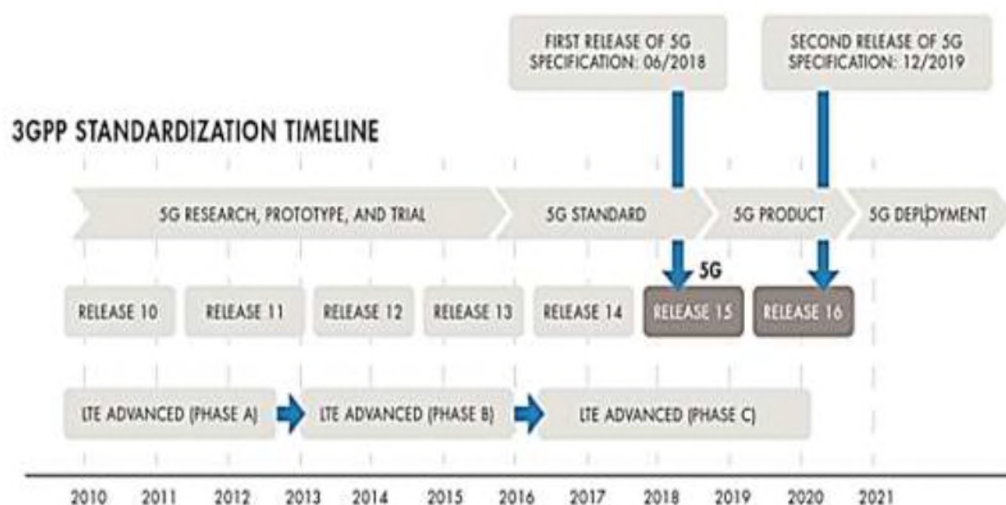


Рисунок 1.2 – Графік розвитку стандартів у поколіннях 4G і 5G. за роками

Специфікації, що визначають цей стандарт і роботу організації 3GPP, яка є його основним розробником, організовані наступним чином. Вони підключені до

мережі радіодоступу (RAN - Radio Access Мережа), розділених на три основні групи технічних специфікацій (TSG - Technical Specification Groups), що відповідають за послуги та системні аспекти (SA - Service and System Aspects), ядро мережі та термінальні програми (SN - Core Network and Terminals). [15].

Кожна група технічних специфікацій розділена на шість робочих груп (WG - Work Group), відповідальних за один із нижчих рівнів системи, описаної TSG. Фізичний підрівень 5G New Radio описується специфікаціями TSG RAN WG-1, а саме TS 38.201, де надається його загальний опис і посилання на специфікації, які описують кожен з підсистем фізичного рівня більше детально.

1.1.2 Специфікації, що визначають стандарти та роботу 3GPP

Крім того, особливості моделювання та прототипування пристроїв, що відповідають стандарту зв'язку п'ятого покоління, розглядаються в середовищі моделювання MATLAB за допомогою засобів 5G Toolbox

Які описують фізичне та математичне моделювання в графічному середовищі програмування, симуляції та аналізу багатодомених динамічних систем. Його основний інтерфейс є графічним інструментом побудови блок-схем і налаштовується набір бібліотек блоків, як показано на рисунку 1.3.

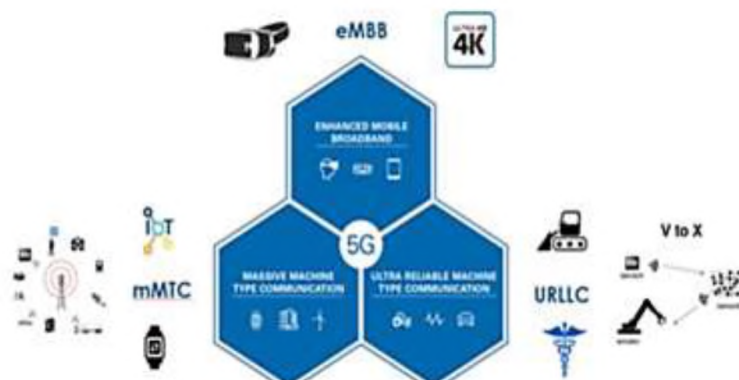


Рисунок 1.3 – Діаграма, що відображає основні сценарії взаємодії мережі в стандарті мобільного зв'язку 5G

Для цього, як приклад, основні специфікації, включені в стандарт радіоінтерфейсу 5G New Radio, перераховані в таблиці 2.1. Ці дані містять

найважливіші показники, які забезпечують реалізацію представлених раніше мережевих зв'язків. [3].

Таблиця 1.2 - Основні характеристики стандарту мобільного зв'язку п'ятого покоління

Найосновніші параметри стандарту 5G	
Затримка в радіоінтерфейсі	до -1 мс
Затримка між точками (від приймального пристрою до ядра мережі)	до 10 мс
Щільність з'єднання	Порівняння зі стандартом 100x (4G LTE).
Пропускна здатність відносно зони покриття	1 (Тбіт/с)/км ²
Спектральна щільність, що відповідає одному сектору	10 (біт/с)/Гц/сектор
Максимальна швидкість передачі з низхідного каналу	10 Гбіт/с
Енергоефективність	До 90% покращення порівняно зі стандартом (4G LTE). До 90% поліпшення

Специфікації, що визначають цей стандарт і роботу організації 3GPP, яка є його основним розробником, організовані наступним чином. Вони підключені до мережі радіодоступу (RAN - Radio Access Мережа), розділених на три основні групи технічних специфікацій (TSG - Technical Specification Groups), що відповідають за послуги та системні аспекти (SA - Service and System Aspects), ядро мережі та термінальні програми (SN - Core Network and Terminals).

Кожна група технічних специфікацій розділена на шість робочих груп (WG - Work Group), відповідальних за один із нижчих рівнів системи, описаної TSG.

Фізичний підрівень 5G New Radio описується специфікаціями TSG RAN WG-1, а саме TS 38.201, де надається його загальний опис і посилання на специфікації, які описують кожну з підсистем фізичного рівня більш детально. Діаграма, що ілюструє взаємозв'язок специфікацій і положення фізичного рівня в стеку протоколів, показана на рис. 1.4.

Представлення основних функцій стандарту 5G New Radio порівняно зі стандартом попереднього покоління;

- впровадження нових частотних діапазонів в області міліметрових хвиль;
- використання масивної технології MIMO,
- нова стратегія формування частотно-часової ресурсної мережі з часовими слотами та змінними інтервалами передачі, нові схеми кодування та модель радіоканалу. [5].

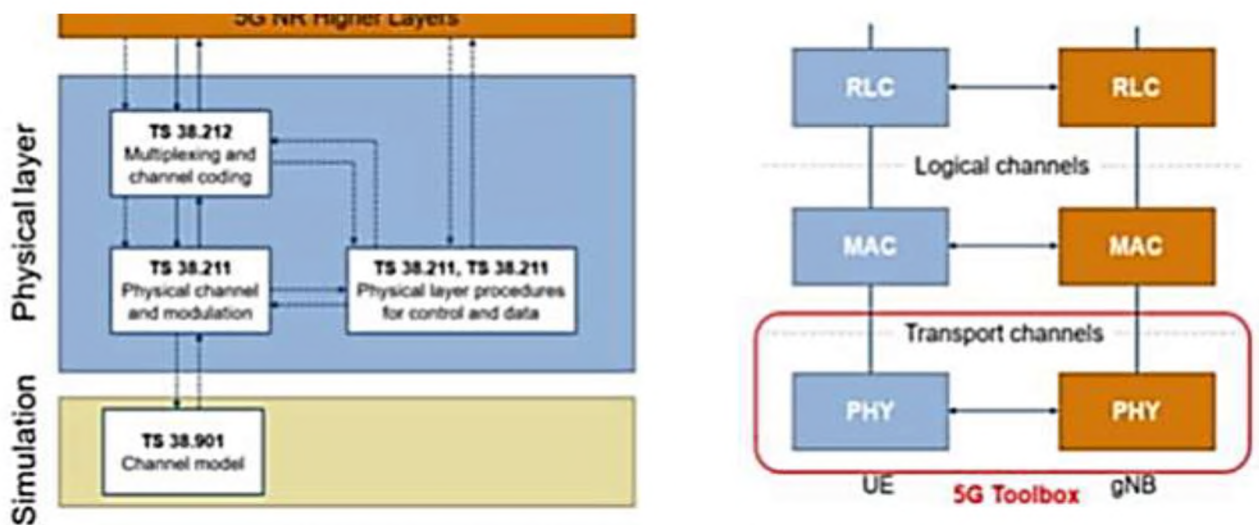


Рисунок 1.4 – Підсистеми фізичного рівня

1.1.3 Новаторські мережеві технології 5G

Технологія 5G – частина ширшої революції, яка також охоплює хмарні технології та технології автоматизації для створення більш надійної та стійкої платформи для постачальників послуг. У Juniper Networks вважають, що лише мереж 5G недостатньо для трансформації бізнесу постачальників послуг. Щоб посправжньому усвідомити цінність цих технологій та реалізувати можливості, які

вони обіцяють, постачальники послуг повинні розглядати спільні можливості хмари, 5G та автоматизації. Ці технології спираються одна на одну, а в деяких випадках навіть залежать одна від одної.

Наприклад, багато переваг 5G неможливо оптимізувати без переведення інфраструктури в хмару, будь то телекомунікаційна хмара та NFVI, розподілена периферійна хмара або віртуалізовані, контейнеризовані (VNF/CNF) або дезагреговані функції. Хоча 5G та хмара разом забезпечують якісний стрибок щодо масштабу, продуктивності та адаптивності, вони також збільшують складність експлуатації, яку можна спростити і якою можна керувати лише за допомогою автоматизації мережі.

5G та хмарні технології обіцяють нові можливості для споживачів та підприємств. Щоб процвітати в сучасному світі 5G / багатохмарні сервіси, постачальникам послуг необхідна стратегія, яка спрощує експлуатацію мережі та забезпечує диференційовану взаємодію з клієнтами. Співробітники компанії Juniper називають це явище орієнтованими на взаємодію мереж. [11].

Наш підхід до орієнтованих на взаємодію мереж для постачальників послуг базується на трьох основних сферах рішень:

- масштабована матриця IP-сервісів для ефективного IP-транспорту;
- хмарний підхід до спрощення телекомунікаційної та граничної хмари;
- керовані корпоративні сервіси для забезпечення гарантованої якості обслуговування.

Кожна з цих областей рішень базується на наших клієнтах:

- підключена безпека захищає користувачів, пристрої, програми та інфраструктуру;
- інтелектуальна автоматизація спрощує покращення взаємодії з клієнтами.



Рисунок 1.5 – Основні етапи розвитку сервісних пропозицій стандартів зв'язку

5G- надає головні блоки компонування, щоб постачальники послуг трансформували свій бізнес за допомогою мереж 5G, використовуючи наш асортимент надійної продукції, а також пропозиції стратегічних партнерів.

Масштабована матриця IP-сервісів із сегментацією мережі для IP-транспорту
 Хмарні рішення для спрощення телекомунікаційної та граничної хмари
 Керовані корпоративні сервіси для забезпечення гарантованої якості обслуговування

Інтелектуальна автоматизація спрощує покращення взаємодії з клієнтами
 Підключена безпека захищає користувачів, пристрої, програми та інфраструктуру надає головні блоки комп. [17].

1.2 Аналіз технологічних стандартів 5G мереж

У червні 2014 року китайська компанія ZTE (Zhong Xing Telecommunication Equipment) - другий за величиною виробник телекомунікаційного обладнання та мобільних телефонів у Китаї, запропонувала концепцію технології Pre-5G, що діє на основі стандартів телекомунікацій, наступних за технологією 4G-LTE, які активно застосовувалися на той момент часу. Початок стандартизації мереж 5G започаткував семінар 3GPP, що відбувся у вересні 2015 року в США, де було визначено плани з підготовки специфікацій для мереж 5 покоління.

Стандартний тип 5G ділиться на два: протокол IP (Internet Protocol) і 11

однорангових обчислювальних мереж різного ступеня. Кожен користувач Інтернету знає протокол IP. Що стосується peer-to-peer, то тут він має кілька особливостей. Кожен пристрій тут надає багато послуг одночасно: приймач, передавач і маршрутизація повідомлень.

Новий стандарт використовує не лише нові технологічні, а й такі програмні функції:

—5G використовують кілька антен на прийомі-передачі тому зростає швидкість і якість сигналу;

—5G займає більш високі частоти, що означає, що перешкод буде менше, але передавачі повинні бути потужнішими, а станції повинні розташовуватися ближче;

—5G використовують технологію розділення мережі network slicing, завдяки якій мережа може розділюватись на кілька логічно ізольованих мереж для певних завдань. Наприклад, одна мережа для Інтернету мов, а інша для відео-трансляцій;

—5G позбулися недоліків мережі, таких як: відключення мережі з одного чи кількох вузлів не впливає на загальну продуктивність мобільного телефону. Так само якщо будь-який клієнт підключається до мережі, він автоматично підключається до інфраструктури мобільної маршрутизації;

—5G виконана як саморозгінна область спрямована на вільний простір, завдяки чому з'являється багато додаткових сигналів;

—5G (має п'ять різних інтерпретацій порівняно зі стандартними поколіннями 3G, 4G) є те, що він сумісний. Тому все попередньо встановлено на одній технології, мережа незалежна, де б ви не були - чи то Країни Євросоюзу Америки чи України;

—5G має технологічну можливість надавати голос на дуже високій швидкості без тарифу. Передача даних, голосові повідомлення передаються пакетами, як і IP-телефонія.

Пропускна здатність мережі 5G буде до 20 Гбіт/с по лінії «вниз» (до абонента) та до 10 Гбіт/с в зворотному напрямку. Також, мережа матиме підтримку одночасного підключення до 1 млн пристроїв на 1 квадратний кілометр. Зменшення часової затримки на радіо інтерфейсі до 0.5 мс (для сервісів наднадійного між

машинного зв'язку) та до 4 мс (для сервісів широкосмугового мобільного зв'язку). Підвищення енергоефективності на 2 порядки дозволить пристроям інтернету працювати без підзарядки акумуляторів протягом 10 років. Інші характеристики мережі 5G у порівнянні з 4G наведені на рис. 1.6. [4].



Рисунок 1.6 - Порівняння характеристик мереж 4G та 5G

1.2.1 Особливості та технологічні вимоги до мереж 5G

Стандартизація технологій і рішень 5G має бути завершена до 2024 року, тому термін 5G у майбутньому вказуватиме лише на фрагментовані рішення, які будуть частиною повномасштабного рішення IMT2020.

Таблиця 1.3 – Опції організації від 3GPP

	Опції											
	1	5	2	6	3	3a	8	8a	4	4a	7	7a
Тип радіодоступа	SA				NSA							
	E-UTRAN		NR		E-UTRAN, NR							
Тип ядра сети	EPC	NGCN	NGCN	EPC	EPC				NGCN			
Интерфейс RAN – CN	S1	NG	NG	S1	S1				NG			
eNb → ng-eNb	Нет	Да	-	-	Нет				Да			
Обработка Control Plane	E-UTRA		NR		E-UTRA		NR		NR		E-UTRA	
Расщепление трафика	-	-	-	-	eNb	EPC	gNb	EPC	gNb	EPC	eNb	EPC

Основні організації зі стандартизації 5G станом на кінець 2023 року:

— 3GPP (3rd Generation Partnership Project) - Метою 3GPP є формулювання технічних вимог, оцінка пропозицій і доопрацювання стандартів. До загальної розробки архітектури, 3GPP розробляє стандарти для нових діапазонів частот для радіотехнології 5G New Radio (NR). ETSI є членом 3GPP в рамках 5G і є найактивнішим учасником розробки стандартів 5G.

— IETF (Internet Engineering Task Force) - NFV (Network Function Virtualization) розробляє IP-протокол для підтримки віртуалізації мережевих функцій. Наприклад, IETF розробив SFC (Service Function Chaining), сервісну функцію, яка об'єднує технологію, яка об'єднує окремі віртуальні компоненти 5G, такі як базові станції, сервісні шлюзи та пакети даних. Цей VNF (функції віртуальної мережі) дозволяє динамічно створювати та прив'язувати функції віртуальної мережі. IETF тісно співпрацює з 3GPP.

— ITU (Міжнародний союз електрозв'язку) - це агентство ООН, яке займається стандартизацією широкого спектру телекомунікацій. Зокрема, координує роботу з розподілу радіочастотного спектру, в тому числі для мереж 5G. Ведеться системна практична робота з розробки стандартів IMT2020 (5G).

— 5GPPP (5G Infrastructure Public-Private Partnership) вважається одним із офіційних розробників зі стандартизації 5G. Організація ставить перед собою щодо розвитку вимог до мереж 5G, такі як збільшення потужності мережі до 1000 разів, зниження енергоспоживання пристроїв користувача на 90%, різке скорочення часу на створення нових сервісів і послуг, забезпечуючи повне та безпечне покриття мережі та трохи меншу передачу даних.

NGMN (Next Generation Mobile Networks) — це альянс, який стандартизує повний спектр рішень 5G. До складу альянсу входять оператори США: AT&T, U.S. Cellular і Verizon. Організації, які займаються питаннями стандартизації мереж 5G показано на рис. 1.7. [16].

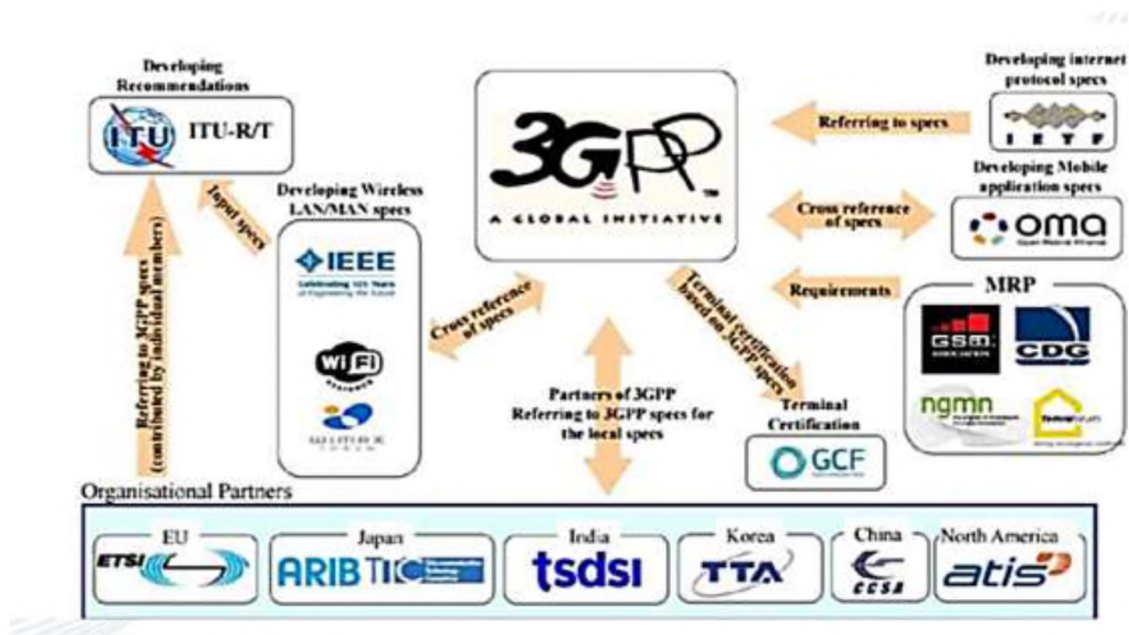


Рисунок 1.7 – Організації, які займаються питаннями стандартизації мереж 5G

Існують також галузеві та регіональні організації, такі як 5G America та Small Cell Forum, які значною мірою сприяють розвитку та стандартизації рішень 5G.

Детальний план роботи 3GPP над стандартом 5G, включає у головні пункти виконання робіт:

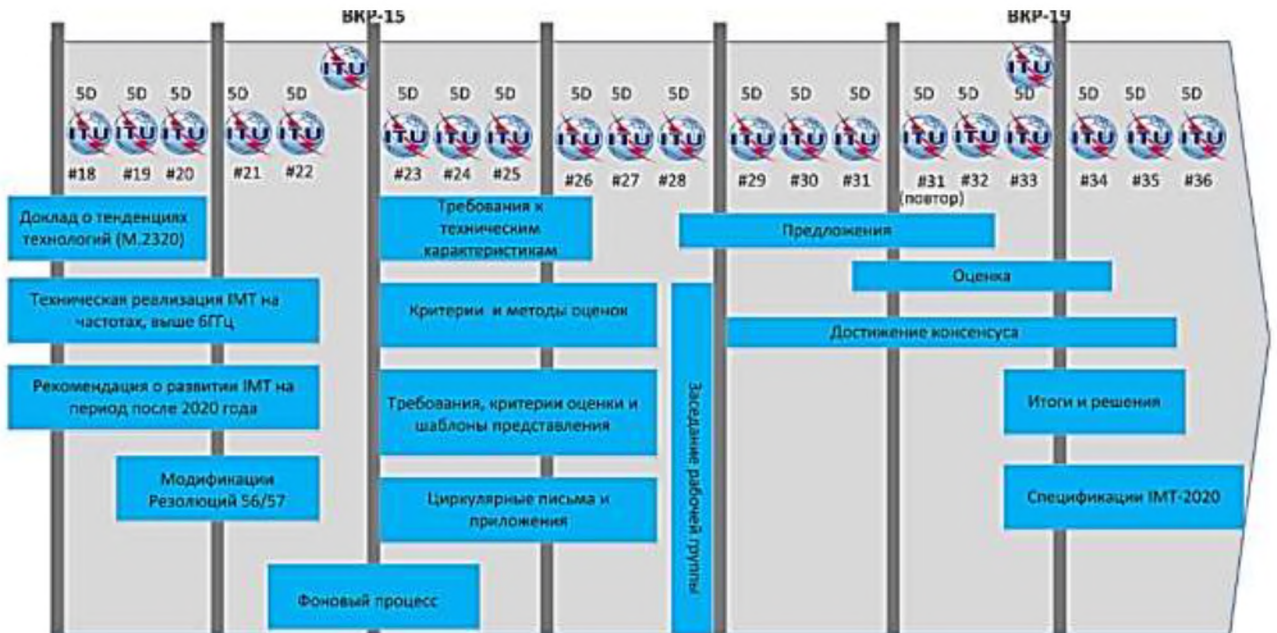
- підготовка технічного аналізу за новими вимогами щодо радіодоступу (NR);
- початок роботи з нормативації над архітектурою мережі нового покоління (Next Generation);
- початок розробки специфікацій нових вимог щодо радіодоступу (5G NR) робочими групами RAN;
- публікація технічних вимог Release 15 мереж радіодоступу та базових мереж 5G;
- завершення розробки фази 1-ї мережі 5G та публікація залишкової версії Release 15;
- покращений широкосмуговий доступ мобільних мереж;
- ультранадійний зв'язок із низькими затримками.

Великі телекомунікаційні оператори, такі як AT&T і Verizon, також вносять великий внесок у розробку стандартів, вони координують свою роботу з ETSI і ITU, але іноді випереджають ці організації. Тому рішення цих операторів часто складають основу стандартів ETSI та ITU. [3].

1.2.2. Особливості вимог до технологій SON при застосуванні у мережах 5G

Впровадження мережі 5G дозволять підключати десятки тисяч пристроїв в одній соті, більш ніж на порядок збільшать швидкість передачі даних і зменшать мережеві затримки, що дозволить створювати нові телекомунікаційні сервіси для всіх галузей економіки.

Вимоги до мереж 5G як напрямок розвитку технологічних рішень SON у мережах мобільного зв'язку, сформовані на основі прогнозу зростання трафіку та вимог до якості перспективних послуг.



Риунок 1.8 – Технічні можливості мереж 5G стосовно технологій SON

Технічні вимоги до мереж 5G у порівнянні з характеристиками існуючих мереж LTE-Advanced (IMT-Advanced) представлені на рис.2.1 і включають такі показники:

- пропускна здатність мережі вище 10 Гбіт/с;
- одночасно 100 мільйонів. підтримка підключення до пристрою/км²;
- затримка передачі даних по радіоінтерфейсу не більше 1 мс.

Сервіси в мережах 5G:

- Extreme Mobile Broadband (xMBB) - впровадження ультраширокопосмугового зв'язку з метою розповсюдження «важкого» контенту;
- загальний міжмашинний зв'язок (Massive Machine-Type Communications, mMTC) - підтримка Інтернету речей (ультрафіолетовий зв'язок);
- наднадійний MTC, uMTC - надання особливого класу послуг з дуже низькою затримкою;
- максимальна швидкість пересування мобільного користувача/пристрою, при якій забезпечується задана якість обслуговування) – 500 км/год;
- затримка (інтервал часу від моменту посилки пакета даних джерелом через радіомережу до моменту прийому одержувачем) – 1 мс;
- щільність підключень (загальна кількість підключених чи доступних пристроїв на одиницю площі) – 1 мільйон на квадратний кілометр;
- енергоефективність;
- щільність трафіку (швидкість передачі, доступна на одиницю географічної площі) – 10 Мбіт/с на квадратний метр.

Неоднорідність мережі та перехід бізнес-моделі оператора з 4G на 5G. [12].

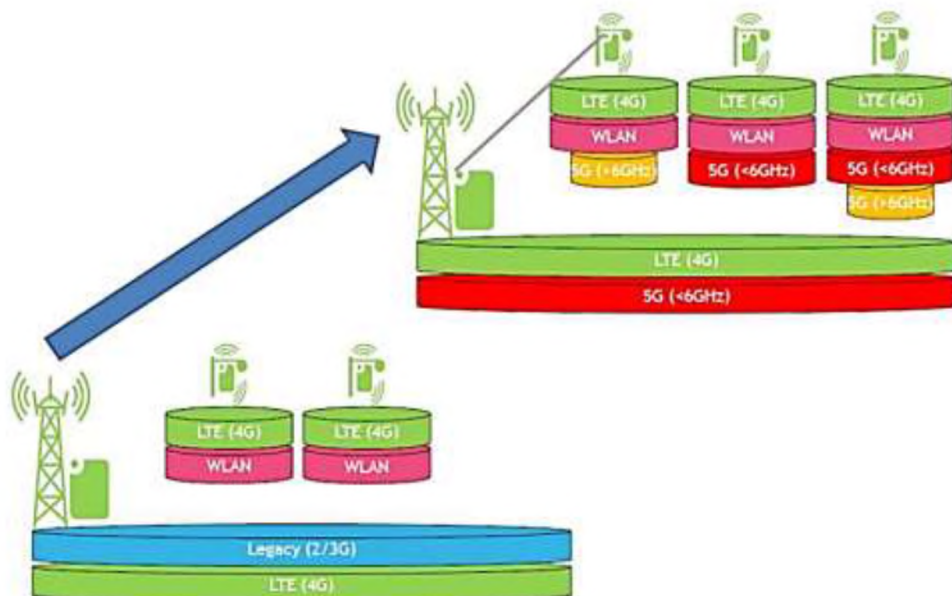


Рисунок 1.9 – Порівняння спектральної ефективності мереж 4G і 5G

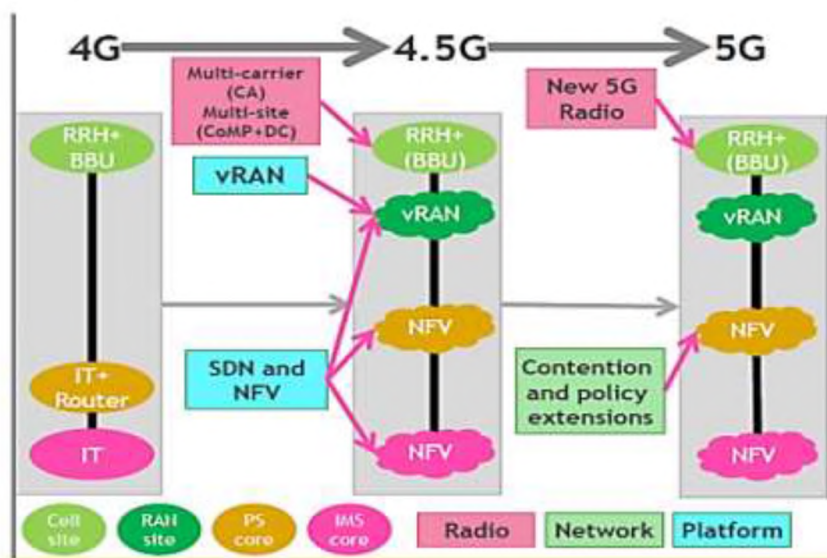


Рисунок 1.10 – Особливості мережевих рішень в інфраструктурі мереж 5G

1.2.3 Аналіз проблем у технології 5G мереж

У технологіях бездротового зв'язку п'ятого покоління передбачено безпрецедентне розширення робочого діапазону частот області міліметрових радіохвиль (mmWave).

Відомо, що саме підвищення несучих частот є запорукою суттєвого збільшення пропускної спроможності каналів зв'язку, в яких буде досягнуто

швидкості передачі даних до десятків гігабіт за секунду. А за одночасного підключення до мереж 5G сотень тисяч пристроїв на території до 1 кв. км ця швидкість буде не нижче 100 Мб/с, тобто помітно вище, ніж сьогодні в мережах 4G при значно нижчій щільності підключення мобільних девайсів.

Однак, обіцяючи масовим споживачам «райдужне мобільне майбутнє», технологія 5G сьогодні ставить перед її розробниками низку завдань, відповіді на які ще потрібно знайти, що не так просто.

На допомогу радіотехнікам прийшли математики, що розробили модель аналізу мережі, що дозволила вирішити завдання оптимізації в комплексі за граничних умов, наприклад, домагаючись мінімуму енергоспоживання приймачів компонентів стільникової мережі або знаходячи оптимум ефективності використання частотного діапазону при збереженні високих показників якості зв'язку. [15].

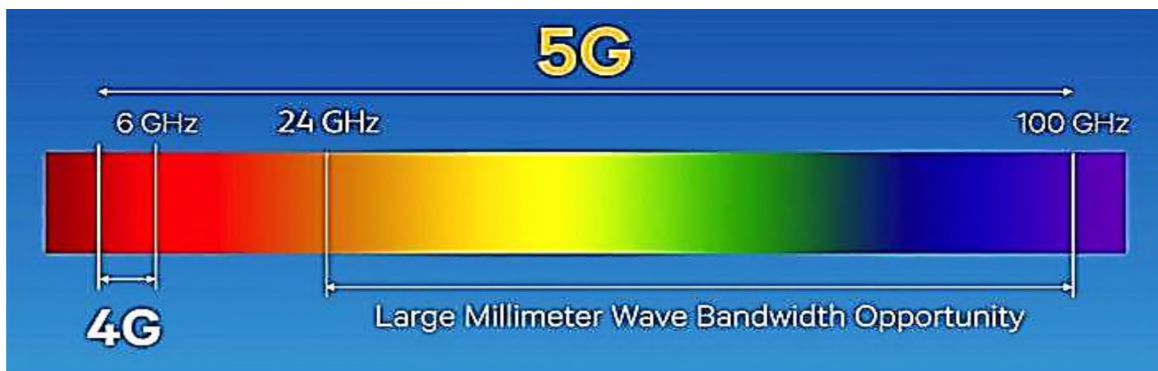


Рисунок 1.11 – Математична модель мережі міліметрового діапазону

1. Перше завдання полягає в пошуку оптимального розподілу в мережі частотного діапазону, оскільки частотний діапазон технології LTE (докладніше про аналіз роботи мереж LTE), яка є базовою в специфікації 5G, заповнений «під зав'язку».

2. Друге завдання обмеження енергетичне, що обумовлюється необхідністю знову ж таки оптимального розподілу потоків електроживлення для серверів, хмарних систем, маршрутизаторів та компонентів мережі.

3. Третє завдання полягає у вирішенні технічних питань забезпечення

низького згасання радіосигналів на відстанях у кілька сотень метрів та підвищення чутливості з'єднання до перешкод на шляху прямої видимості між базовою станцією та мобільним девайсом.

Ще однією проблемою став той факт, що Європейський союз у 2019 році встановив стандарти для середніх частот 5G в діапазоні 3,4-3,8 ГГц, що нижче за частоти, що застосовуються в Сполучених Штатах. Ці частоти використовуються в усіх 27 країнах ЄС.

Агентство з авіаційної безпеки Європейського союзу (EASA), яке займається 31 державою Європи, 17 грудня 2022 року заявило, що проблема існує в повітряному просторі США, і в Європі, де було виявлено ризик небезпечних перешкод.

Чиновники FAA також зазначили, що діапазон, що використовується, наприклад, у Франції (3,6-3,8 ГГц), значно нижчий від діапазону, в якому працюють висотоміри в Сполучених Штатах, а рівень потужності сигналу в мережах 5G Франції набагато нижчий, ніж у США.

У Нідерландах заборонили продавати кулони та браслети проти 5G. Вони випромінюють радіацію.

У Південній Кореї частота мобільного зв'язку 5G становить 3,42-3,7 ГГц, і з моменту запуску мереж 5G у квітні 2019 повідомлень про перешкоди радіохвилях не надходило.

"Оператори бездротового зв'язку майже в 40 країнах Європи та Азії нині використовують діапазон С для 5G, при цьому не повідомляється про вплив на радіовисотоміри, які працюють у тому ж міжнародному діапазоні 4,2-4,4 ГГц", - йдеться у заяві СТІА до Федеральної комісії з зв'язку. [7].

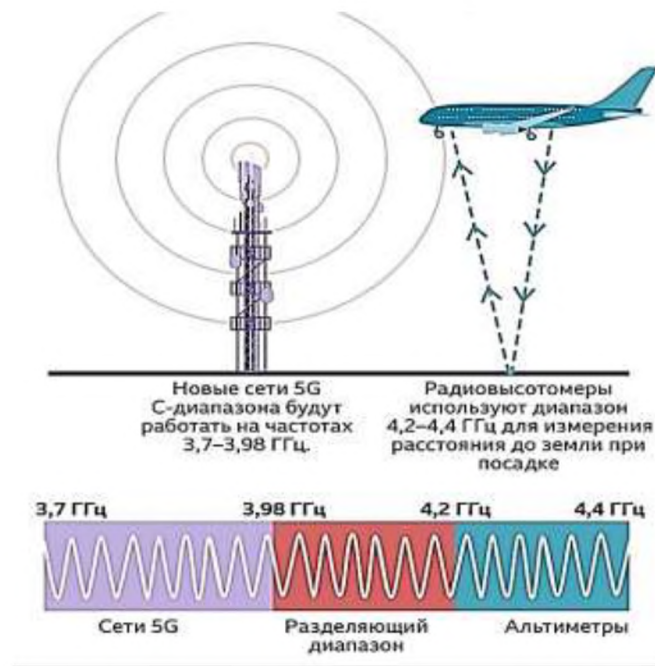


Рисунок 1.12 – Частоти на яких 5G можуть створювати перешкоди для радіовисотомірів (альтиметрів)

Мобільні мережі п'ятого покоління можуть бути небезпечними для тих, хто не хоче, щоб за ним слідкували. В протоколі цих мереж виявлено вразливість, що дозволяє контролювати переміщення абонентів і навіть виводити з ладу цілі сегменти таких мереж за допомогою DoS-атак (denial of service, відмова в обслуговуванні). Про це стало відомо весною 2021 року. Цю проблему з 5G виявили фахівці компанії AdaptiveMobile. Про неї вони розповіли у своєму звіті, в якому вказали винуватця проблеми – протокол поділу мереж п'ятого покоління. [9].

Використання механізму поділу мереж, відомого як Network Slicing, дозволяє операторам зв'язку дробити свої 5G-мережі, представляючи їх у вигляді окремих блоків - віртуальних мереж, з'єднаних між собою. Кожен такий блок - це свого роду окрема мережа, яку оператор може виділити під певну сферу використання - автомобілебудування (автомобільні головні пристрої, охорона здоров'я (розумні медичні прилади, телемедицина), критична інфраструктура, розваги і т.д.

Відповідно до звіту AdaptiveMobile, така реалізація мереж 5G далека від ідеалу щодо мережевої безпеки. Наприклад, зловмисник може отримати доступ до окремого блоку 5G (до окремої віртуальної мережі), після чого він 29 може

спробувати пробитися через нього та інші блоки, включаючи ті, які призначені для мобільних пристроїв, тобто для смартфонів. Проникнення в цей блок може дати хакеру доступ до інформації про персональні дані абонентів мережі, включаючи їх місцезнаходження, історію платежів тощо. Також він може запустити DoS-атаку на один або відразу кілька «сусідніх» блоків 5G-мереж (Рис 1.10). [9].

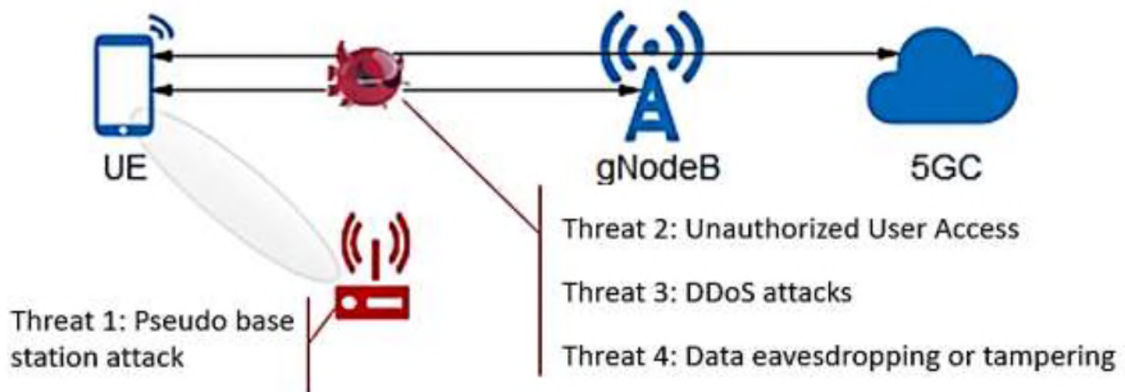


Рисунок 1.13 – DoS-атака на один або відразу кілька «сусідніх» блоків 5G-мереж

Співробітники AdaptiveMobile назвали виявлену в мережах 5G вразливість фундаментальною. Вони наголосили, що насамперед у небезпеці знаходяться корпоративні клієнти операторів зв'язку.

Для вирішення деяких проблем, зокрема, підвищення ефективності механізмів управління пропускнуою здатністю мережі; спрощення управління мережею і підвищення рівня автоматизації; підвищення масштабованості мережі; підвищення безпеки мереж; підвищення ефективності маршрутизації; зниження капітальних затрат та затрат на експлуатацію націлена технологія SND.

На жаль, ці досягнення технології LTE і майбутні вимоги до 5G в області управління QoS покривають своїми можливостями ланцюг «кінцевий споживач – кінцевий користувач» (E2E) лише частково, а саме внутрішньо мережеві з'єднання «5G-5G», «4G-4G».

Відсутність можливості узгодження і гнучкого управління якістьями в фіксованих IP і мобільних мережах попереднього покоління ще довго буде гальмом на шляху до нового рівня якості обслуговування абонентів мереж 5G.

Зараз обсяг трафіку відеопослуг становить, за оцінками операторів:

- від 66 до 75% загального обсягу трафіку в мережах 4G;
- 33% на послуги YouTube;
- 34% - чисте відео, а також відеоспостереження (Video Surveillance) у мережах M2M;
- кількість M2M підключень у мережах мобільних операторів зростатиме з показником CAGR = 45% і досягне 2,4 млрд з'єднань.

Для забезпечення високих швидкостей передачі даних в мережах 5G потрібно використовувати широкі смуги каналів як у лінії вниз (DL), так і лінії вгору (UL) з безперервним спектром шириною від 500 до 1000 МГц, що в 25-50 разів перевищує ширину каналів, що реалізуються в 4G.

Виділення таких смуг для каналів 5G можливе лише на верхній межі сантиметрового та в міліметровому діапазонах частот, що суттєво скоротить зони покриття базових станцій 5G через зменшення радіусу сотів до 50–100 м. Підвищення спектральної ефективності у мережах 5G може бути досягнуто за рахунок застосування неортогональних методів доступу (NOMA) у мережах RAN та нертогональних сигналів (наприклад, FTN-, F- 31 OFDM-сигналів та ін.). Характеристики вимог до спектральної ефективності соті мереж 5G для різних каналів передачі показані на рис. 1.8. Порівняння цих вимог з аналогічними вимогами до мереж 4G показує зростання спектральної ефективності в 3-5 разів. [16].

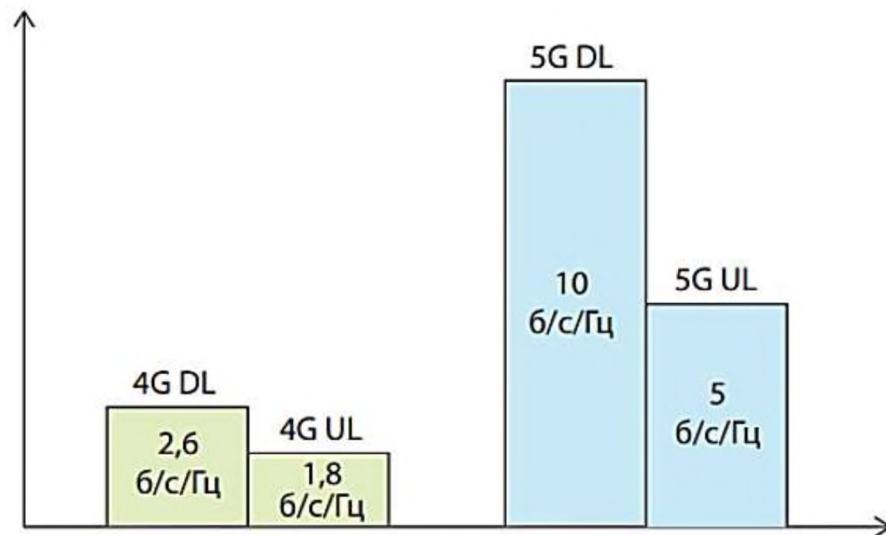


Рисунок 1.14 – Спектральна ефективність в соті 5G

Порівняльний аналіз переваг та недоліків мереж 5G.

Плюси:

- висока швидкість передачі;
- поява нових технологій;
- можливість придбання пристроїв із малим об'ємом пам'яті.

Мінуси:

- технологія 5G буде дорогою;
- необхідність нових стандартів, потужних мікропроцесорів та програмного забезпечення.

Проблеми технології 5G поділяють на технологічні та загальні.

Технологічні проблеми:

- міжядерні перешкоди;
- ефективне керування доступом до середовища;
- управління трафіком.

Загальні проблеми:

- зв'язок, навігація та зондування;
- безпека та конфіденційність;
- кіберзлочинністю.

1.3 Аналіз основних технологічних напрямів розвитку мереж 5G

За всебічної та глибшої інтеграції мобільних мереж України в Європейський інформаційний простор, основні оператори мобільних телесистем, з метою максимально швидкого розвитку відростки будуть вимагати наступних вимог:

- виділені опорні мережі (Network Slicing);
- різноманітність підходів до управління мобільністю;
- декілька технологій доступу;
- пріоритетне обслуговування, QoS та динамічне управління правилами обслуговування;
- експонування мережевих можливостей третім сторонам через API;
- eV2X – розширення на автомобіль: •Connected Car, включаючи V2Vehicle (V2V), V2Infrastructure (V2I), V2Network (V2N), V2Pedestrian (V2P);
- одночасне приєднання терміналів до кількох мереж та надання сервісу через мережі різних операторів;
- ефективне використання мережевих ресурсів;
- ефективний шлях передачі даних;
- ефективна доставка контенту;
- глибока поінформованість щодо умов - Context Aware Network;
- гнучкі послуги ширококомовної та багатоадресної розсилки;
- ефективність енергоспоживання;
- надглибоке радіопокриття у малонаселених районах;
- вибір мережі доступу 3GPP.

В архітектурі 5G взаємодія між мережевими функціями представлена двома способами:

- сервісно-орієнтований, коли одна функція мережі (наприклад, AMF) дозволяє іншим авторизованим функціям мережі отримувати доступ до своїх послуг;

— інтерфейс, який визначає взаємодію між службами мережевих функцій, описану як взаємодія точка-точка (наприклад, інтерфейс N11) між будь-якими двома мережевими функціями (наприклад, AMF і SMF). [11].

1.3.1 Розвиток сервісної системи 5G

Мережеві функції в площині управління 5G повинні використовувати для взаємодії лише сервіс-орієнтовані інтерфейси.

Мережа 5G включає наступні ключові програмні модулі та мережеві функції (NF):

- функція доступу та мобільного керування (AMF-access and mobile management function);
- функція керування сеансом (SMF-функція управління сеансом);
- функція передачі даних користувача (функція UPF-user plane);
- модуль управління даними користувача (Udm-уніфіковане управління даними);
- єдина база даних (UDR - unified data warehouse);
- система зберігання неструктурованих даних (UFST - unstructured data storage functions);
- функція вибору мережевого рівня (nssf-network slice selection function);
- функція управління політикою (PCF-policy management function);
- функція забезпечення взаємодії із зовнішніми додатками (функція NEF-викриття мережі);
- зберігання мережевих функцій (репозиторій NRF - функція NF);
- аплікаційна функція (AF-application function);
- функція підтримки обміну короткими текстовими повідомленнями за протоколом NAN (функція SMSSF-SMS);
- функція взаємодії n3iwf-non-3GPP).

На рисунку 1.15 показано архітектуру мережі 5G з точки зору сервіс-орієнтованої взаємодії різних функцій мережі в площині управління.

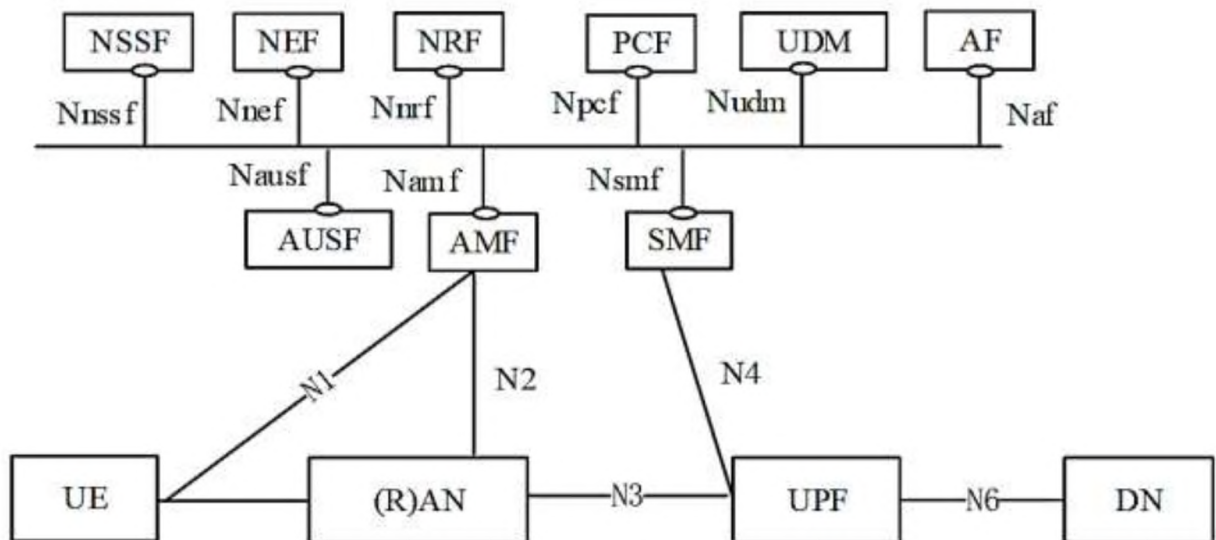


Рисунок 1.15 – Архітектура мережі 5G. Взаємодія мережевих функцій

В архітектурі 5G взаємодія терміналів користувача (UE) з мережами передачі даних (Data Network) здійснюється в рамках PDU сесій (PDU Session-s). UE може мати одночасно кілька створених PDU сесій для зв'язку з різними мережами передачі та отримання різних сервісів.

Бездротова технологія 5G призначена для забезпечення вищої пікової швидкості передачі даних в кілька Гбіт/с, наднизькою затримкою, більшою надійністю, великою пропускнуною спроможністю мережі, підвищеною доступністю і більш одноманітним інтерфейсом користувача для більшої кількості користувачів.

5G має такі переваги. 5G працює швидше, ніж 4G, передаючи по мережі більше біт за секунду. Якщо раніше на завантаження відео вам потрібно було кілька хвилин, то тепер файли завантажуватимуться за лічені секунди. 5G має меншу мережну затримку, ніж 4G, тобто сигнал швидше проходить через мережу.

На рисунку 1.16 показана архітектура мережі 5G з мережевими інтерфейсами. Щоб спростити схему. Мережеві функції udsf, SDSF, NEF і NRF не відображаються, а UDR не відображається. [13].

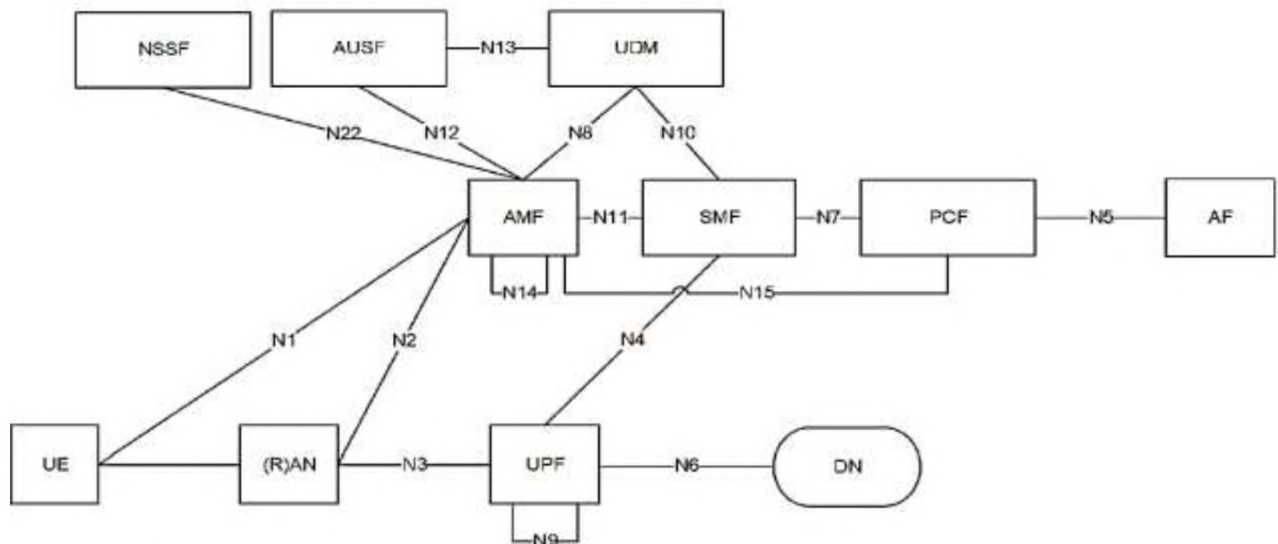


Рисунок 1.16 – Архітектура мережі 5G. Мережеві інтерфейси

1.3.2 Розвиток системи радіоінтерфейсу для мереж 5G

Пов'язаною з Massive MIMO технологією є "Формування променя" (Beamforming) - ключова технологія бездротових мереж, яка передає сигнали спрямованим чином.

Beamforming 5G забезпечує надійне бездротове з'єднання для сторони, що приймає. У звичайних системах, коли в малих стільниках не використовується формування променя, переміщення сигналів у певні області дуже утруднене, через перешкоди (стіни додому, дерева тощо).

Технологія Beamforming вирішує цю проблему, використовуючи "малі стільники" (Small Cells) з формуванням променя, які можуть передавати сигнали у певному напрямку на такі пристрої, як мобільні телефони, ноутбуки, автономні транспортні засоби та пристрої IoT. Beamforming підвищує ефективність та економить енергію мережі 5G. [8].

Beamforming можна розділити на три категорії: цифрове формування променя, аналогове формування променя та гібридне формування променя.

Цифрове формування променя: розрахований на багато користувачів MIMO аналогічний цифровому формуванню променя, який в основному використовується в мережах LTE Advanced Pro і в діапазонах 5G NR (New Radio).

1. Цифрове формування променя: одні й самі частотні ресурси чи часові інтервали можуть використовуватися одночасної передачі кількох користувачів, що підвищує пропускну спроможність осередків бездротових мереж.

2. Аналогове формування променя: у міліметровому діапазоні частот 5G NR аналогове формування променя є дуже важливим підходом, що покращує покриття. При цифровому формуванні променя можливі великі втрати на трасі в міліметрових діапазонах, оскільки формується лише один промінь на набір антен, тоді як аналогове формування променя усуває цей недолік.

3. Гібридне формування променя: гібридне формування променя є комбінацією аналогового формування променя і цифрового формування променя. У міліметрових діапазонах мережі 5G, в основному, використовуватиметься гібридне формування променя. [14].

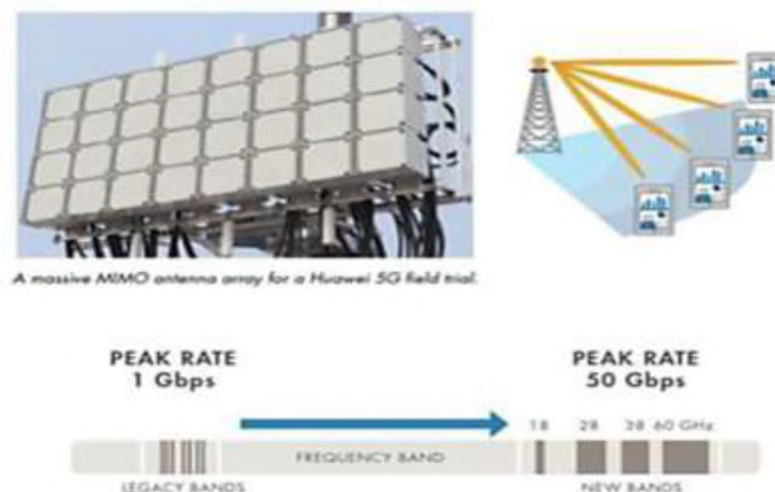


Рисунок 1.17 – Взаємодія підсистем фізичного рівня та їх розташування в стеку радіопротоколів

Завершуючи стандартний короткий огляд, ми переходимо до функціональності 5G Toolbox у середовищі моделювання MATLAB. Перш за все, це генерація сигналів 5G New Radio, в результаті чого можна отримати розрахунки сформованого сигналу на низьких частотах. Далі, використовуючи одну з платформ, таких як SDR-Xilinx Zynq & ADFMCOMM або ADALM-PLUTO, цей сигнал можна перетворити на робочу частоту і транслювати в радіоефір. В даному

випадку мова йде не тільки про F-OFDM-сигнал, а й про повноцінний сигнал мережі низхідного зв'язку стандарту покоління 5G. Перш за все, давайте розглянемо можливості цього інструменту для генерації сигналів F-OFDM.

Основна відмінність цього методу генерації сигналів від класичного ортогонального розподілу частот полягає в тому, що транслювані сигнали поділяються на піддіапазони і до кожного з піддіапазонів застосовується фільтрація. Можливість використання такої методики формування сигналу забезпечує гнучкість частотно-часового ресурсу мережі стандарту п'ятого покоління.

Мережеві технології:

- застосування сигналів з більшою шириною спектра (до 100 МГц у діапазоні до 6 ГГц та до 400 МГц у діапазоні понад 6 ГГц);
- забезпечення мінімальних затримок на радіоінтерфейсі з допомогою можливості збільшення частоти проходження тимчасових слотів кадрової структури, з допомогою модифікації протоколу управління радіоресурсами;
 - застосування адаптивного до навантаження тимчасового дуплексу;
 - застосування ефективніших завадостійких кодів;
 - використання активних антенних систем міліметрового діапазону з великою кількістю елементів, вузькою діаграмою спрямованості випромінювання та високою вибірковістю;
- реалізації індивідуальних сценаріїв використання ресурсів смуги частот каналу NR для абонентських терміналів різних типів та продуктивності (широкополосних/вузькосмугових абонентських терміналів WB/NB UE, абонентських терміналів з агрегацією несучих CA UE);
- удосконалені форми сигналів, модуляція та кодування, схеми багатостанційного доступу:
 - фільтроване OFDM (FOFDM);
 - модуляція з безліччю несучих з використанням банку фільтрів (FBMC);
 - багатостанційний доступ із поділом за шаблоном (PDMA);

- багатостанційний доступ на основі розріджених кодів (SCMA);
- багатостанційний доступ з поділом на основі перемержувань.

На даному етапі стандартизації технології 5G/IMT-2020 (3GPP), як метод мультиплексування прийнятий метод CP-OFDM (Cyclic-Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing) на каналі "вниз" (DL) і CP-OFDM з DFT або без у каналі "вгору". [15].

Антенні технології:

- формування тривимірного променя FD-MIMO (3D beamforming);
- активна антенна система (AAS) з ґратами випромінювачів;
- удосконалені системи з багатоканальним входом/багатоканальним виходом (massive та multi user MIMO). Принцип побудови базової станції з Massive MIMO (рис. 1.14).

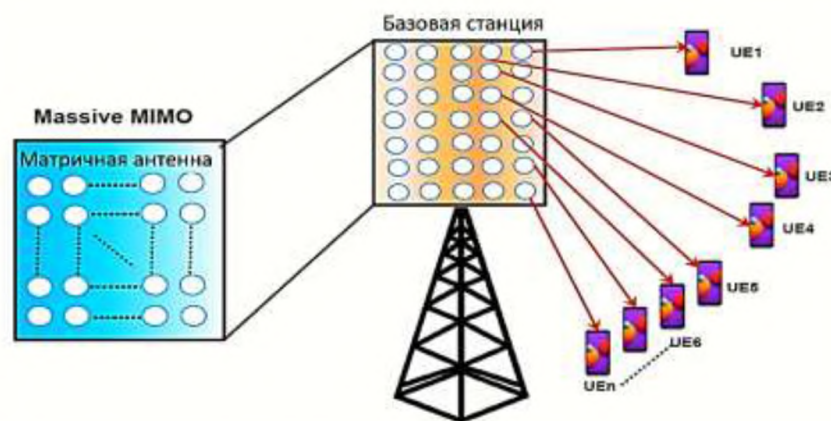


Рисунок 1.18 – Базова станція з Massive MIMO

Гнучкість під час використання спектра:

- агрегація несучих з різним дуплексом (TDD та FDD);
- двоканальне підключення, у тому числі й у мультистандартній мережі;
- динамічний TDD.

Забезпечення прямого зв'язку між абонентськими терміналами.

Використання в мікросотах схем модуляції вищого порядку та використання еталонних сигналів із зменшеним обсягом службової інформації.

Massive MIMO - передача до 8 потоків даних на абонента. У Massive MIMO абонент може одночасно працювати з багатьма антенами, що створює дуже чіткі діаграми спрямованості (рис. 1.18). Використання просторового мультиплексування декількох променів підвищує рівень прийнятого сигналу і пригнічує перешкоди від інших користувачів, тим самим збільшуючи пропускну здатність і спектральну ефективність; [6].

1.3.3 Аналіз категорій використання 5G мереж

5G підтримує три широкі категорії варіантів використання:

— Enhanced Mobile Broadband (eMBB) — послуги з високою пропускну здатністю для бездротового зв'язку.

— Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC) – наднадійна та низька затримка зв'язку для критично важливих вимог.

— Massive Machine Type Communication (mMTC) – надійний зв'язок для мільярдів датчиків та контрольних пристроїв.

Пікова швидкість передачі даних низхідних каналів для 5G може досягати 20 Гбіт/с, що в 20 разів більше від пікової швидкості 4G LTE в 1 Гбіт/с.

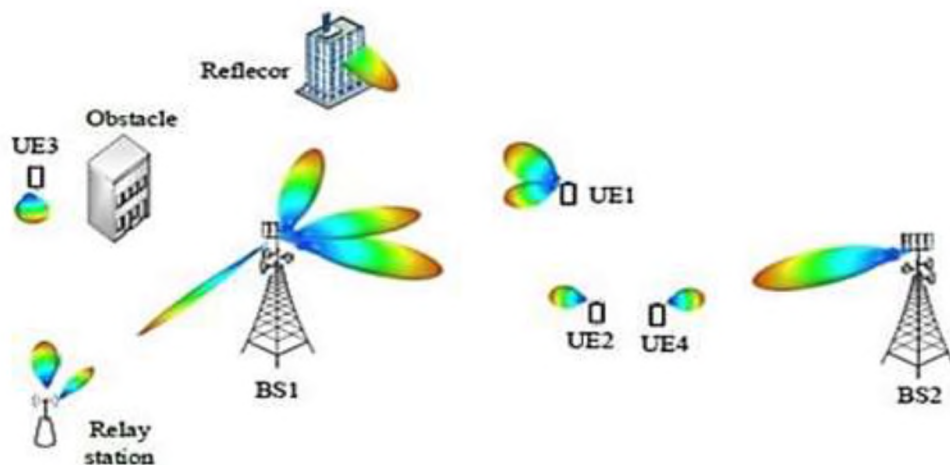


Рисунок 1.19 – Масивний MIMO

New Multiple Access - нові технології доступу, наприклад, SCMA
 Новий повний дуплекс - дозволяє використовувати одну частоту в різних комірках для різних завдань (UpLink і DownLink) (рис. 1.7). [5].



Рисунок 1.20 – Новий принцип роботи повного дуплексу Rysunok 2.5 – Novyy

Flexibel Duplex - дозволяє організувати гнучку передачу трафіку. Це, наприклад, UPLink для інформації про переказ DownLink (рис. 1.21.).

FBMC / UFMC (Filter Bank Multicarrier, Universal Multi-Carrier Filter) - підвищує спектральну ефективність, дозволяє використовувати вдосконалений канал «когнітивного радіо».

Адв. Кодування і модуляція - применениевокупности технологій модуляції і кодування, включаючи недвійкове кодування, растрові методи, співкодування і модуляцію. [5].

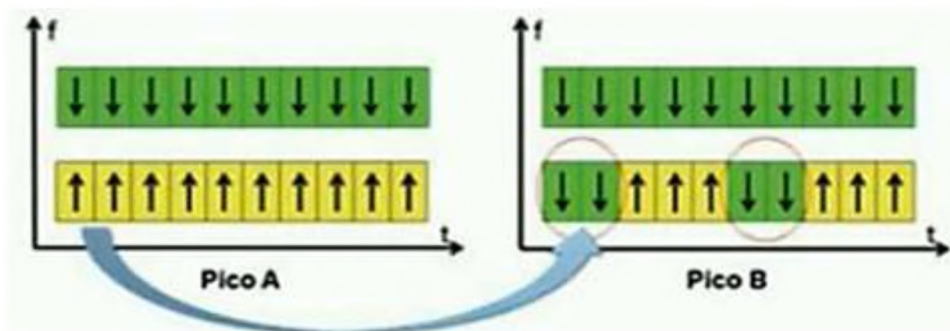


Рисунок 1.21 – Принцип роботи Flexibel Duplex

1.3.4 Аналіз перспектив розвитку технології та архітектура мережі 5G

Розвиток наземної мереж мобільного зв'язку 5G визначається наступними ключовими факторами:

— мережі 5G повинні, з однієї сторони, забезпечувати більш високу продуктивність, порівняно з існуючими мережами мобільного зв'язку, з іншого – мати нижчі капітальні та операційні витрати.

— мережі 5G обслуговуватимуть пристрої та програми з суттєво різними характеристиками трафіку - від низькошвидкісних M2M-лічильників до сервісів віртуальної та доповненої реальності з високими вимогами до швидкості передачі даних та високонадійних систем керування транспортним рухом з високими вимогами до мережних затримок. Тому мережі 5G повинні ефективно керувати мережевими ресурсами залежно від потреб додатків та вимог щодо якості надання послуг.

— обмеженість частотного ресурсу для подальшого розвитку мереж мобільного зв'язку призводить до необхідності використання в мережах радіодоступу смуг частот різних діапазонів (сантиметрові та міліметрові хвилі) та ефективного управління спільним використанням спектра.

Таким чином, основною вимогою до архітектури мереж 5G є гнучкість. Як основні підходи до побудови мереж 5G, які забезпечують високий рівень гнучкості мережевої архітектури, пропонуються технології програмно-конфігурованих мереж (Software-Defined Networking - SDN) та віртуалізації мережевих функцій (Network Functions Virtualization – NFV рис 1.18). [5].

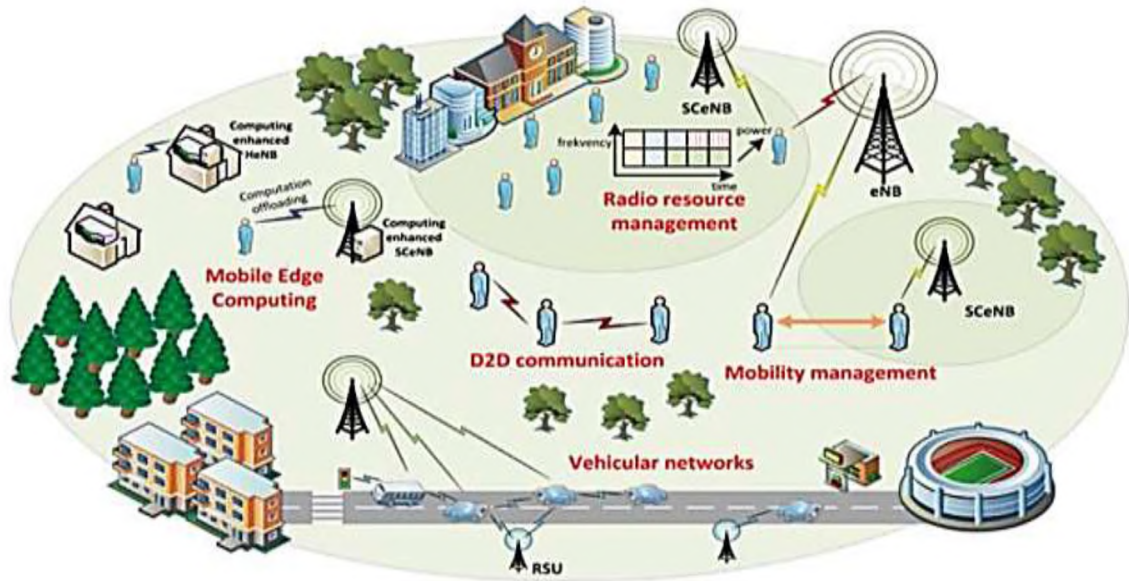


Рисунок 1.22 – Надцілівна технологія

Низька затримка і висока надійність - зменшити затримку і підвищити надійність.

M2M / D2D - пряма передача інформації пристроїв (машин, пристроїв) без участі людини. Розширення покриття абонентськими пристроями. Створення децентралізованої мережі.

Високочастотний зв'язок – частоти нижче 6 ГГц будуть основними діапазонами мережі 5G. Частоти вище 6 ГГц для універсального доступу та магістрального зв'язку. Як показано на малюнку 2.8 нижче, планується використовувати діапазон частот 100 ГГц.

Спільне використання спектру — це спільне використання технологій спільного використання спектру на різних рівнях.

Управління мережами 5G буде реалізовано завдяки вдосконаленій Telecommunication OS Тобто різні галузі та категорії користувачів використовують одну операційну платформу для доступу до мережевої інфраструктури.

У травні 2023 року під час тестування мережевого обладнання 5G у Швеції телекомунікаційний оператор Telia продемонстрував 20 Гбіт/с даних на користувача з Ericsson. Час відгуку становив менше 2 мс. Ці показники більш ніж у сорок разів перевищують мережу 4G. До речі, дорожня карта, розроблена для

мереж п'ятого покоління, передбачає максимальну швидкість передачі даних 20 Гбіт/с. [3].

1.4 Аналіз перспектив розвитку віртуалізації у мережах 5G

Багато функцій мережі можуть бути віртуалізовані за допомогою NFV і надані у різних ділянках мережі 5G RAN за допомогою SDN. Віртуалізація

Концепція NFV заснована на тому, що мережеві функції реалізуються програмно на стандартному комерційному устаткуванні COTS (Commercial Off-The-Shelf), яке є серверами, обладнанням зберігання та мережевою комутацією для загального, а не спеціалізованого застосування.

Для цього використовуються такі технології, як бездротові сенсорні мережі та RFID (метод автоматичної ідентифікації об'єктів). Таким чином, запровадження «інтернету речей» у мережі п'ятого покоління 5G забезпечить не лише взаємодію в рамках єдиної мережі побутових гаджетів і пристроїв (розумних годинників, VR-пристроїв, планшетів і смартфонів), а й усіх сфер людської діяльності (технологія «розумний дім» і «розумне місто») дозволяє охопити (рис. 1.23).



Рисунок 1.23 – Покриття технології 5G у житті людини

Таким чином, зменшується кількість обладнання для однієї базової станції, а якщо врахувати, що все це хмара, то оператор може отримати доступ до будь-якої точки мережі для динамічного налаштування будь-якого сегмента мережі.

Крім того, цей рівень керування мережею відокремлений від пристроїв передачі даних і базується на програмно реалізованій SDN – мережевій технології передачі даних, а NFV – це віртуалізація цілих класів функцій мережевого сайту у вигляді складових елементів, які можна об'єднати в ланцюг, або з'єднані разом для створення телекомунікаційних послуг (сервісів). концепція мережевої архітектури, яка передбачає використання технології.

Завдяки віртуалізації мережі з'явилася можливість організації такої функції як «мережі за запитом». [9].

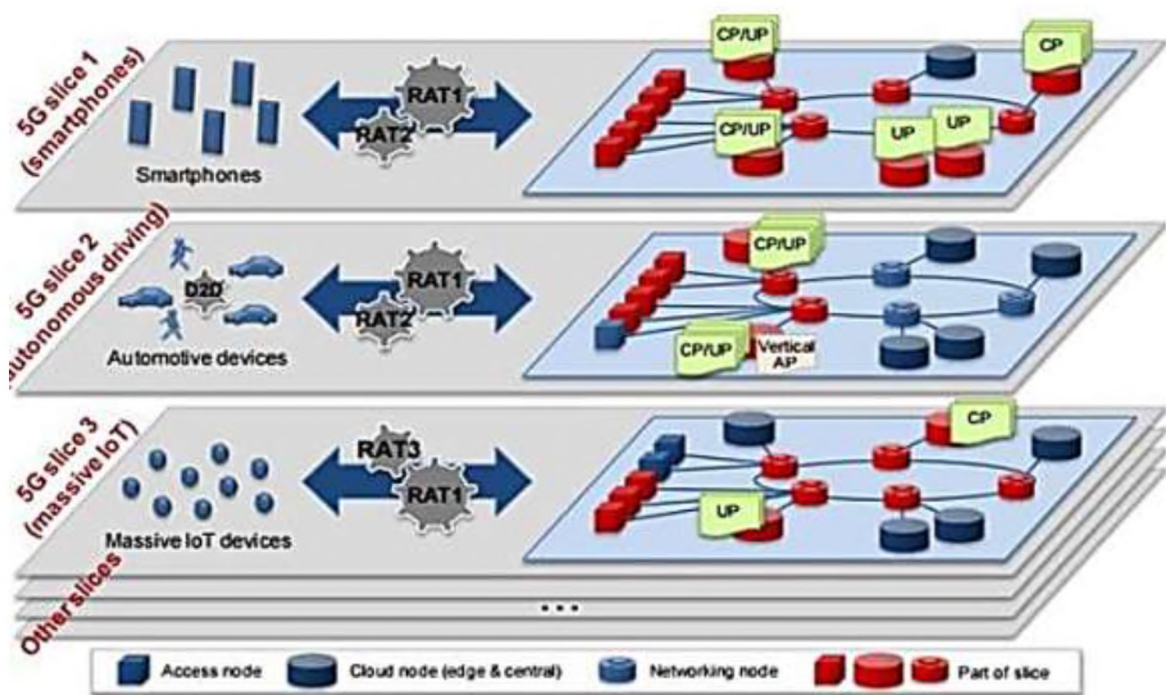


Рисунок 1.24 – Мережі 5G на вимогу

1.4.1 Оцінки ринку віртуалізації

Глобальний ринок віртуалізації мережевих функцій NFV за даними аналітичного агентства Globe Newswire[2] у 2021 р. досяг 18.1 млрд. дол. США. До

2027 року обсяг цього ринку прогнозується у розмірі 60.1 млрд. дол. зі швидкістю зростання в середньому 22.14% на рік за період 2023-2029 років. [16].

Значне зростання очікується у банківській, фінансовій та страховій галузях економіки, у охороні здоров'я, роздрібній торгівлі, на виробництві та в інформаційних технологіях. Широке поширення віртуальних пристроїв замість фізичних також стимулюватиме ринок.

Віртуалізація також активно інтегруватиметься з технологіями Інтернету Речов IoT (Internet of Things) та хмарними технологіями. Іншими чинниками, які впливають зростання ринку віртуалізації, є консолідація дата-центрів, тобто. об'єднання кількох дата центрів в один логічний дата-центр за допомогою технологій програмно-конфігурованих мереж SDN, а також зростаючими інвестиціями в мережі 5G.

1.4.2 Переваги віртуалізації

Разом з 5G технології віртуалізації мережевих функцій NFV (Network Functions Virtualization) і програмно-конфігурованих мереж SDN (Software-Defined Networking) дають можливість операторам полегшити розширення мережі, підвищити можливості введення нових послуг і знизити як капітальні, так і операційні витрати на мережу . Одні й самі технології віртуалізації можуть бути використані як у мережі доступу 5G RAN, так і в опорній мережі 5G Core

Багато функцій мережі можуть бути віртуалізовані за допомогою NFV і надані у різних ділянках мережі 5G RAN за допомогою SDN. Віртуалізація мережевих функцій у 5G дозволить реалізувати такі мережеві можливості, як мережева нарізка Network Slicing та обчислення у граничній мережі для різних технологій доступу MEC (Multi-access Edge Computing). [11].

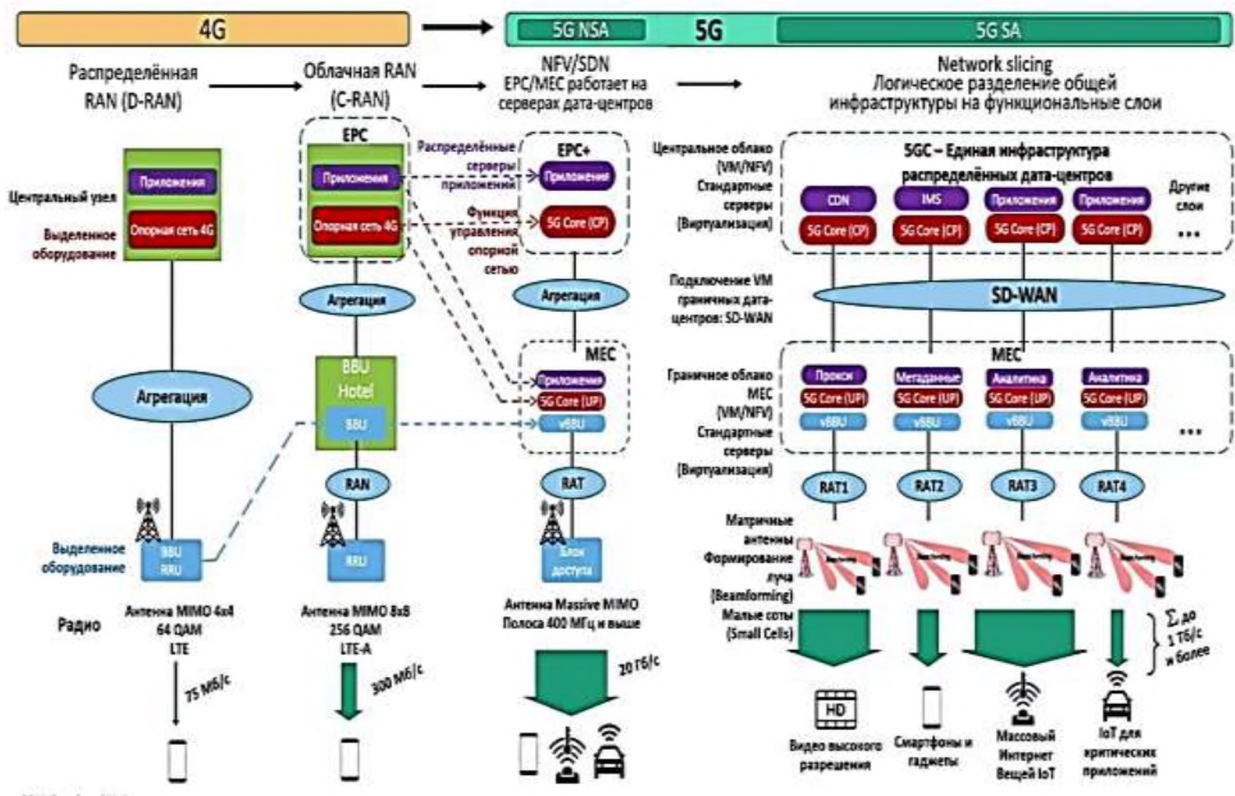


Рисунок 1.25 – Процес міграції від монолітної мережі 4G (LTE) до віртуалізованої мережі 5G

1.5 Аналіз впровадження технологій SON у мережах 5G

Основна мета впровадження алгоритмів SON у мережі мобільного зв'язку поколінь 4G та 5G – це:

- розширення інтелектуальних можливостей та застосування штучного інтелекту в системах управління, адміністрування та експлуатації;
- зниження капітальних та експлуатаційних витрат операторів (CAPEX/OPEX) при розгортанні, експлуатації та оптимізації мережі;
- підвищення спектральної ефективності мережі, продуктивності та пропускної спроможності мережі, поліпшення радіопокриття, підвищення ефективності використання ресурсів мереж радіодоступу наступного покоління (NG-RAN). [8].

1.5.1 Аналіз перспектив розвитку самоорганізації супутникової мережі 5G

Чотири головні сценарії, що розглядаються для інтеграції супутникового сегменту для мереж п'ятого покоління (ІМТ-2020), можуть включати:

- транкінгові та головні вузли фідерні лінії (Trunking and Head-end Feed);
- транспортні канали та фідерні лінії для нових базових станцій мережі (Backhauling and Tower Feed);
- лінії зв'язку для мобільних об'єктів (Communications on the Move);
- гібридні послуги для мультисервісних (Hybrid Multiplay).

На рис. 1.26 та 1.27 показано системну архітектуру супутникового сегменту 5G, яку планується розробляти на основі технології Bent-Pipe (з прозорими супутниковими транспондерами-ретрансляторами без обробки інформації на борту), де здійснюється тільки посилення та перетворення сигналів по частоті при збереженні виду модуляції. При використанні у супутникових транспондерах технології On-Board Processing на борту здійснюється регенерація, включаючи модулювання та кодування сигналів.

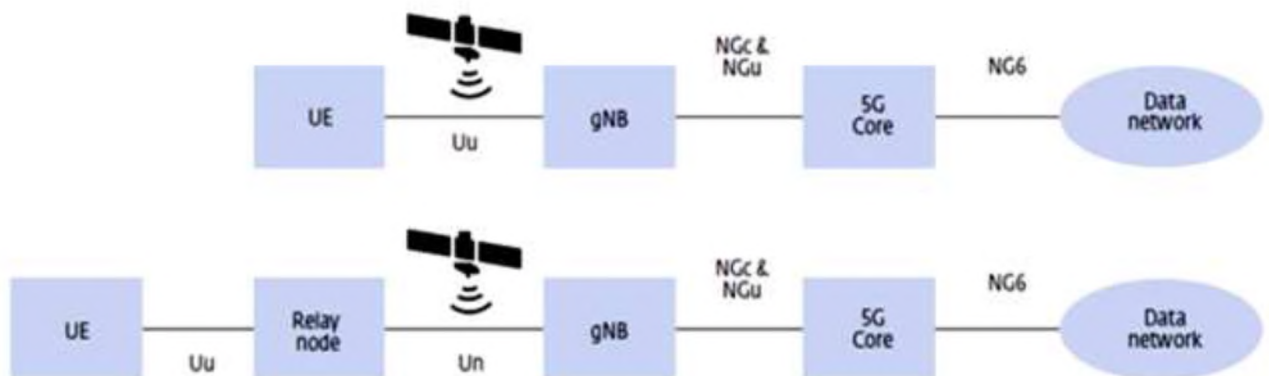


Рисунок 1.26 – Архітектура супутникового сегменту 5G на основі технології Bent-Pipe

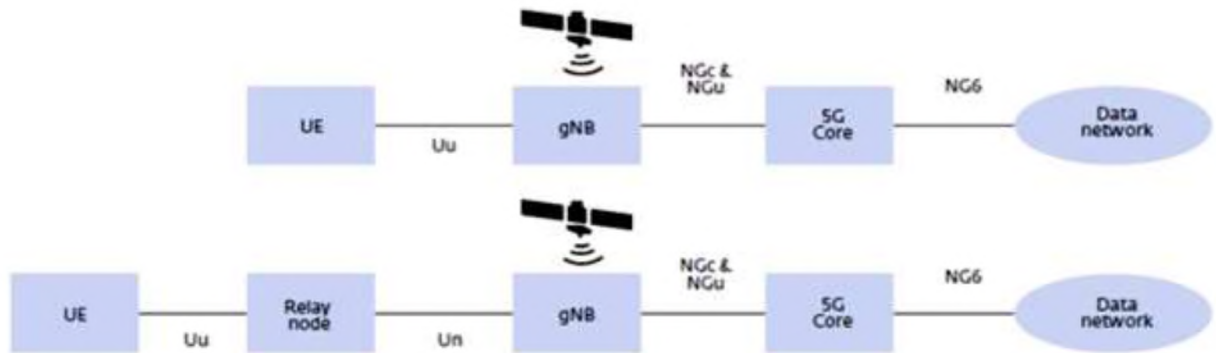


Рисунок 1.27 – Архітектура супутникового сегменту 5G на основі технології On-Board Processing

1.5.2 Побудова логічної моделі у мережах 5G

Програмно-конфігурована мережа (SDN від англ. Software-defined Networking, також програмно-визначена мережа) - мережа передачі даних, в якій рівень управління мережею відокремлений від пристроїв передачі даних і реалізується програмно, одна з форм віртуалізації обчислювальних ресурсів. Якщо розглянути сучасний мобільний або мережевий пристрій, то він логічно складається з трьох компонентів:

1. Рівень керування – це CLI, вбудований веб-сервер або API та протоколи керування. Завдання цього рівня забезпечити керуваність пристроєм.
2. Рівень управління трафіком – це різні алгоритми та функціонал завданням якого є автоматична реакція на зміни трафіку, тобто інтелект пристрою.
3. Передача трафіку – функціонал, що забезпечує фізичну передачу даних, рівень мікросхем та мережевих пакетів (рис. 1.28). [10].



Рисунок 1.28 – Логічна структура мобільних та мережевих пристроїв

Якщо взяти за основу що мережева структура дозволить виконати функції централізації управління трафіком, відділивши управління від пристроїв і функцію централізації управління пристроями то, в результаті «новий» мобільний або мережевий комутатор обслуговує тільки потік даних (рівень передачі трафіку DATAPLANE), ставати більш простим відповідно дешевим.

Весь інтелект (MANAGEMENT PLANE та CONTROL PLANE) переноситься в окремий центральний пристрій званий контролером SDN (рис 2.4).



Рисунок 1.29 – Логічна модель мережевих пристроїв SDN

У результаті така шарична мережа буде наділена функціями:

- поділ функцій передачі трафіку від функцій управління (включаючи контроль як самого трафіку, так і пристроїв, що здійснюють його передачу);
- єдиний, стандартний, відкритий інтерфейс між пристроями керування та передачі (що отримав назву OpenFlow) (рис 1.27). [10].

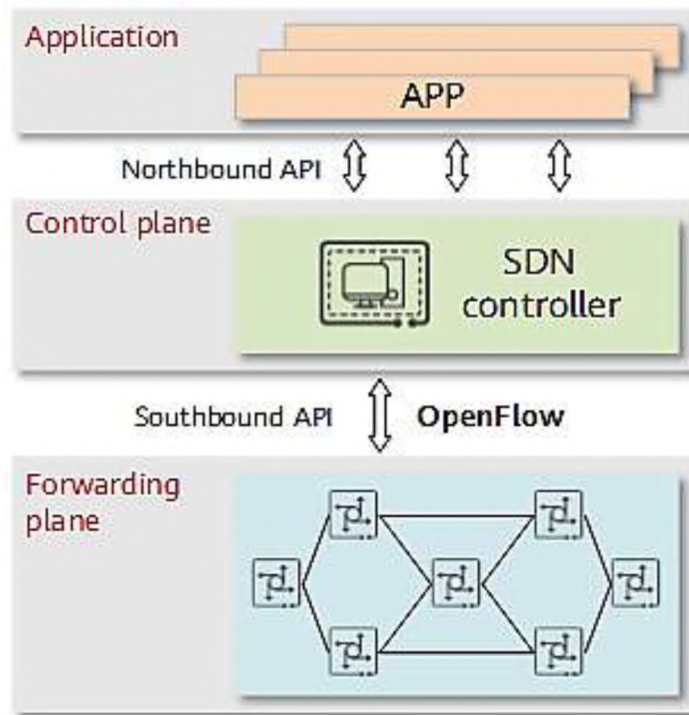


Рисунок 1.30 - Стандарти використання інтерфейсу OpenFlow

- Централізоване керування мережею (Контролер SDN).
- Віртуалізація фізичних ресурсів мережі.
- Можливості програмування як обладнання (OpenFlow), так і програм (API - Контролер SDN).
- Швидше реагувати на зміни в мережі.
- Оптимізувати передачу трафіку (L2/3) через більшу кількість резервних шляхів.
- Легше та швидше налаштовувати мережі.
- Суттєво скоротити час розгортання програм.
- Спростити керування мережними пристроями.
- Зменшити витрати на керування мережами.
- Централізоване застосування політик, збільшення продуктивності, зменшення затримок призводить до більш ефективної взаємодії користувачів та програм як у корпоративних мережах, так і в мережах датацентрів.
- Простота керування. Управління цілими мережами, а не мережними пристроями.

— Відкриті, засновані на стандартах, протоколи дозволять взаємодіяти різним виробникам мережного обладнання між собою, одночасно збільшуючи вибір замовнику та конкуренцію між вендорами при зниженні витрат, прискорюючи інновації як у галузі програмного забезпечення, так і апаратних засобів.

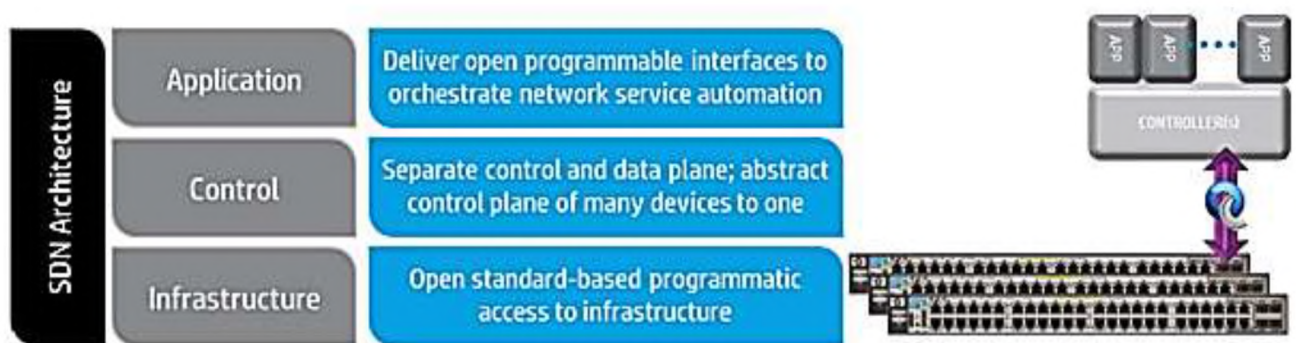
— Контролер SDN підтримує відкритий інтерфейс програмування (API), який дозволяє програмувати його ззовні, створюючи середовище для автоматизації та контролю, а також масштабувати функціонал для майбутніх програм.

— Програма може запитувати певні вимоги до мережі.

— Видимість всього трафіку мережі контролером.

1.5.3 Побудова архітектури мережі на основі SDN технології

Концепція SON та система управління 3GPP включає домен перехресного управління 3GPP і домен управління. На підставі розташування алгоритму SON SON підрозділяється на централізоване SON (тобто SON з розподілом по доменам, SON з розподілом по доменам), SON з розподілом та гібридне SON. Алгоритм SON не стандартизовано 3GPP. Наступний рисунок 2.6 ілюструє огляд SON Framework.



Source: opennetworking.org

Рисунок 1.31 – Загальна архітектура SDN

Архітектура SDN складається з трьох рівнів: прикладного рівня (площина додатку), рівня управління (площина управління) та рівня даних (площина даних).

Кожен елемент зв'язується зі своїм сусіднім рівнем за допомогою відповідного інтерфейсу. Далі у роботі відбувається дослідження SDN з точки зору ONF. Основні компоненти архітектури перераховані таким чином:

1. Площина даних: містить елементи мережі (маршрутизатори та комутатори) для обробки та пересилання трафіку даних. Площина даних представляє просту роль, яка полягає в передачі пакетів до наступного стрибка за дотриманням заданих правил.

2. Площина керування: ця площина складається з контролерів SDN, які мають ексклюзивний контроль над елементами площини даних. Кожен контролер SDN є логічно централізованим об'єктом, який переводить вимоги 40 з площини програми SDN до площини даних і надає додаткам SDN абстрактне уявлення про мережу.

3. Площина програми: яка включає одну або кілька програм, які передають свої вимоги до мережі контролеру SDN за допомогою інтерфейсу NBI (північний інтерфейс, який працює лише на передачу чи прийом). Ця площина розгортає різні програми SDN, такі як: виявлення топології мережі, надання мережевих ресурсів і резервування шляху.

4. Інтерфейс SDN SouthBound (SDN SBI) – це інтерфейс, визначений між контролером SDN та елементами площини даних. Він забезпечує програмне керування всіма операціями пересилання, статистичні звіти та сповіщення про події. Це дозволяє контролеру SDN динамічно вносити зміни відповідно до потреб мережі в реальному часі. Найпоширенішим інтерфейсом для південного напрямку є відкритий потік.

5. Інтерфейс SDN NorthBound (SDN NBI) – це інтерфейси між додатками SDN та контролерами SDN. Ці інтерфейси забезпечують абстрактні уявлення про мережу та забезпечують пряме вираження поведінки та вимог мережі.

6. Управління та адміністрування: ця площина охоплює статичні завдання, які краще обробляються поза площинами програми, керування та даних. Приклади включають управління діловими відносинами між постачальником і клієнтом, призначення ресурсів клієнтам і налаштування фізичного обладнання.

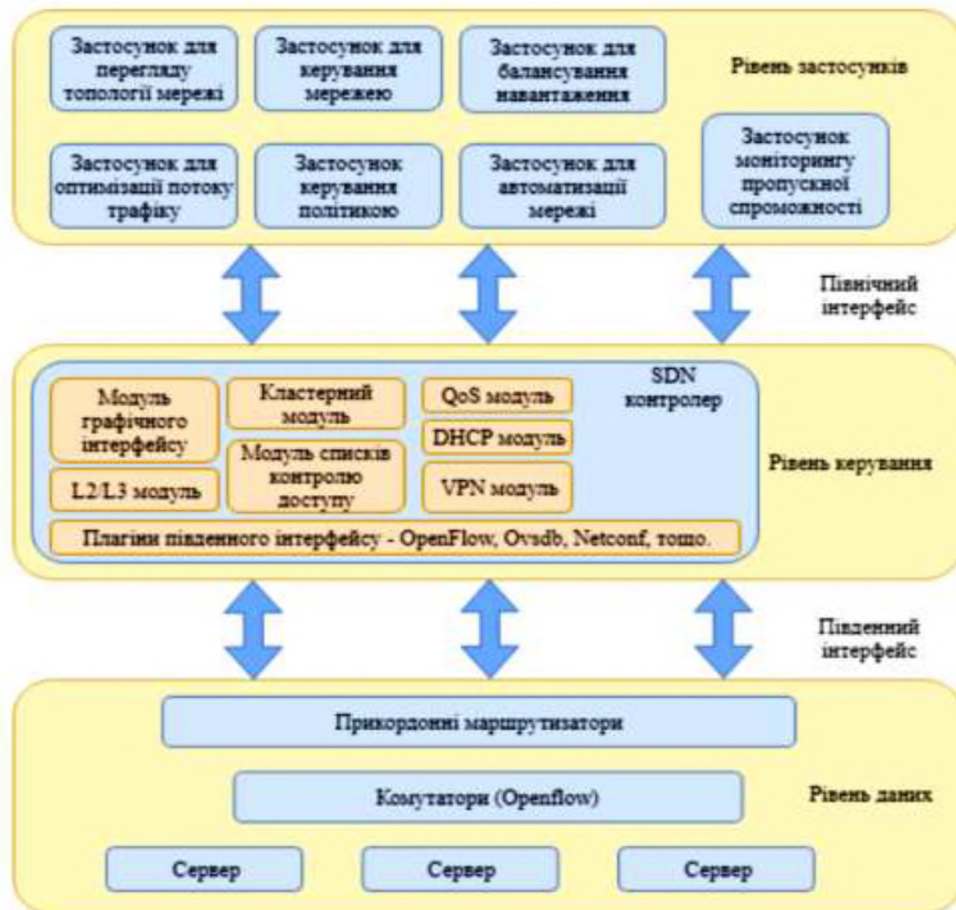


Рисунок 1.32 - Керуючі інформаційні потоки SDN Framework

Якщо розглянути докладніше інформаційні потоки в архітектурі SDN, можна помітити два основних напрямки обміну інформацією: перший між SDN додатками і другий для управління фізичними мережевими пристроями. Фізичні з'єднання, які обробляють зв'язок між комутаторами та контролями можуть бути встановлені за допомогою двох режимів керування: внутрішньосмугового та позасмугового:

— внутрішньосмугове (in-band) управління передбачає передачу керуючої інформації через існуюче з'єднання даних;

— позасмуговий (out-of-band) управління включає виділений канал керування між кожним комутатором і контролером. На рис. 1.33. зображені вищезгадані режими керування. [4].

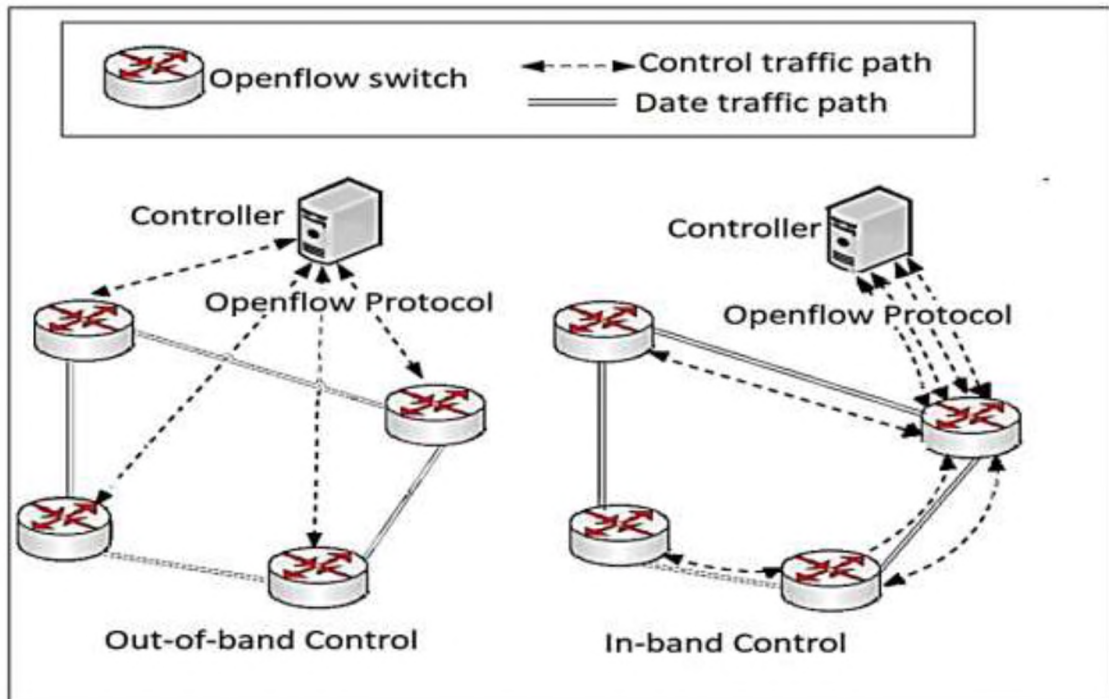


Рисунок 1.33 – Внутрішньосмугова та позасмугова модель управління

У разі використання методу управління out-of-band, комутатори мають мережеві шляхи, які необхідні, щоб зв'язатися з контролерами, на які не впливає робота протоколу OpenFlow. У протилежному випадку, під час використання in-band комутатори уже використовують протокол OpenFlow для зв'язку з контролером та для самої передачі даних. [4].

1.5.4 Побудова алгоритму роботи SON у мережах 5G

Алгоритм самоконфігурації NF буде виконано наступним чином:

- розгортання NF (фізична установка для віртуалізованої NF або створення екземпляра для VNF) автоматична установка NF у стан готовності до перенесення трафіку;
- виконання попередніх умов: - NF розгорнута (фізична установка для не віртуалізованої NF або створення екземпляра для VNF) та підключена до IP-мережі;
- NF надає інформацію про свій тип, обладнання та інші відповідні дані про

себе в систему управління, що забезпечує підтримку самоконфігурації.

— система управління, що забезпечує підтримку самостійної конфігурації, приймає рішення про те, яке програмне забезпечення та дані конфігурації (транспортний та радіозв'язок) повинні бути завантажені в NF;

— система управління, завантажує програмне забезпечення та (транспортні та радіо) дані конфігурації в NF;

— система управління, також оновлює залежні вузли новими даними конфігурації, і навіть за необхідності;

— NF виконує самоперевірку;

— система управління, інформує споживача про перебіг процесу самоконфігурування;

— NF (вузол 5GC або вузол NG-RAN) переносит трафік мобільної мережі.

Усі системи використовуються для надання послуг ШПД на різних ділянках телекомунікаційної мережі. Їхню загальну взаємодію та взаємопроникнення можна відобразити схемою (рис .1.34).

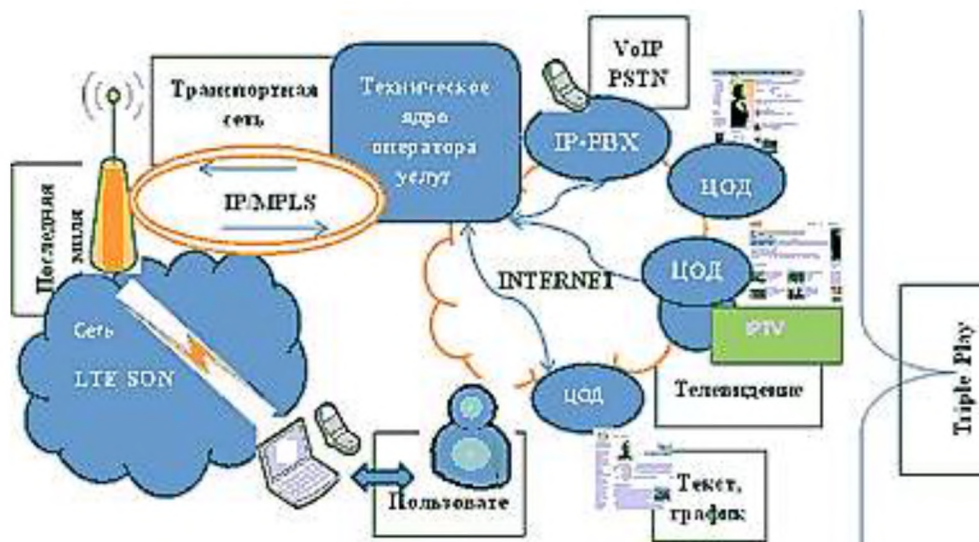


Рисунок 1.34 – Работа системы балансирования навантаження у мережі

Умови роботи системи:

— конфігурація PCI - PCI-OPT-CON-1 MnS контролю продуктивності повинен мати можливість збирати інформацію, пов'язану з колізією PCI або

плутаниною PCI;

— PCI-OPT-CON-2 MnS забезпечення продуктивності повинен мати можливість надавати PCI одного або більше осередків NR;

— PCI-CONFIG-3 MnS забезпечення повинен мати можливість встановлювати список значень PCI для осередку NR;

— PCI-CONFIG-4 MnS забезпечення повинен мати можливість активувати або деактивувати.

Ресурсна сітка. За аналогією з 4G-LTE одиницею частотно-часового ресурсу мережах 5G-NR є ресурсний блок – RB (Resource Block). Кожному абонентському терміналу на певний період для прийому/передачі даних виділяється деяке, визначене планувальником системи, кількість ресурсних блоків. Кожен ресурсний блок у частотній області містить:

$N_{sc}^{RB} = 12$ суміжних частот. Ширина лінії частот одного ресурсного блоку залежить від використовуваної нумерології (див. таблицю 1.4). [7].

Таблиця 1.4 - Нумерологія частоти, що піднесе

u (нумерологія)	Піднесуча, ΔF [кГц]	Ресурсний блок [кГц]	
0	15	12	180
1	30	12	360
2	60	12	720
3	120	12	1 440
4	240	12	2 880

У 5G-NR максимальна допустима ширина смуги частот одного радіоканалу порівняно з мережами 4G-LTE збільшилася з 20 до 100МГц для блоку радіочастот FR1 і до 400МГц для FR2. Також було зменшено захисний інтервал між двома сусідніми радіоканалами, що призвело до збільшення доступних ресурсних блоків. При цьому ширина захисного інтервалу визначається не тільки шириною частот радіоканалу, а й шириною смуги піднесучої, що може призвести до

несиметричності захисних інтервалів, якщо в рамках одного радіоканалу використовуються кілька нумерологій.

Можливі варіанти ширини смуги радіочастот одного радіоканалу і відповідна кількість ресурсних блоків для різних блоків і нумерологій наведені в таблицях 1.5- 1.7.

Таблиця 1.5 - Варіанти ширини смуги радіочастот

SCS, кГц	5МГц	10МГц	15МГц	20МГц	25МГц	30МГц	40МГц
FR1							
NRB							
15	25	52	79	106	133	160	216
30	11	24	38	51	65	78	106
60	-	11	18	24	31	38	51

Таблиця 1.6 - Варіанти ширини смуги радіочастот 50-

SCS, кГц	50МГц	60МГц	70МГц	80МГц	90МГц	100МГц
FR1						
NRB						
15	270	-	-	-	-	-
30	133	162	189	217	245	273
60	65	79	93	107	121	135

На рисунку 1.35 зображено ресурсну сітку 5G-NR:

- ресурсний елемент (RE) – мінімальна одиниця для перенесення інформації в мережі радіодоступу 5G-NR, що формується однією, що підносить на тривалості одного символу;

$N_{sc}^{RB} = 12$ - кількість суміжних піднесучих частот в одному ресурсному блоці;

W_{RB}^u - ширина ресурсного блоку (від 180кГц до 2880кГц залежно від нумерології);

$N_{\text{symbol}}^{\text{slot}}$ - кількість символів в одному слоті (12 - для нормально префікса і 14 - для розширеного);

$N_{\text{slot}}^{\text{subframe}}$ - кількість слотів в одному субфреймі (від 1 до 16 залежно від нумерології);

$N_{\text{slot}}^{\text{frame}}$ - кількість слотів в одному кадрі (від 10 до 160 в залежності від нумерології).

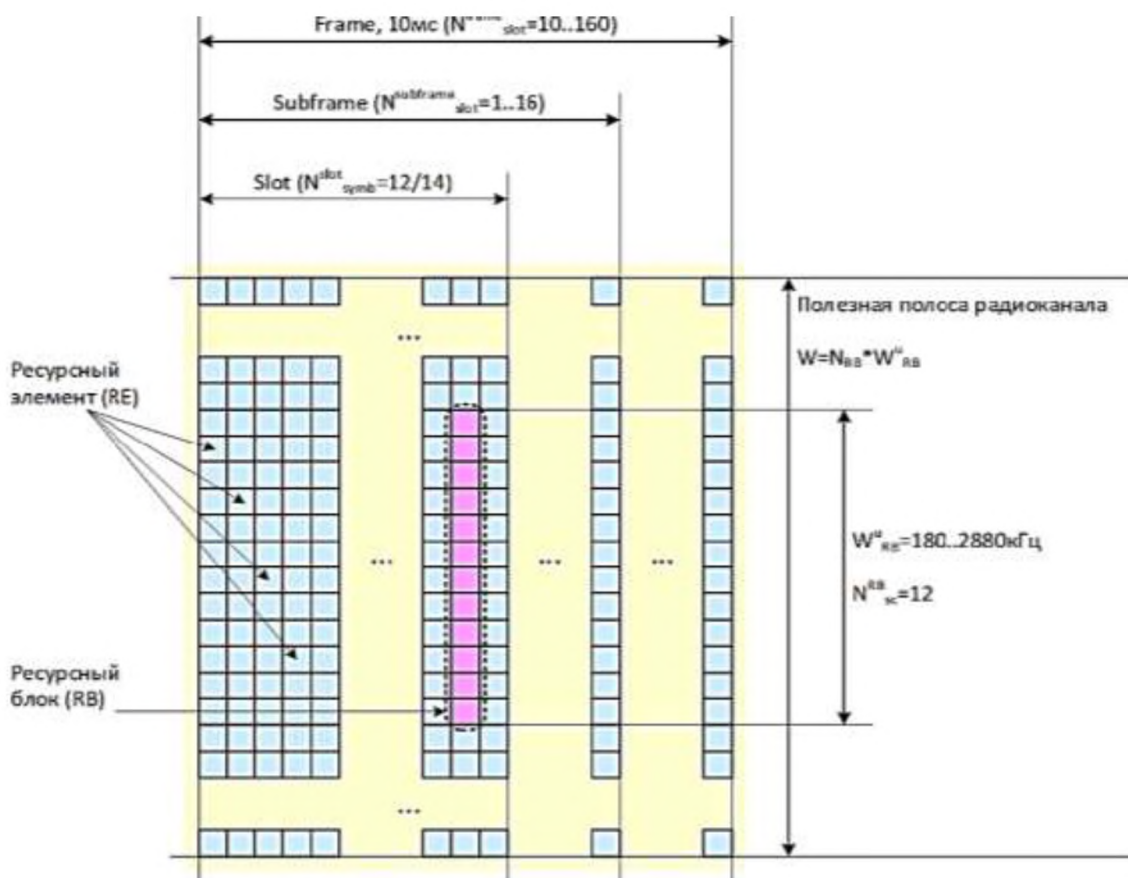


Рисунок 1.35 – Ресурсна сітка 5G-NR

Системна інформація, (NR-MIB, NR-SIB), що передається базовими станціями 5G-NR, містить різні конфігураційні параметри радіоінтерфейсу, необхідні користувальницьким терміналам (UE) для здійснення доступу до мережі, прийому та передачі даних.

Системна інформація передається в MIB (Master Information Block) та SIB (System Information Block) блоках. MIB блок передається фізичним каналом PBCH,

SIB блоки – PDSCH. У мережах 4G-LTE всі блоки системної інформації передаються з певним періодом у широкомовному режимі і приймаються всіма UE, що знаходяться в зоні дії відповідних сотень мережі. 5G-NR блоки MIB і SIB1 передаються в широкомовному режимі; інші SIB блоки в залежності від політики оператора зв'язку можуть передаватися або також у широкомовному режимі, або у виділених каналах на запит конкретних UE (див. рис. 1.25). Інформація про те, які блоки передаються на запит, а які в широкомовному режимі та параметри їх передачі міститься в SIB1. [7].

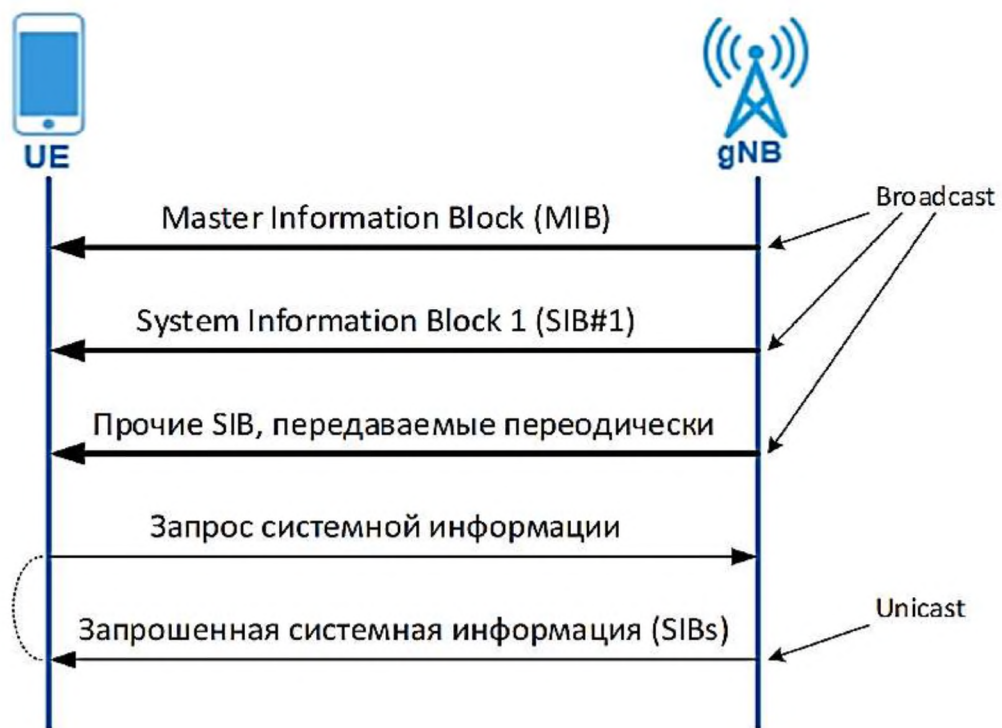


Рисунок 1.36 – Передача системної інформації

Таким чином, можливий наступний сценарій отримання терміналом користувача (UE) системної інформації:

- включення UE;
- пошук стільника, синхронізація з мережею, визначення PCI (за допомогою PSS/SSS);
- прийом PBCH, декодування MIB;
- якщо cellBarred=barred – завершення процедури;

- декодування SIB1, використовуючи параметри, отримані MIB;
- декодування інших SIB, що передаються у широкомовному режимі, використовуючи параметри, отримані в SIB1;
- ініціювання процедури випадкового доступу (RACH) та запит необхідних SIB;
- отримання та декодування запитаних SIB.

1.5.5 Балансування навантаження у мережі LTE-SON за рахунок використання властивостей самоорганізації

Технологія LTE та WiMAX створені спеціально для надання на ділянці останньої милі мобільного каналу доступу до мережі Internet, з рівнем швидкості, який можна порівняти зі стаціонарними каналами доступу. Ці технології засновані на модуляції сигналу OFDM і мають дуже високу ефективність використання частотного ресурсу (5-10 біт/с/Гц). Але в самих системах закладено ще один спосіб підвищення ефективності використання ресурсів мережі – побудова мережі на засадах самоорганізації. Self Organization Network (SON) легко інтегрується в LTE завдяки існуючим інтерфейсам, модулям та протоколам управління мережею.

Існують три основні складові концепції SON, які критичні для створення мережі:

1. Самоконфігурація - plug-and-play, автоматичне створення базової станцією переліку сусідніх станцій (ANR - Automated Neighbour Relation), автоматичне призначення CellID і налаштування радіопараметрів: частоти, контроль інтерференцій, контроль потужності сигналу випромінювання та кута нахилу антени.

2. Самооптимізація – автоматичне визначення параметрів базових станцій, які забезпечують найвищу можливу якість обслуговування абонентів (знаходження нових сусідніх станцій та видалення неактивних сусідів, координація рівнів потужності для зменшення інтерференції між сусідніми базовими станціями, оптимізація процесів хендовер та конфігурації QoS).

3. Самовідновлення – автоматичне визначення відмов у роботі обладнання та відповідну реконфігурацію мережі у разі відмови будь-якої базової станції. [11].

Тобто в мережі LTE-SON можна виділити кілька головних елементів: головне ядро, яке управляє сегментом мережі, базові та мобільні станції. Також важливими параметрами є пропускна здатність БС та пропускна здатність каналу необхідна кожній мобільній станції.

1.5.6 Аналіз застосування протоколу OpenFlow у мережах 5G концепції SDN

Openflow це стандартний протокол, є основним елементом концепції SDN, який забезпечує взаємодію контролера з мережевими пристроями. Контролер використовується управління таблицями потоків комутаторів, виходячи з яких приймається рішення про передачі прийнятого пакета на конкретний порт комутатора. Таким чином, мережі формуються прямі мережеві з'єднання з мінімальними затримками передачі даних і необхідними параметрами.

Відповідно комутатор OpenFlow складається, як мінімум, із двох компонентів:

- 1) таблиці потоків (flow table);
- 2) безпечний канал (secure channel).

MAC src	MAC dst	IP Src	IP Dst	TCP dport	...	Action	Count
•	10:20:..	•	•	•	•	port 1	250
•	•	•	5.6.7.8	•	•	port 2	300
•	•	•	•	25	•	drop	892
•	•	•	192.	•	•	local	120
•	•	•	•	•	•	controller	11

Рисунок 1.37 – Приклад таблиці потоків OpenFlow

Відповідно до вимог, контролер SDN може встановлювати за протоколом Openflow правила пересилання в елементи площини даних. Метою протоколу конфігурації OpenFlow (OF-CONFIG) є надання можливості віддаленого конфігурування обміну даними. Прикладом роботи протоколу OF-CONFIG є формування таблиці переадресації та рішень щодо дій, які протокол Openflow має виконувати.

Завдання, які містять повідомлення OF-CONFIG для OpenFlow Capable Switch, називаються конфігураційними точками OpenFlow. Жодних припущень щодо природи конфігураційної точки OpenFlow не робиться. Це може бути сервіс, що надається програмою, яка виконує функцію контролера OpenFlow або це може бути сервіс, що надається традиційною системою управління мережею. Будь-яка взаємодія між точкою конфігурації OpenFlow та контролерами OpenFlow знаходяться за межами стандарту OF-CONFIG 1.1.

На рис. 1.34. показано взаємодію різних компонентів протоколів OF-CONFIG 1.1, а лінії зв'язку показують, що точки конфігурації та комутатори, сумісні з OpenFlow, взаємодіють через OFCONFIG. Налаштування конфігурації впливають на відповідні контролери логічних комутаторів та самі логічні комутатори.

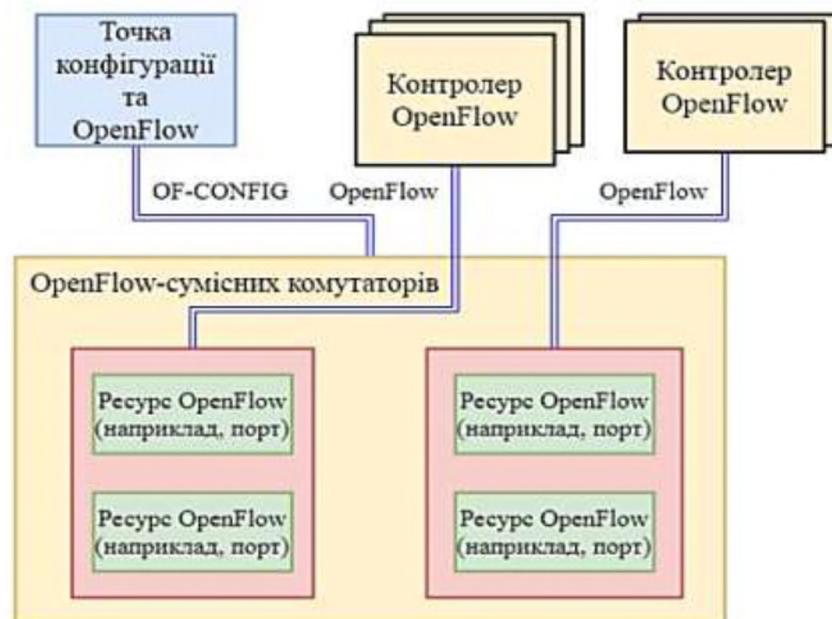


Рисунок 1.38 – Взаємодія між компонентами специфікації протоколів OF-CONFIG та OpenFlow

1.6 Висновки першого розділу

Сеть наступного покоління 5G стає ключовим игроком не тільки в галузі мобільного зв'язку, а є базисом цифрової економіки, завдяки чому можна створювати та розвивати нові та старі бізнес-моделі. У той же час існує необхідність забезпечення масштабного територіального покриття територій передових країн світу мережами 5G. Супутниковий сегмент 5G набуває своєї популярності у зв'язку з розвитком та стандартизацією мереж п'ятого покоління на іншому етапі розвитку – у період першої половини 2020-х років.

Провідні міжнародні організації зв'язку, консорціуми та виробники включилися в активні дослідження можливості створення супутникового сегменту 5G у частотних діапазонах, які виділені для супутникової радіослужби або будуть виділені для мереж 5G на майбутній ВКР-19, насамперед у діапазонах частот S, Ka та V.

Однією з найважливіших проблем майбутнього розвитку супутникового сегменту 5G можуть стати питання спільного використання радіочастотного спектру в полосах частот, що виділяються на первинній основі як супутниковому, так і наземному сегменту 5G, а також міжсистемної електромагнітної сумісності бортового обладнання та земних станцій з обладнанням базових та абонентських станцій наземний сегмент мережі.

У той же час, стандарт 5G – це не лише мережева технологія, а її потрібно розглядати як среду для обміну інформації між пристроями за допомогою якої ми зможемо реалізувати Інтернет-Речів та машиноорієнтовані комунікації. [8].

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка системи модулювання моделі

2.1.1 Застосування технології Network Slicing для поділу мобільної мережі на логічні кулі нейромережі

Вперше network slicing (мережеве сегментування) було застосовано з кінця 80-х років одночасно з введенням поняття «сегментування» в мережу. Оверлейні мережі забезпечили першу форму сегментування мережі, оскільки, гетерогенні мережеві ресурси були об'єднані разом для створення віртуальних мереж через загальну інфраструктуру. Однак, їм бракувало механізму, який міг би забезпечити їх програмування.

На початку 2000-х років PlanetLab представила фреймворк віртуалізації, який дозволяв групам користувачів програмувати мережеві функції, щоб отримати ізольовані та специфічні для програми фрагменти. Поява технологій SDN у 2009 році ще більше розширила можливості програмування за допомогою відкритих інтерфейсів, що дозволило реалізувати повністю конфігуровані та масштабовані сегменти мережі.

У контексті мобільних мереж розділення мережі почало розвиватися з концепції спільного використання RAN, яка спочатку була введена в стандарт LTE. Прикладами такої технології є багатооператорські мережі радіодоступу (MORAN) і багатооператорські базові мережі (MOCN), які дозволяють операторам мережі спільно використовувати загальні ресурси LTE в межах однієї мережі радіодоступу (RAN).

Парадигма мережі «єдиного розміру для всіх», яка використовувалася в минулих мережах мобільного зв'язку (2G, 3G і 4G), більше не підходить для ефективного вирішення ринкової моделі, що складається з дуже різних додатків, таких як зв'язок машинного типу, ультранадійна низька затримка, зв'язок і розширена доставка вмісту мобільного широкопasmового Інтернету.

Сегментування мережі стає важливою технікою в мережах 5G, щоб задовольнити такі різні і, можливо, контрастні вимоги до якості обслуговування (QoS) з використанням єдиної фізичної мережевої інфраструктури. Основна ідея сегментування мережі полягає в тому, щоб «розрізати» оригінальну архітектуру мережі на кілька логічних і незалежних мереж, які налаштовані для ефективного задоволення різноманітних вимог до послуг.

Для кількісної реалізації такої концепції використовуються кілька прийомів:

— функції мережі: вони виражають елементарні функціональні можливості мережі, які використовуються як «будівельні блоки» для створення кожного фрагмента мережі;

— віртуалізація: забезпечує абстрактне представлення фізичних ресурсів за єдиною та однорідною схемою. Крім того, він дає можливість масштабованого розгортання фрагментів на основі NFV, що дозволяє відокремити кожен екземпляр мережевої функції від мережевого обладнання, на якому він працює;

— комбінування: це процес, який дозволяє координувати всі різні компоненти мережі, які беруть участь у життєвому циклі кожного сегмента мережі. У цьому контексті SDN використовується для забезпечення динамічної та гнучкої конфігурації фрагментів.

У комерційному плані сегментування мережі дозволяє оператору мобільного зв'язку створювати конкретні віртуальні мережі, які обслуговують конкретних клієнтів і варіанти використання. Деякі програми, такі як мобільний широкосмуговий зв'язок, комунікації між машинами (наприклад, у виробництві чи логістиці) або розумні автомобілі, отримують користь від використання різних аспектів технології 5G. Для одного може знадобитися більш висока швидкість, для інших - низька затримка, а ще для іншого - доступ до граничних обчислювальних ресурсів. Створюючи окремі фрагменти, які визначають пріоритети конкретних ресурсів, оператор 5G може запропонувати індивідуальні рішення для певних галузей.

Деякі джерела наполягають, що це зробить революцію в таких галузях, як маркетинг, доповнена реальність або мобільні ігри. В той час як інші більш

обережні, вказуючи на нерівномірність покриття мережі та погане охоплення переваг, крім збільшення швидкості.

Сегментування також може підвищити безперервність обслуговування за допомогою покращеного роумінгу між мережами, створюючи віртуальну мережу, що працює на фізичній інфраструктурі, яка охоплює декілька локальних або національних мереж; або дозволивши хост-мережі створити оптимізовану віртуальну мережу, яка повторює ту, яку пропонує домашня мережа роумінгового пристрою. [13].

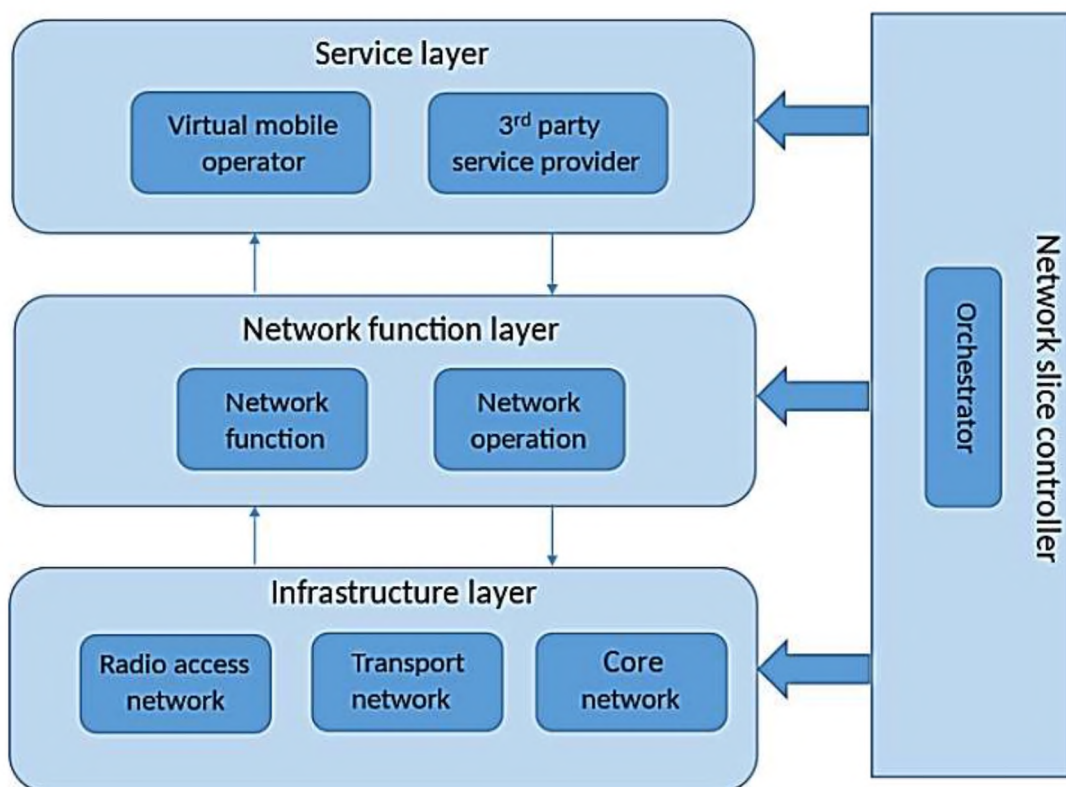


Рисунок 2.1 - Універсальна структура сегментування мережі 5G

Хоча існують різні варіанти архітектур мережевих фрагментів, можна визначити загальну архітектуру, яка відображає загальні елементи кожного рішення в загальну та уніфіковану структуру. З точки зору високого рівня, архітектуру слайсингу мережі можна розглядати як складену з двох мережевих блоків, один з яких призначений для фактичної реалізації фрагмента, а інший — для управління та конфігурації сегмента.

Перший блок розроблений як багаторівнева архітектура, що складається з трьох рівнів (сервісний рівень, мережевий функціональний рівень, рівень інфраструктури), де кожен з них робить внесок у визначення та розгортання фрагмента з різними завданнями.

Другий блок розроблено як централізований мережевий об'єкт, який у загальному вигляді позначається як контролер мережевих сегментів, який контролює та керує функціональними можливостями між трьома рівнями, щоб ефективно координувати співіснування кількох сегментів.

Сервісний рівень взаємодіє безпосередньо з мережевими бізнесоб'єктами (наприклад, MVNO і сторонніми постачальниками послуг), які спільно використовують базову фізичну мережу, і забезпечує єдине бачення вимог до послуг. Кожна служба формально представлена як екземпляр служби, який включає всі характеристики мережі у вигляді вимог SLA, які, як очікується, будуть повністю вирішені при створенні відповідного фрагмента.

Функціональний рівень мережі відповідає за створення кожного сегмента мережі відповідно до запитів екземплярів служби, що надходять від верхнього рівня. Він складається з набору мережевих функцій, які втілюють чітко визначену поведінку та інтерфейси. Декілька мережевих функцій розміщуються в інфраструктурі віртуальної мережі та з'єднуються разом, щоб створити наскрізний екземпляр мережевого фрагмента, який відображає характеристики мережі, які запитує служба. Конфігурація мережевих функцій виконується за допомогою набору мережевих операцій, які дозволяють керувати їх повним життєвим циклом (від їх розміщення, коли створюється фрагмент, до їх зняття, коли надана функція більше не потрібна).

Щоб підвищити ефективність використання ресурсів, одна і та сама функція мережі може одночасно використовуватися різними фрагментами за ціною збільшення складності управління операціями. І навпаки, відображення один до одного між кожною функцією мережі та кожним фрагментом полегшує процедури налаштування, але може призвести до поганого та неефективного використання ресурсів.

Рівень інфраструктури являє собою фактичну топологію фізичної мережі (мережа радіодоступу, транспортна мережа та базова мережа), на якій кожен сегмент мережі мультиплексується, і він надає ресурси фізичної мережі для розміщення кількох мережевих функцій, що складають кожен сегмент.

Домен мережі доступних ресурсів включає гетерогенний набір компонентів інфраструктури, таких як центри обробки даних (ресурси сховища та обчислювальної потужності), пристрої, що забезпечують підключення до мережі, такі як маршрутизатори (мережні ресурси) та базові станції (ресурси пропускної здатності радіо).

Контролер мережевого фрагмента визначається як мережевий оркестратор, який взаємодіє різними функціями, що виконуються кожним рівнем, щоб узгоджено керувати кожним запитом на сегмент. Перевага такого елемента мережі полягає в тому, що він забезпечує ефективно та гнучке створення фрагментів, які можна переналаштувати протягом життєвого циклу. Операційно контролер мережевого фрагмента відповідає за кілька завдань, які забезпечують більш ефективну координацію між вищезгаданими рівнями:

— наскрізне управління послугами: відображення різних екземплярів послуг, виражених у термінах вимог SLA, з відповідними мережевими функціями, здатними задовольнити обмеження служби.

— визначення віртуальних ресурсів: віртуалізація ресурсів фізичної мережі з метою спрощення операцій управління ресурсами, що виконуються для розподілу функцій мережі.

— управління життєвим циклом фрагмента: моніторинг продуктивності сегмента на всіх трьох рівнях, щоб динамічно переконфігурувати кожен сегмент, щоб задовольнити можливі зміни вимог SLA.

Через складність виконуваних завдань, які стосуються різних цілей, контролер мережевого фрагмента може складатися з кількох організаторів, які незалежно керують підмножиною функціональних можливостей кожного рівня. Щоб виконати вимоги до сервісу, різні об'єкти оркестровки повинні координувати один з одним шляхом обміну інформацією високого рівня про стан операцій, залучених до створення та розгортання фрагмента. [8].

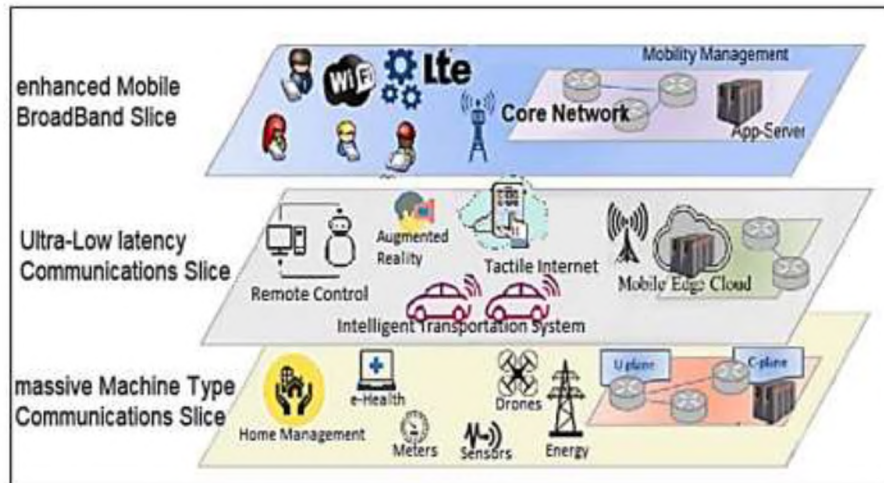


Рисунок 2.2. Сегментація в мережі 5G

Розширений сегмент мобільного широкосмугового зв'язку (eMBB): вимагає дуже високої швидкості передачі даних для виконання вимог мультимедійного вмісту, наприклад потокового відео надвисокої чіткості. Масивний фрагмент комунікації машинного типу (mMTC): цей фрагмент повинен витримувати значне навантаження трафіку підключених пристроїв, передаючи конфіденційну інформацію без затримок, наприклад, сенсорні мережі, розгорнуті в розумних містах. Фрагмент зв'язку з надмалою затримкою (URLLC): цей фрагмент повинен надавати послуги, які надзвичайно чутливі до затримок, наприклад автономне водіння, тактильний Інтернет та доповнена реальність. Він вимагає надійності, низької затримки та безпеки. [8].

2.1.2 Розробка системи імітаційного моделювання мережі 5G

Досліджувана мережа у даній магісторській роботі відповідає стандартній стільниковій архітектурі 5G, яка розділяє інфраструктуру на дві частини:

— базову мережу та мережу радіодоступу (RAN) (частиною якої є транспортна мережа), як показано на рис. 2.3. Деякі функції мережі та послуги наближені до користувача та розміщені в периферійних хмарах, розташованих біля RAN, щоб відповідати вимогам до послуг 5G, тоді як основні функції в основному хмарі;

— мережа радіодоступу, яка поділена на осередки, шкідна з яких обслуговується вузлом (B) п'ятого покоління (gNB). Хмара обчислення може покривати чи підтримувати кілька таких осередків. Щоб спростити уявлення, в цьому дослідженні ми зосередимося на одній клітинній частині хмари.

Ця гранична хмарна «комірка» складається з усього обладнання базової станції (gNB), що використовується для надання послуг, радіоресурсів стільника. Обладнання включає комутатор SDN, обладнання, що реалізує фізичні мережеві функції (PNF), та мікроцентр обробки даних, що містить функції віртуальної мережі (VNF), для підтримки, наприклад, нарізка мережі в граничній хмарі. Такі комутатори SDN комірки підключені до транспортної мережі всієї граничної хмари, яка далі підключається до магістральної мережі та основної хмари, як показано на рис. 2.3. [15].

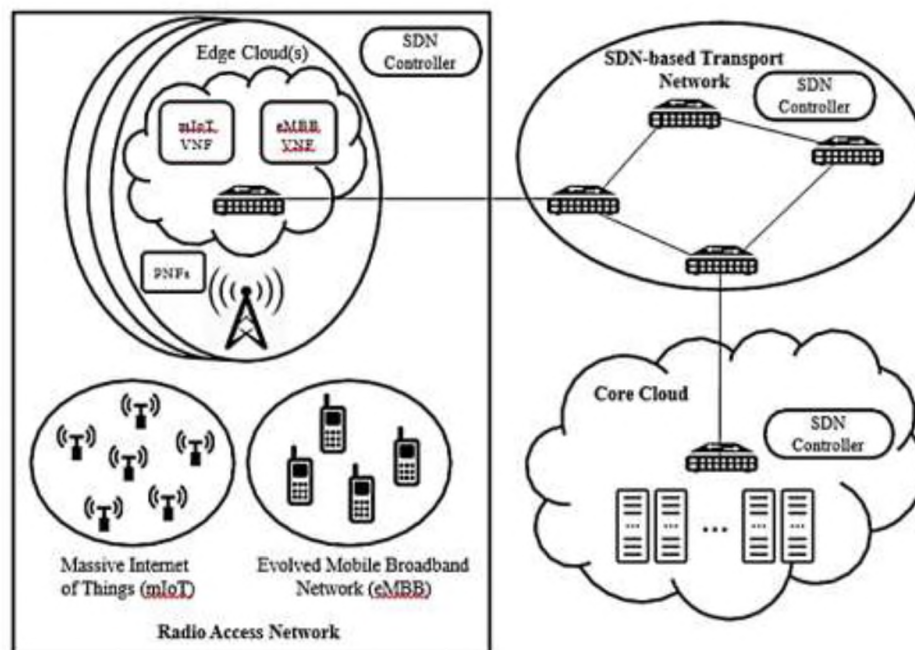


Рисунок 2.3 Огляд граничного (обчислювального) облака в мережі радіодоступу 5G

Комутатор SDN цієї конфігурації системи (i) пересилає всі дані, що надходять від мобільних терміналів і пристроїв mIoT, до відповідних функцій і маршрутів, (ii) забезпечує підключення до всього обладнання та функцій граничної хмари, і (iii) транспортує трафік з/до основної мережі та інші прикордонні хмари.

Припускається, що контролер SDN для граничної хмари знаходиться в тій самій RAN. Також передбачається, що керуючий трафік є однофазним із трафіком даних, тобто керуючий трафік використовує ті ж самі канали та займає ті самі буфери, що й трафік даних, що й надано.

Для забезпечення зв'язку між контролером SDN та комутаторами SDN розглядається архітектура OpenFlow. Хоча OpenFlow має кілька стандартних повідомлень, ми обмежимося лише тими, які використовуються для; i) сповіщення контролера про те, що надійшов новий потік, ii) встановлення нових правил на комутаторах; iii) ініціювання передачі обслуговування та iv) налаштування комутаторів. Повідомлення OpenFlow, визначені для виконання цих завдань: Packet-in, Flow-mod та Port-status.

У SDN, коли пакет надходить на комутатор, він перевіряється з таблицею потоків на комутаторі. Якщо існує правило відповідності, пакет пересилається відповідно до нього. В іншому випадку на комутаторі генерується повідомлення про введення пакетів, яке надсилається контролеру. Як тільки контролер визначить правило пересилання, він надсилає повідомлення Flow-mod всім комутаторам на маршруті, щоб вони оновлювали свої таблиці потоків.

У разі хендовера, реалізація хендовера на основі OpenFlow використовує для нього повідомлення про статус порту. У цьому підході вихідний комутатор – від місця, де передається мобільний вузол до цільового комутатора – надсилає контролеру повідомлення про відключення порту, що ініціює передачу обслуговування. Згодом цільовий комутатор надсилає на контролер повідомлення On-port, що сигналізує про те, що мобільний вузол знаходиться у зоні його покриття. Бо для шкідливого повідомлення Off-port є відповідне повідомлення On-port, їх можна спільно моделювати як повідомлення про статус порту. Контролер, зі свого боку, оновлює всі комутатори, які пересилають потоки з мобільного вузла, надсилаючи їм повідомлення Flow-mod.

Передбачається, що підтримується кілька класів послуг, таких як eMBB і mMTC, які мають дуже різноманітні характеристики трафіку. На комутаторі SDN передбачається деяка дисципліна планування між трафіком цих класів послуг для

ізоляції/диференціації між ними, тоді як у межах одного класу трафік ділиться однією і тією ж чергою FIFO.

2.1.3 Розробка моделі самоорганізованих мереж SON для хмарного простору Edge

При виконанні етапів моделювання системи, представлену раніше, на рис.2.3 розглянемо:

— трафік до комутатора на етапах створення та перенаправлення повідомлення;

— осередок граничної хмари з перемикачем, що охоплює область A_i , яка обслуговує кількість NE_i e MBB розподілених мереж та кількість n та n^m_i $mIoT$ розподілених мереж.

Це одна з n сот, що обслуговується одним контролером SDN граничної хмари. Користувачі в j -му зрізі $eMBB$ і пристрої в k -му зрізі $mIoT$ вважаються непросторово розподіленими по процесами точки Пуассона з параметрами $\alpha_j(e)$ користувачів на одиницю площі та $\alpha k(m)$ і пристроїв на територію.

Згодом відповідні процеси надходження пакетів задаються як (рис. 3.1) передній сегмент $eMBB$ та для фрагмента $mIoT$, де e та B_m позначає відповідні швидкості передачі даних, P_e і P_m означає їх середні розміри IP-пакетів, а p_e і p частки активних користувачів/пристроїв у соті у будь-який момент години. [4].

2.2 Математичний розрахунок моделі

Моделювання на 5G вимагає практичного підтвердження теоретичних матеріалів. Для вивчення теоретичної узгодженості емпіричних результатів було обрано методи моделювання MATLAB і Simulink.

2.2.1 Matlab - короткий опис

MATLAB — це високопродуктивний математичний інструмент для виконання технічних розрахунків. Він включає розрахунки, візуалізацію та програмування в зручному середовищі. Крім того, задачі та розв'язки подаються у формі, наближеній до математичної моделі.

Типове використання MATLAB:

- математичні розрахунки;
- створення алгоритмів;
- моделювання;
- аналіз, дослідження та візуалізація даних;
- наукова та інженерна графіка;
- розробка додатків, включаючи графічний інтерфейс.

Середовище MATLAB складається з таких елементів:

- меню;
- панель інструментів з кнопками та розкритими списками;
- вікно з вкладками Launch Pad і Workspace, з якого можна легко отримати доступ до різних додаткових модулів Toolbox і вмісту робочого середовища;
- вікно з вкладками Історія команд і Поточний каталог для перегляду та виклику раніше введених команд, а також налаштування поточного каталогу;
- Командне вікно командного вікна.

2.2.2 Додаткові можливості Matlab

Важлива роль в MATLAB відводиться спеціальним групам програм під назвою Toolboxes. Пакети інструментів — це комплексні набори функціональних можливостей MATLAB, які дозволяють вирішувати окремі технічні завдання. Інструменти для обробки сигналів, аналізу відео, контролю тощо. Їх використовується для моделювання систем (рис. 2.4). [12].

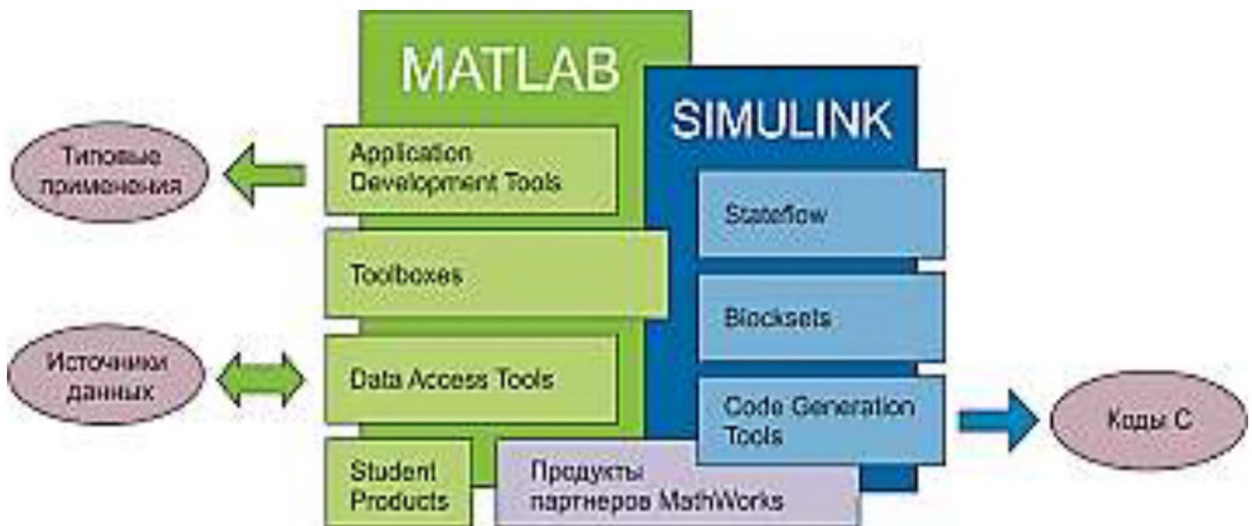


Рисунок 2.4 - Структура Матлаб функцій математичного та фізичного моделювання

Серед них для зручності використання MATLAB включає програму Simulink, яка дозволяє графічно моделювати системи. Simulink містить бібліотеку елементів (блоксетів) для побудови систем з окремих блоків і дозволяє з'єднувати ці блоки один з одним за допомогою миші.

2.2.3 Моделювання покоління 5G мережі у MATLAB Simulink

Проектування бездротових систем з використанням продуктів MATLAB і Simulink. Це, у свою чергу, перетворює ідеї на перевірені прототипи включає, моделювання антени в бітах дозволу. Радіочастотна архітектура, яка дає змогу виконувати швидке характеристичне РЧ-моделювання та симуляцію, а також бездротове тестування, яке дає змогу перевіряти ваші проекти за допомогою прямих радіосигналів. Інші завдання бездротових систем включають LTE і моделювання LTE, а також моделювання бортових і автомобільних радарів.

У цьому дипломному проекті також основний акцент зроблено на перший сценарій мережевої взаємодії – eMMB; нові впровадження, пов'язані з попереднім стандартом організації систем радіозв'язку - LTE (Long-Term Evolution), що

дозволило в кілька разів підвищити швидкість передачі даних і енергоефективність передачі мобільної інформації, збільшити спектральну ефективність і знизити затримки в мережі радіозв'язку, будуть розглянуті.

Крім того, особливості моделювання та прототипування пристроїв, що відповідають стандарту зв'язку п'ятого покоління, розглядаються в середовищі моделювання MATLAB за допомогою засобів 5G Toolbox

Які описують фізичне та математичне моделювання в рафічному середовищі програмування, симуляції та аналізу багатодомених динамічних систем. Його основний інтерфейс є графічним інструментом побудови блок-схем і налаштовується набір бібліотек блоків. (рис. 2.5).

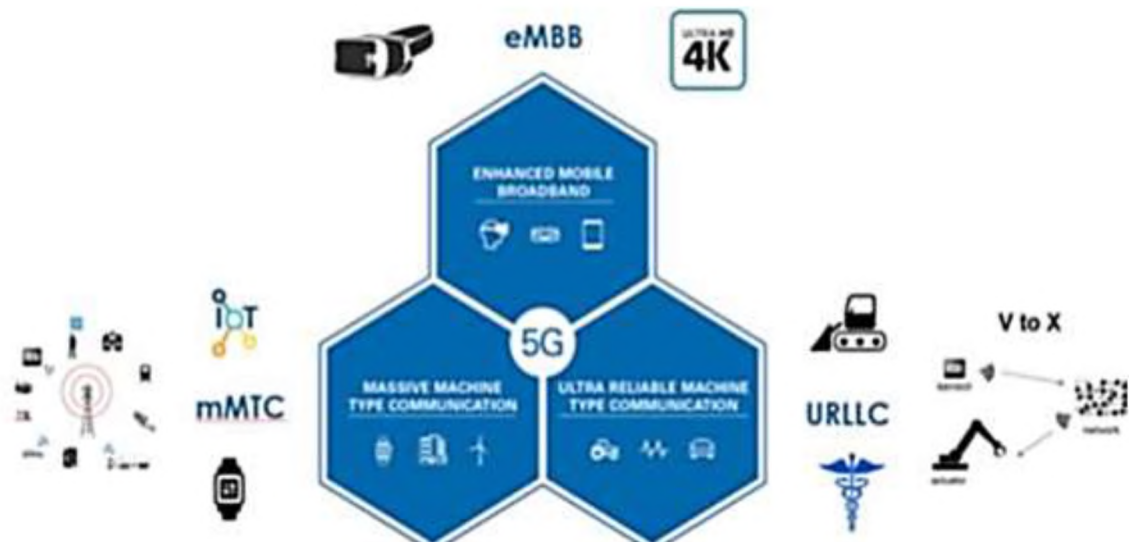


Рисунок 2.5 - Діаграма, що відображає основні сценарії взаємодії мережі в стандарті мобільного зв'язку 5G

Для цього, як приклад, основні специфікації, включені в стандарт радіоінтерфейсу 5G New Radio, перераховані в таблиці 3.1. Ці дані містять найважливіші показники, які забезпечують реалізацію представлених раніше мережевих зв'язків. Розглянемо основні етапи впровадження та впровадження стандарту 5G за цією таблицею - вони опубліковані на сайті головної провідної організації з його розробки - 3GPP вивчався з 2010 по 2015 рік, а також створення перші прототипи в цій галузі та тестування різних робіт. [4].

Таблиця 2.1 - Основні характеристики стандарту мобільного зв'язку п'ятого покоління

Найосновніші параметри стандарту 5G	
Затримка в радіоінтерфейсі	до -1 мс
Затримка між точками (від приймального пристрою до ядра мережі)	до 10 мс
Щільність з'єднання	Порівняння зі стандартом 100x (4G LTE).
Пропускна здатність відносно зони покриття	1 (Тбіт/с)/км ²
Спектральна щільність, що відповідає одному сектору	10 (біт/с)/Гц/сектор
Максимальна швидкість передачі з низхідного каналу	10 Гбіт/с
Енергоефективність	До 90% покращення порівняно зі стандартом (4G LTE). До 90% поліпшення

Роботи зі стандартизації проводилися з 2016 по 2018 рік. Через три місяці після випуску 5G Toolbox з'явився в середовищі MATLAB. Зараз готується 16 додаткових і доопрацьованих релізів, після чого з 2021 року планується почати комерційне впровадження цього стандарту. Мал 1.3 ілюструє розвиток і еволюцію стандарту 5G по відношенню до стандарту LTE. Хоча розробляються нові стандарти, підтримка стандартів попереднього покоління не припиняється. [2].

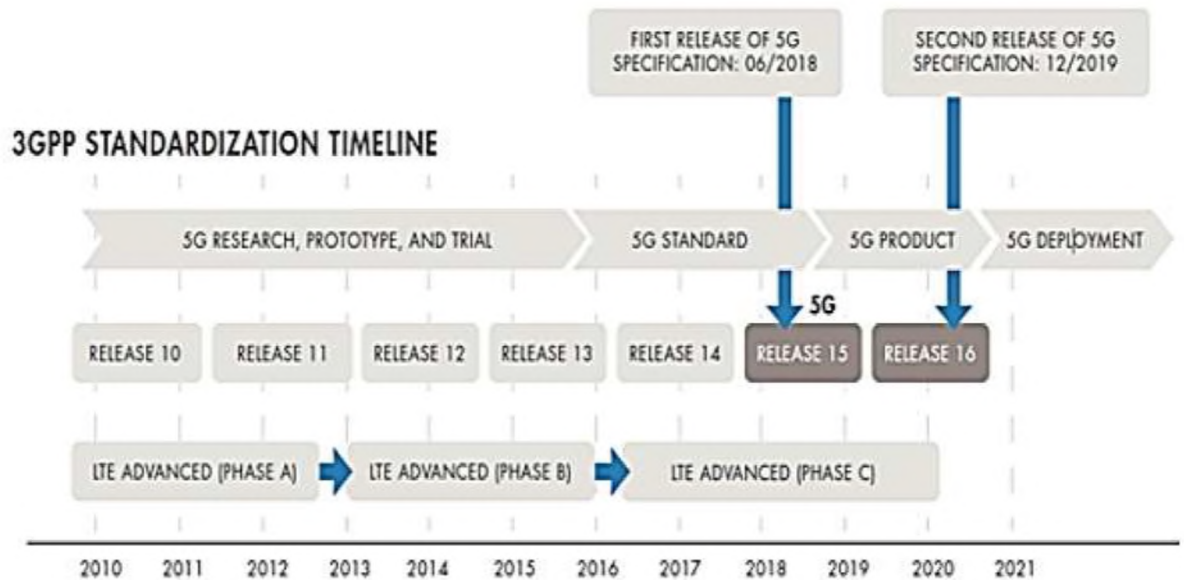


Рисунок 2.6 - Графік розвитку стандартів у поколіннях 4G і 5G. за роками

Специфікації, що визначають цей стандарт і роботу організації 3GPP, яка є його основним розробником, організовані наступним чином. Вони підключені до мережі радіодоступу (RAN - Radio Access Мережа), розділених на три основні групи технічних специфікацій (TSG - Technical Specification Groups), що відповідають за послуги та системні аспекти (SA - Service and System Aspects), ядро мережі та термінальні програми (SN - Core Network and Terminals).

Кожна група технічних специфікацій розділена на шість робочих груп (WG - Work Group), відповідальних за один із нижчих рівнів системи, описаної TSG. Фізичний підрівень 5G New Radio описується специфікаціями TSG RAN WG-1, а саме TS 38.201, де надається його загальний опис і посилання на специфікації, які описують кожну з підсистем фізичного рівня більш детально. Діаграма, що ілюструє взаємозв'язок специфікацій і положення фізичного рівня в стеку протоколів, показана на малюнку 2.7.

Представлення основних функцій стандарту 5G New Radio порівняно зі стандартом попереднього покоління;

впровадження нових частотних діапазонів в області міліметрових хвиль; використання масивної технології MIMO, нова стратегія формування частотно-часової ресурсної мережі з часовими слотами та змінними інтервалами передачі, нові схеми кодування та модель радіоканалу. [2].

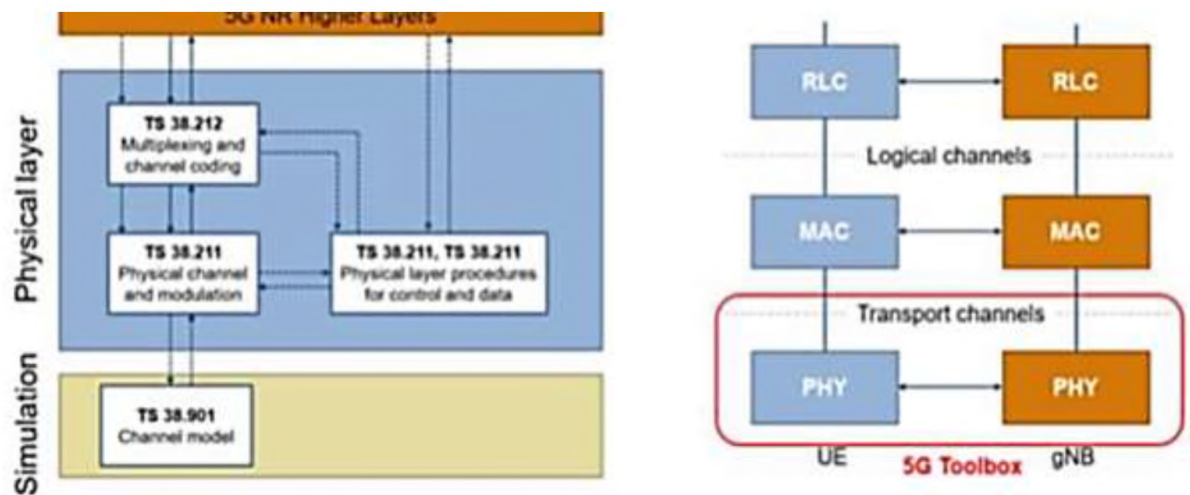


Рисунок 2.7 – Підсистеми фізичного рівня

На малюнку 2.8 показано масивну антену Huawei MIMO,- то технологія, в якій кількість терміналів користувача набагато менше, ніж кількість антен базової станції (мобільної станції).

Особливістю Massive MIMO є використання багатоелементних цифрових решіток[1], з кількістю антенних елементів 128, 256 і більше.[3 з метою спрощення апаратної реалізації та зниження вартості таких багатоканальних цифрових антенних ґрат використання в них багатомодових оптоволоконних інтерфейсів як різновиду радіофотоніки є єдиним розумним вибором не тільки при роботі на прийом сигналів, але і для передачі даних.

Зниженню вартості систем Massive MIMO у перерахунку на один канал сприяє застосування комбінованих методів децимації відліків АЦП, що поєднують зниження темпу надходження даних з їхньою попередньою (anti aliasing) фільтрацією, зміщенням за частотою та квадратурною (I/Q) демодуляцією.[9] Крім того, спрощення обробки сигналів може досягатися адаптивним зміною кількості каналів у системі Massive MIMO відповідно до перешкодової ситуації в ефірі. Для цього слід використовувати динамічну кластеризацію окремих груп антенних елементів цифрової антеної ґрат у підрешітці.

Схемотехнічна база систем Massive MIMO базується на використанні модулів обробки сигналів стандартів CompactPCI, PCI Express, OpenVPX та ін. Технологія Massive MIMO є однією з ключових для реалізації систем стільникового

зв'язку 5G[9][11] і удосконалюватиметься в міру переходу до систем зв'язку 6G.

Технологія Massive MIMO низько сфокусована для формування вузького променя і до заданої точки в зоні покриття базової станції.

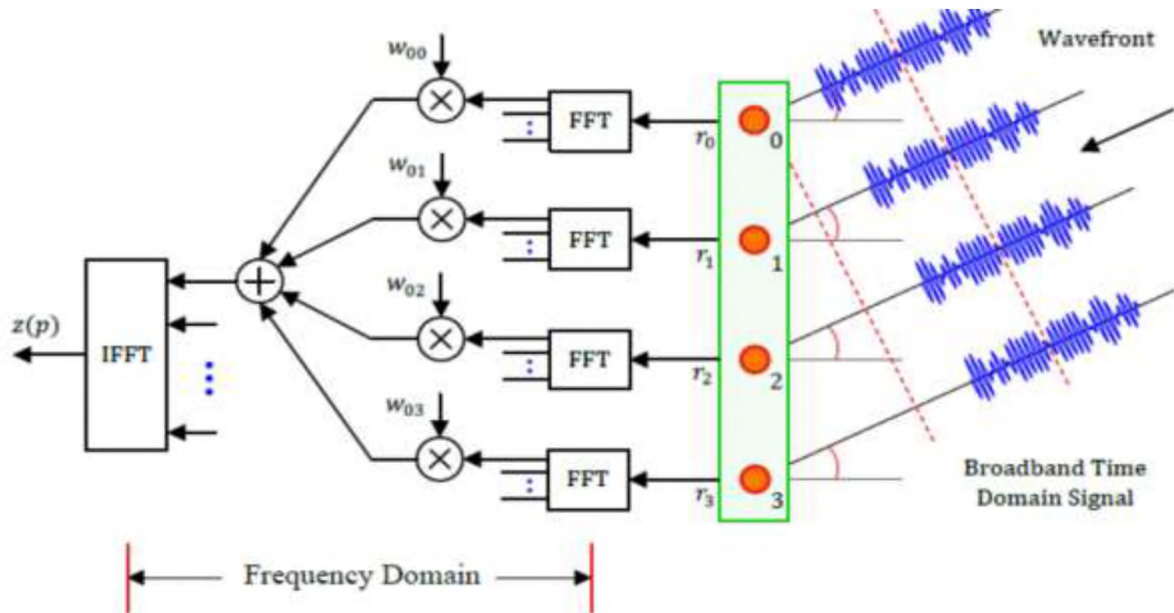


Рисунок 2.8 - - технологія бездротових мереж (Beamforming)

Пов'язаною з Massive MIMO технологією є "Формування променя" (Beamforming) - ключова технологія бездротових мереж, яка передає сигнали спрямованим чином.

Beamforming 5G забезпечує надійне бездротове з'єднання для сторони, що приймає. У звичайних системах, коли в малих стільниках не використовується формування променя, переміщення сигналів у певні області дуже утруднене, через перешкоди (стіни додому, дерева тощо).

Технологія Beamforming вирішує цю проблему, використовуючи "малі стільники" (Small Cells) з формуванням променя, які можуть передавати сигнали у певному напрямку на такі пристрої, як мобільні телефони, ноутбуки, автономні транспортні засоби та пристрої IoT. Beamforming підвищує ефективність та економить енергію мережі 5G. [17].

Beamforming можна розділити на три категорії: цифрове формування променя, аналогове формування променя та гібридне формування променя.

Цифрове формування променя: розрахований на багато користувачів MIMO аналогічний цифровому формуванню променя, який в основному використовується в мережах LTE Advanced Pro і в діапазонах 5G NR (New Radio).

Цифрове формування променя: одні й самі частотні ресурси чи часові інтервали можуть використовуватися одночасної передачі кількох користувачів, що підвищує пропускну спроможність осередків бездротових мереж.

Аналогове формування променя: у міліметровому діапазоні частот 5G NR аналогове формування променя є дуже важливим підходом, що покращує покриття. При цифровому формуванні променя можливі великі втрати на трасі в міліметрових діапазонах, оскільки формується лише один промінь на набір антен, тоді як аналогове формування променя усуває цей недолік.

Гібридне формування променя: гібридне формування променя є комбінацією аналогового формування променя і цифрового формування променя. У міліметрових діапазонах мережі 5G, в основному, використовуватиметься гібридне формування променя.

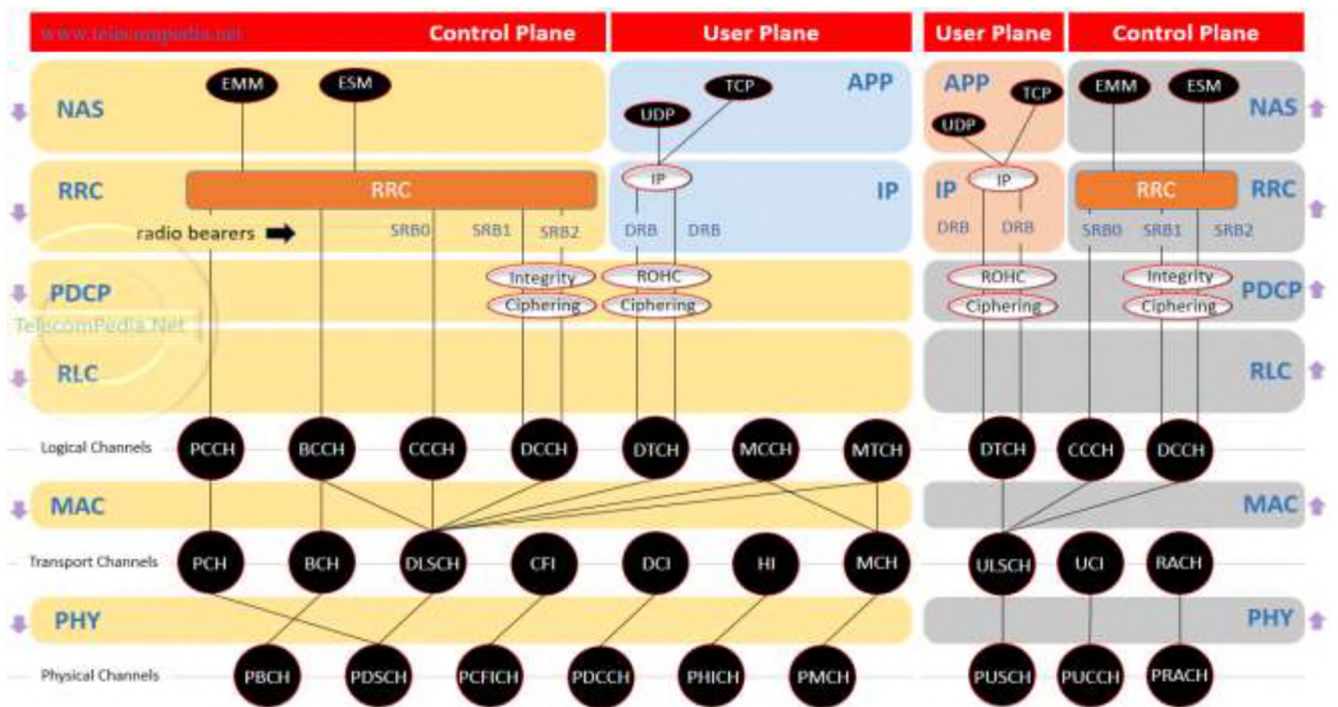


Рисунок 2.9 - Взаємодія підсистем фізичного рівня та їх розташування в стеку радіопротоколів

Завершуючи стандартний короткий огляд, ми переходимо до функціональності 5G Toolbox у середовищі моделювання MATLAB. Перш за все, це генерація сигналів 5G New Radio, в результаті чого можна отримати розрахунки сформованого сигналу на низьких частотах. Далі, використовуючи одну з платформ, таких як SDR-Xilinx Zynq & ADFMCOMM або ADALM-PLUTO, цей сигнал можна перетворити на робочу частоту і транслювати в радіоефір. В даному випадку мова йде не тільки про F-OFDM-сигнал, а й про повноцінний сигнал мережі низхідного зв'язку стандарту покоління 5G. Перш за все, давайте розглянемо можливості цього інструменту для генерації сигналів F-OFDM.

Основна відмінність цього методу генерації сигналів від класичного ортогонального розподілу частот полягає в тому, що транслювані сигнали поділяються на піддіпазони і до кожного з піддіпазонів застосовується фільтрація. Можливість використання такої методики формування сигналу забезпечує гнучкість частотно-часового ресурсу мережі стандарту п'ятого покоління. На рисунку 3.5 показані діаграми, що ілюструють принцип формування сигналу F-OFDM і порівняння амплітудного спектру сигналів F-OFDM і OFDM.

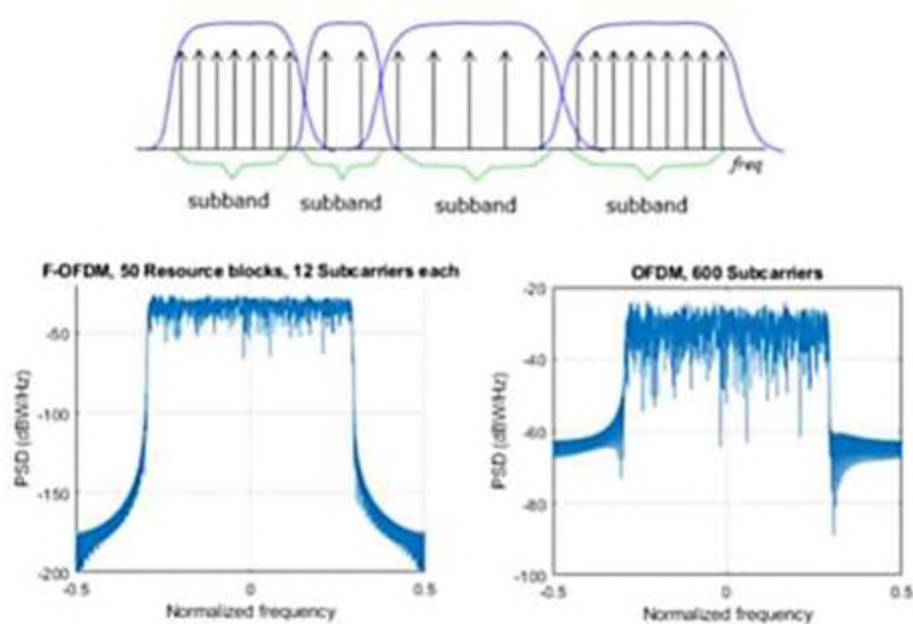


Рисунок 2.9 - амплітудні спектри F-OFDM і OFDM сигналів і принцип формування

OFDM - (Orthogonal frequency-division multiplexing - мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів) є цифровою схемою модуляції, яка використовує велику кількість близько розташованих ортогональних піднесучих (мультиплексування). Кожна піднесуча модулюється за звичайною схемою модуляції. [14].

N-OFDM (Non-Orthogonal Frequency Division Multiplexing - мультиплексування з неортогональним частотним поділом каналів) є цифровим методом модуляції, що використовує безліч близько розташованих, неортогональних за частотою. Як і в OFDM, кожна піднесуча модулюється за звичайною схемою модуляції.

Також можливе створення адаптованої моделі для генерації HDL-коду в середовищі MATLAB-Simulink. Приклад моделі цієї системи наведено на рис. 2.10.

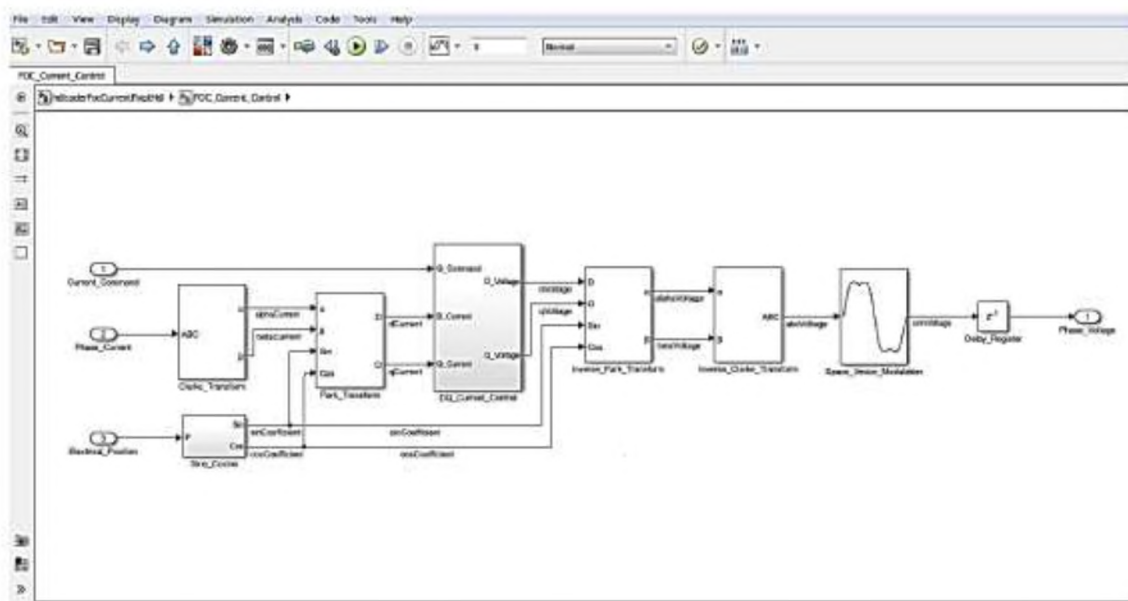


Рисунок 2.10 - Модель у MATLAB-Simulink для генерації HDL-коду

Далі розглянемо мережу стандартних частотно-часових ресурсів у генерації 5G та генерацію сигналів, створених відповідно до побудови фізичного каналу магістрального зв'язку.

Електронний зв'язок включає велику кількість апаратних компонентів або мережевих пристроїв, з'єднаних за допомогою проводів, радіоліній, радіорелейних

або волоконно-оптичних ліній зв'язку. Інформація передається від одного пристрою до іншого шляхом передачі електричної або електромагнітної енергії через цю мережу з використанням різних методів вбудовування або кодування інформаційного «вмісту» в потік даних.

Теоретично закони фізики встановлюють максимальну швидкість передачі даних для таких мереж рівну швидкості світла, але в більшості випадків практичні обмеження в кодуванні даних, маршрутизації та управлінні трафіком, співвідношенні сигнал/шум, а також подоланні електричний, магнітний і оптичний шум і небажані паразитні сигнали спотворюють потік інформації або створюють перешкоди для її проходження, обмежуючи можливість мережевого зв'язку деякою частиною її ідеальної продуктивності. [12].

Структура сітки частотно-часового ресурсу наведена на рис. 2.11.

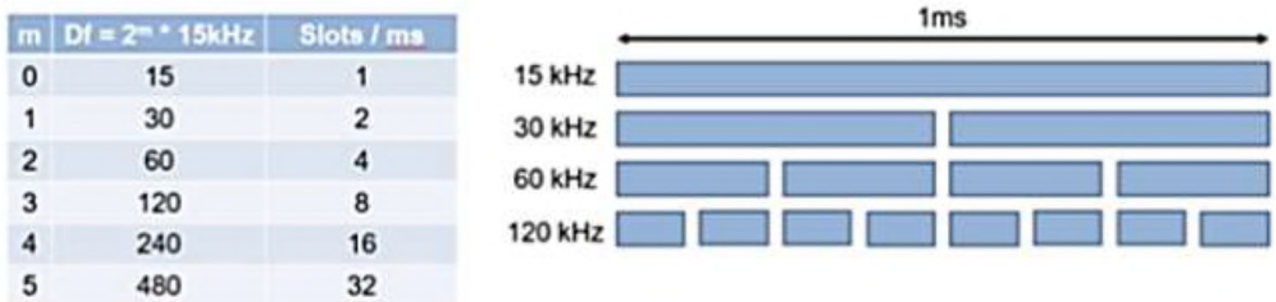


Рисунок 2.11 - Мережа частотно-часових ресурсів стандарту покоління 5G

У порівнянні зі стандартом зв'язку 4G LTE існує інтервал передачі фіксованою і становила 15 кГц, інтервал передачі 5G визначається за формулою:

$$\Delta F = 2^m \cdot 15 \text{ Гц} .$$

Ця новинка має велику кількість передплатників дозволяє організувати більш гнучку структуру доступу. MATLAB 5G Toolbox використовує фізичні канали (Physical Downlink Shared Channel - фізичний канал низхідних даних).

PDCCCH (Physical Downlink Control Channel - фізичний контроль і контроль канал), PDBCH (Physical Downlink Broadcast Channel - контроль і контроль

фізичного каналу), PDBCH (Physical Downlink Broadcast Канал – широкий канал розповсюдження, що містить базову інформацію).

Крім того, PSS (основні служби синхронізації SSS (додаткові Synchronization Sequence) і новий стандарт 5G - DM-RS (Demodulation Reference Signal) опорний сигнал для демодуляції. 5G Графічне представлення сигналу 5G NR, згенерованого за допомогою Toolbox показано на рис. 2.12.

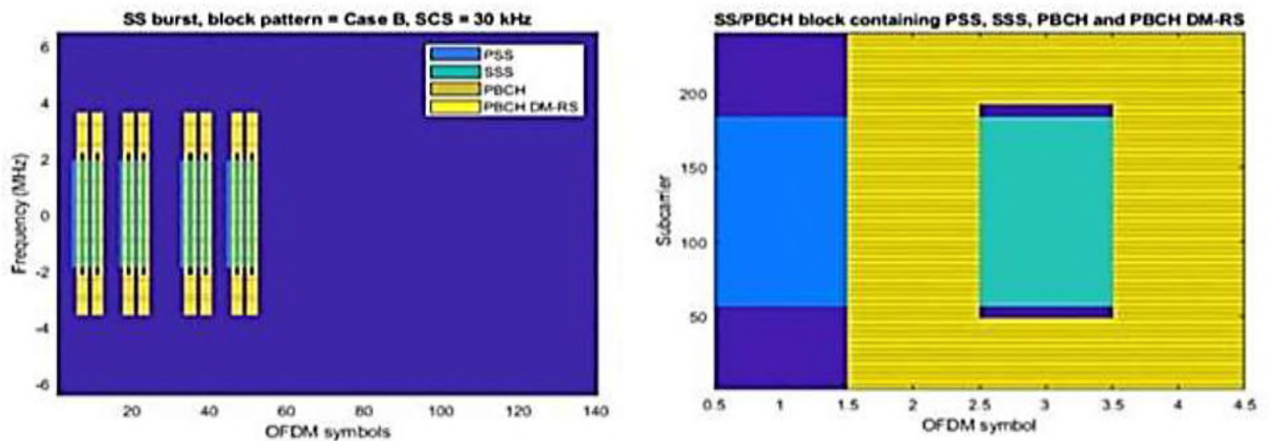


Рисунок 2.12 - Пропагатор проекту підтримки, що реалізує синхронізацію

Генератор сигналів стандартної/довільної форми, 10 МГц 326, 327. 33509В/. Trueform, 20 МГц, 1/2 канал.

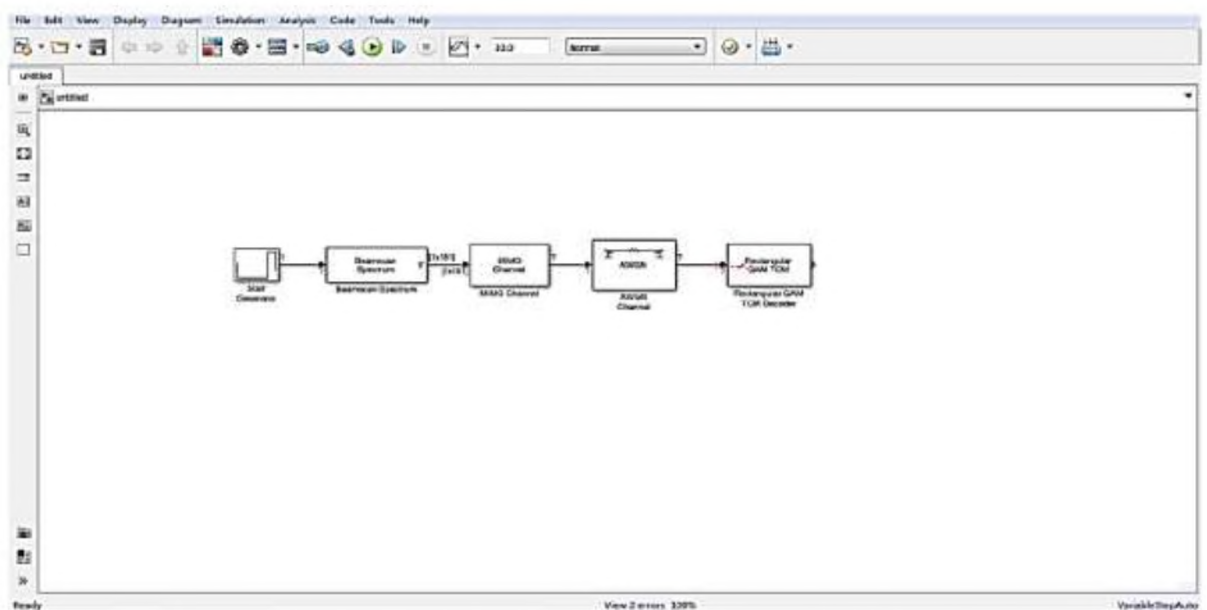


Рисунок 2.13 - Структурна схема блоку передавача, що здійснює синхронізацію

Формується синхронна передача, потім сигнал пропускається через модель антени і модель каналу зв'язку, а потім будується АБГШ (аддитивний білий шум Гауса). Тоді приймач працює зі сформованим сигналом «всліпу», тобто модель не надає йому ніякої додаткової інформації, крім розрахунку сформованого сигналу. Розглянемо його роботу детально на блок-схемі, зображеній на рис. 2.14.

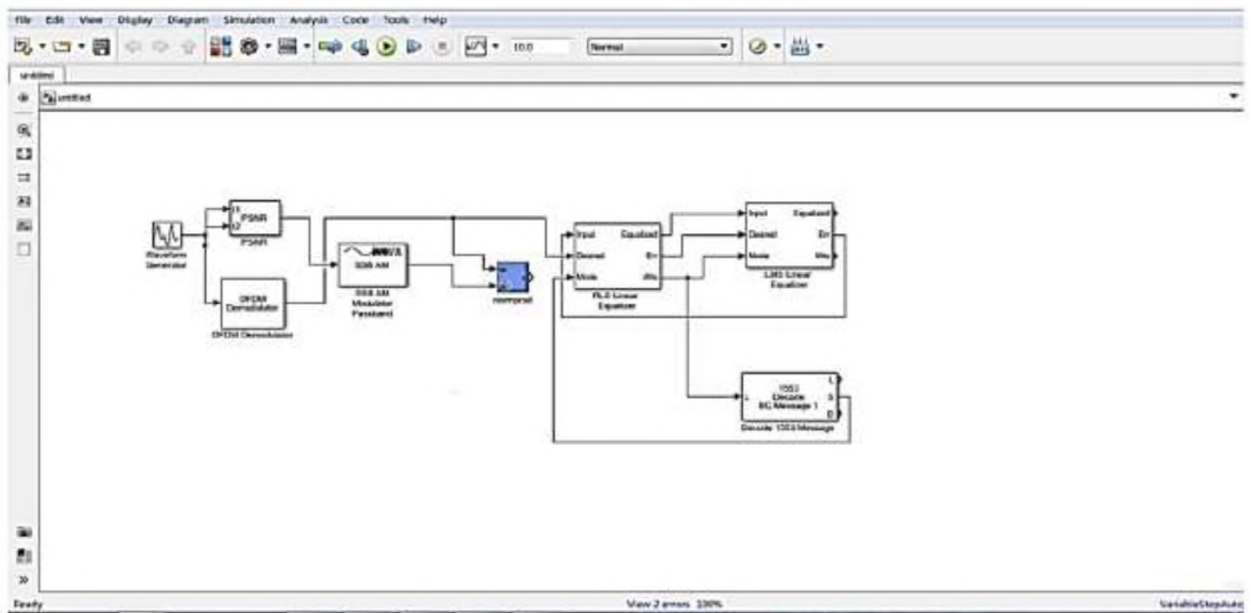


Рисунок 2.14 - Блок-схема приймальної частини проекту підтримки, що реалізує синхронізацію

Крім того, 5G Toolbox включає структуру для системної моделі взаємодії точка-точка (UE-gNb), яка може бути використана для оцінки рішень, прийнятих під час розробки пристроїв цього стандарту. Це може бути використаний як стенд, а також еталонний зразок для оцінювання виконання вимог стандарту. Графічна інтерпретація цієї моделі наведена на рис. 2.15. [11].

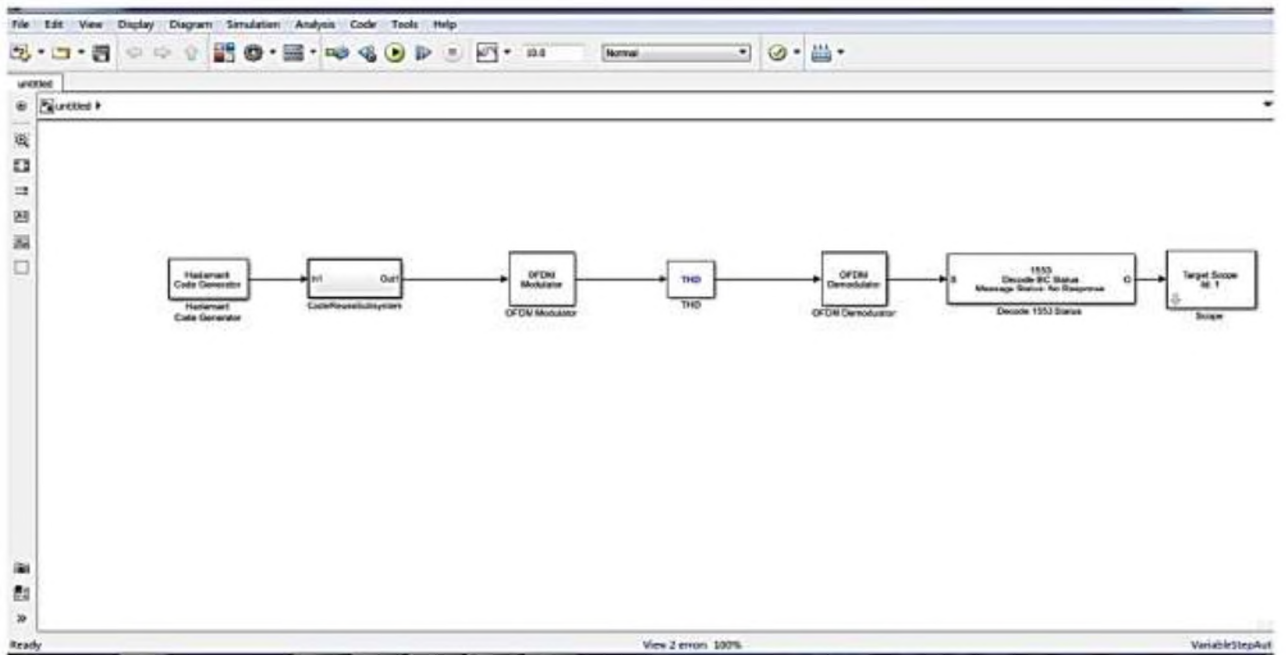


Рисунок 2.15 - Графічна інтерпретація моделі, що реалізує синхронізм

2.2.4 Проектування бездротової системи в Matlab

Включає такі функції та функції для проектування бездротової системи в Matlab. Для цього в Matlab використовується наступна діаграма (рис. 2.16).

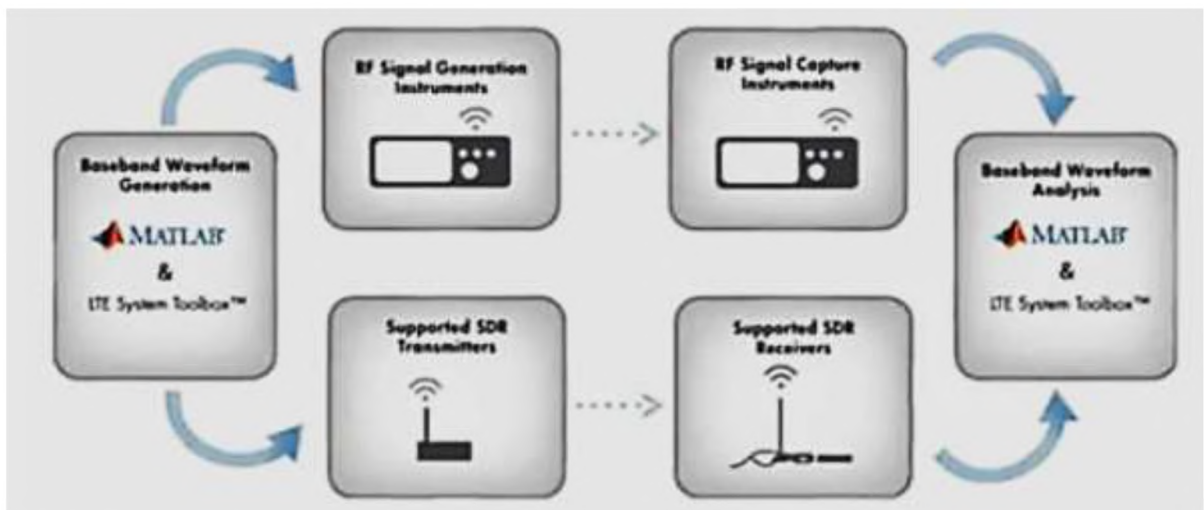


Рисунок 2.16 - Схема конструкції бездротової системи в MATLAB

За допомогою цієї схеми можна моделювати фізичний рівень сучасних бездротових систем, включаючи алгоритми OFDM і MiMO.

3GPP бере активну участь у стандартизації систем зв'язку наступного (п'ятого) покоління (5G). Нова система має багато аспектів, пов'язаних із конкуруючими вимогами та різними рівнями обслуговування. Він також включає нові типи різних сигналів, нові схеми множинного доступу, альтернативні схеми кодування каналів і, найголовніше, гнучку структуру кадру.

У цьому прикладі показано інтеграцію двох типів кандидатів на основі OFDM, а саме F-OFDM і UFMC, у ланцюг обробки фізичного рівня LTE MIMO для каналу PDSCH. У цьому прикладі порівнюється продуктивність бер для нових форм існуючих сигналів CP-OFDM, що використовуються в 5G. Для цього ми пишемо таку програму в MATLAB:

$$h = \text{LTE з 5 ГГц};$$

Тоді після цієї команди відкриється вікно, зображене на рис. 2.17.

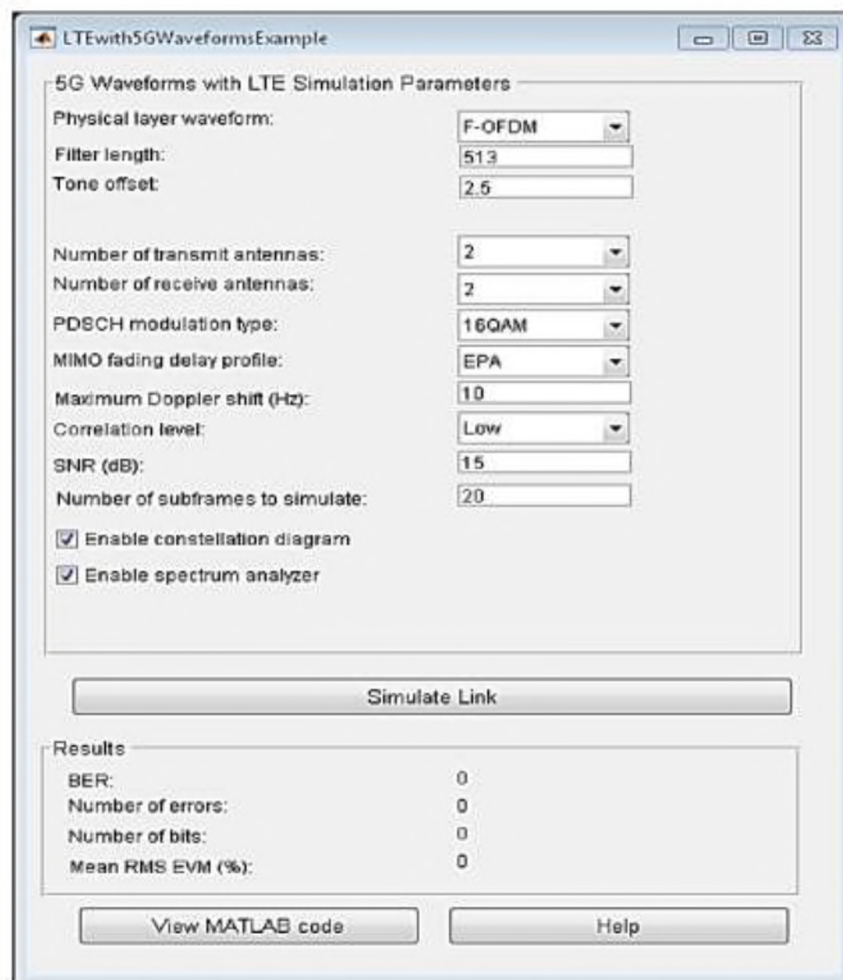


Рисунок 2.17 – Вікно LTE with 5G waveforms

Цей графічний інтерфейс MATLAB дозволяє налаштувати наступні параметри посилання:

- рівень фізичних об'єктів - F-OFDM, UFMC або SR-OFDM;
- довжина фільтра – довжина фільтра, яка використовується у зразках, включена лише для F-OFDM;
- додаткова пропускна здатність додана лише для Tone Shift-F-OFDM;
- Sidelobe (dB) - Бажаний sidelobe в дБ, доданий лише для UFMC;
- кількість передавальних антен 1, 2 або 4;
- кількість приймальних антен 1, 2 або 4;
- тип модуляції для бітів даних PDSCH-QPSK, 16QAM, 64QAM або 256QAM;
- профіль затримки завмирання MIMO-EPA, EVA або ETU TS 36.101 [11];
- рівень кореляції - низький, середній або високий, TS 36.101.

SNR (дБ) — це скалярне значення, яке представляє рівень SNR в дБ для каналу.

Кількість кадрів для моделювання є скаляром, що визначає довжину моделі, виміряну з кроком 1 мс, що відповідає даним, які потрібно обробити.

У ланцюжку обробки приймача позначте «Увімкнути діаграму сузір'я», щоб відобразити діаграму сузір'я для сигналу перед розмежуванням символів.

Поставте прапорець «увімкнути аналізатор спектру» для відображення спектру переданих і прийнятих сигналів. Аналізатор спектру відображає останній символ OFDM.

Піковий доплерівський зсув (Гц) - невід'ємне скалярне значення, що представляє піковий доплерівський зсув у Гц.

Тенденція бездротового зв'язку 5G полягає у переході на більш високі частоти в спектрі міліметрових хвиль і у використанні більшої кількості передавальних і приймальних антен. Оскільки втрати на шляху в міліметровому діапазоні довжин хвиль значні, для забезпечення максимального посилення формування променя для подолання втрат на шляху потрібна більша матриця.

Щоб мати можливість керувати кожним елементом масиву, за кожним елементом слідує перемикач передачі та прийому, який часто називають перемикачем T/R, для досягнення максимальної гнучкості формування променя. Однак у великому масиві така компонентізація може бути складною як через міркування вартості, так і через обмеження простору. Тому в останні роки гібридне формування променя стало популярним методом компромісу для досягнення бажаної продуктивності.

У наступному розділі пояснюється, як змодельовати гібридну схему формування променя за допомогою описаної вище системи. Хоча масив із 8 елементів не є великим масивом, концепція залишається незмінною.

Гібридна технологія формування променя не включає перемикач T/R для кожного елемента. Натомість він групує елементи масиву. Кожна підмножина має перемикач T / R, але в кожній підмножині для кожного елемента є лише фазовий повертач. Цей сигнал можна контролювати як за амплітудою, так і за фазою на рівні підмережі, а також за фазою на рівні елемента. Фазовий ревер зазвичай реалізується за допомогою аналогових компонентів, а вагові коефіцієнти сітки можна використовувати в цифровому вигляді, що дало йому назву гібридного формування променя.

Далі рис. 2.18 діаграма показує типову гібридну конфігурацію формування променя.

Аналізатор спектру відображає переданий і прийнятий сигнал. Спектр переданого сигналу показує бічні завмирання або позасмугове випромінювання, тоді як спектр прийнятого сигналу дає уявлення про частотну вибірковість каналу по виділеній смузі пропускання. Аналізується весь сигнал субкадру. [6].

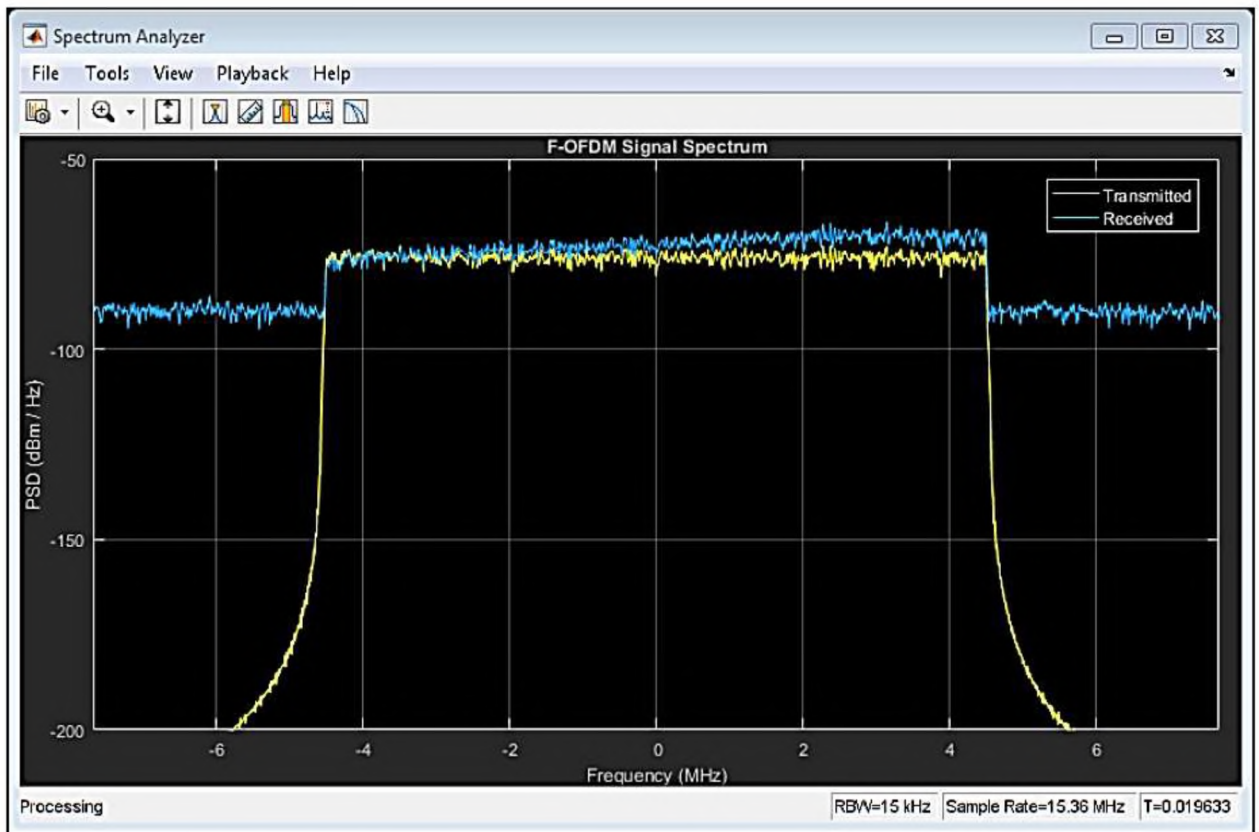


Рисунок 2.18 - спектральний аналіз F-OFDM сигналу

Констеляційна діаграма прийнятого сигналу (рис. 2.19) - передсимвольний сигнал зворотного відображення забезпечує візуальну індикацію продуктивності каналу зв'язку.

Різні значення комплексної амплітуди радіосигналу видаються у вигляді точок на двовимірній точковій діаграмі на комплексній площині. Більш абстрактно, на діаграмі відзначені всі значення, які можуть бути обрані схемою маніпуляції, як точки на комплексній площині. Сигнальні сузір'я, отримані в результаті вимірювання комплексної амплітуди радіосигналу, можуть використовуватися для визначення типу маніпуляції, інтерференції роду і рівня спотворень. [6].

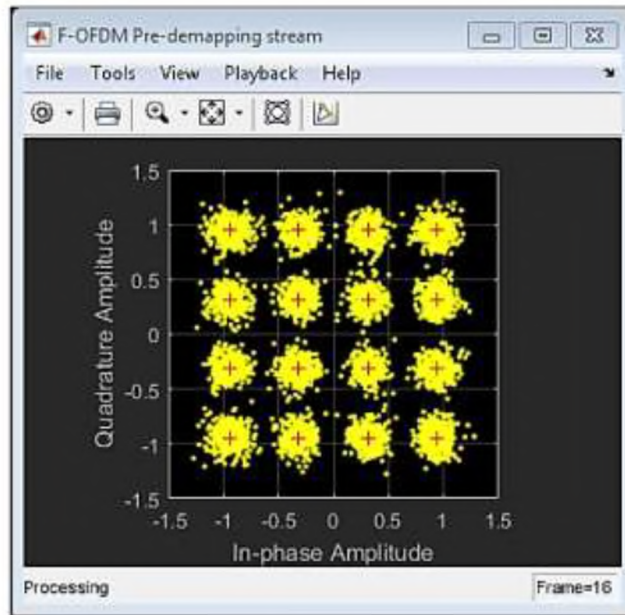


Рисунок 2.19 - Діаграма сигнальної констелації F-OFDM

Після завершення моделювання інтерфейс користувача та командне вікно MATLAB відображають кінцевий результат BER, загальну кількість виявлених помилок і загальну кількість оброблених бітів. Відображається середнє RMS EVM (у відсотках) за тривалість моделювання символу даних.

Для цього введіть таку команду в MATLABcomm5GWaveformsLTE_display;

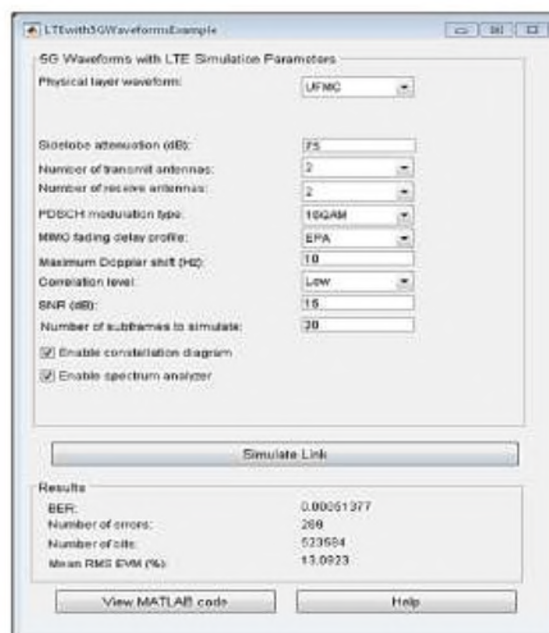


Рисунок 2.20 – Вікно comm5GWaveformsLTE_display

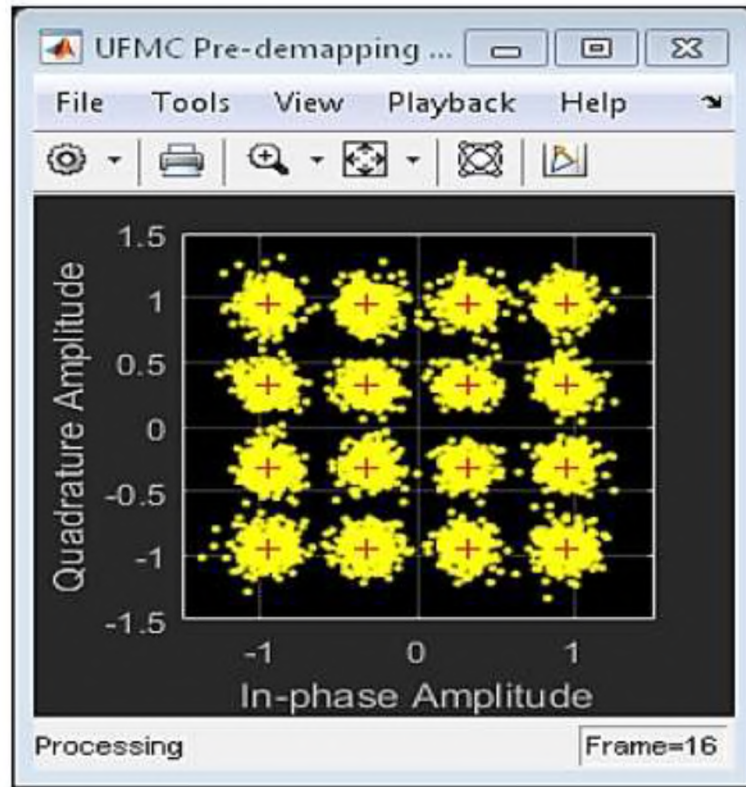


Рисунок 2.21 - Діаграма сигнального сузір'я UFMС

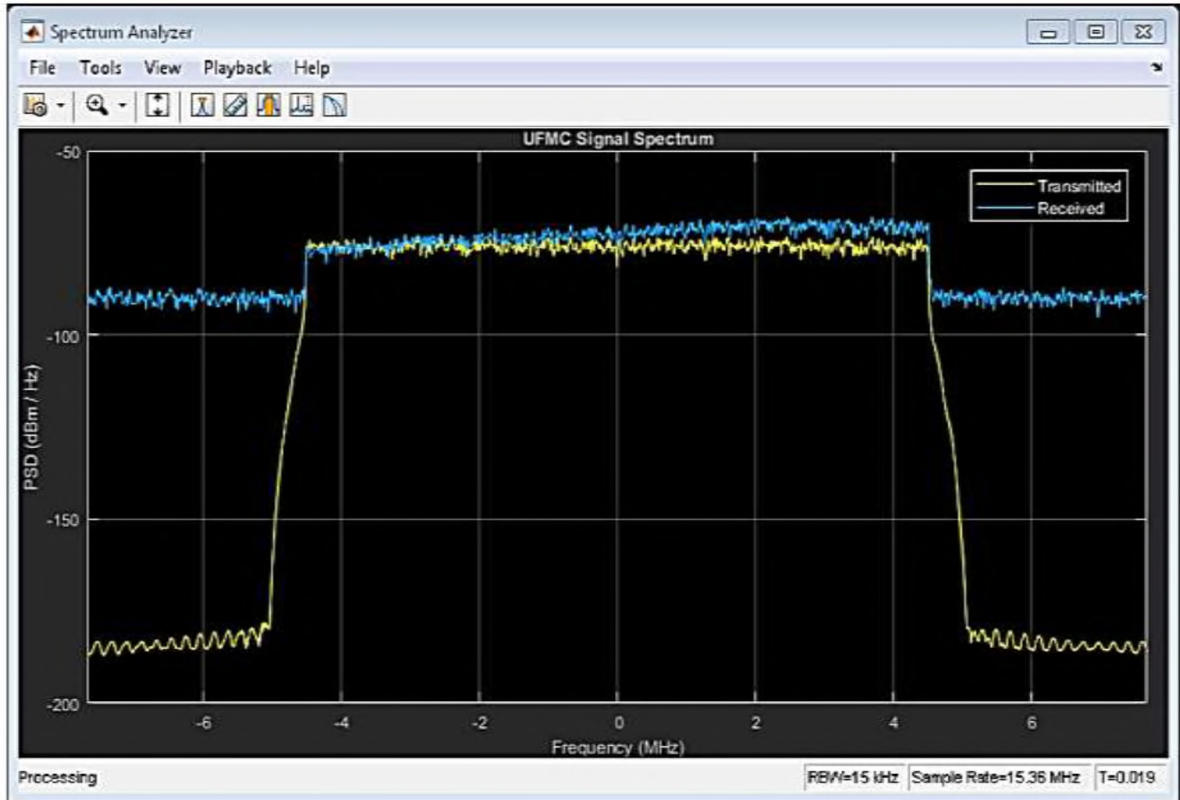


Рисунок 2.22 - спектральний аналіз сигналу UFMС

Дві можливі форми сигналу для вибраних конфігурацій і показують дуже схожу продуктивність зі стандартним CP-OFDM.

```
% Initialize system constants
rng(2014);
gc = helperGetDesignSpecsParameters();
tp.txPower = 9; % watt
tp.txGain = -8; % dB
tp.mobileRange = 2750; % m
tp.mobileAngle = 3; % degrees
tp.interfPower = 1; % watt
tp.interfGain = -20; % dB
tp.interfRange = 9000; % m
tp.interfAngle = 20; % degrees
tp.numTXElements = 8;
tp.steeringAngle = 0; % degrees
tp.rxGain = 108.8320 - tp.txGain; % dB
numTx = tp.numTXElements;
helperPlotMIMOEnvironment(gc, tp);
```

Більш пізній стандарт IEEE 802.16e-2005 визначає нижче значення SNR= 21 дБ для 64QAM для фіксованого WiMAX OFDM. з BER=10E-6 і SNR= 20 дБ для 64QAM.

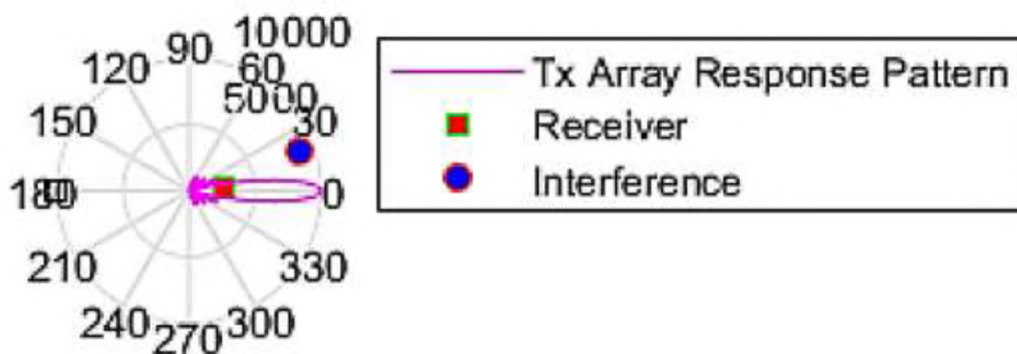


Рисунок 2.23 – 5G: вигляд дорожньої карти

Таким чином, відношення сигнал/шум можна покращити шляхом збільшення масиву вздовж лінії передачі.

Порівняння дозволяє передбачити відношення декодованого вихідного сигналу до вихідного потоку, що вказує на те, що резервний BER є занадто високим для системи зв'язку. Констеляційна діаграма показана на рис. 2.26 нижче.

```
measures = ber(txBits, rxBits);
fprintf('BER = %.2f%%; No. of Bits = %d; No. of errors = %d\n', ...
measures(1)*100,measures(3), measures(2));
BER = 32.07%; No. of Bits = 30714; No. of errors = 9850
constdiag = comm.ConstellationDiagram('SamplesPerSymbol', 1,...
'ReferenceConstellation', [], 'ColorFading',true,...
'Position', gc.constPlotPosition);
% Display received constellation
constdiag(rxSyms);\
```

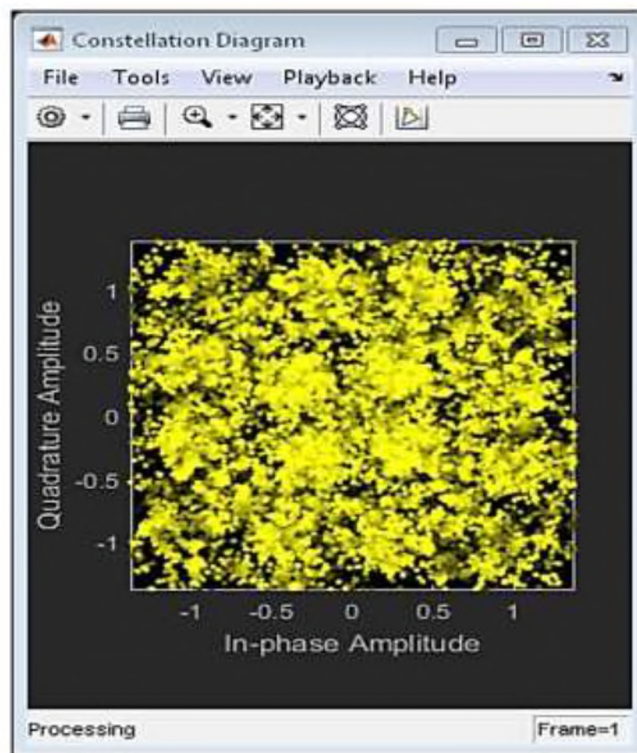


Рисунок 2.24 – Констеляційна діаграма

Високий BER в основному розташований за межами напрямку керування масивом мобільних базових станцій. Якщо рухоме рульове управління узгоджується з напрямком рульового керування, то бер значно покращується.

```

tp.steeringAngle = tp.mobileAngle;
wT = steeringvec(gc.fc,[tp.steeringAngle;0]);
[txBits,rxBits,rxSyms]
= helperRerunMIMOBeamformingExample(gc,tp,wT);
reset(ber);
measures = ber(txBits, rxBits); 46
fprintf('BER = %.2f%%; No. of Bits = %d; No. of errors = %d\n',
measures(1)*100,measures(3), measures(2));
BER = 0.02%; No. of Bits = 30714; No. of errors = 5 constdiag(rxSyms);
3.22 сурет.

```

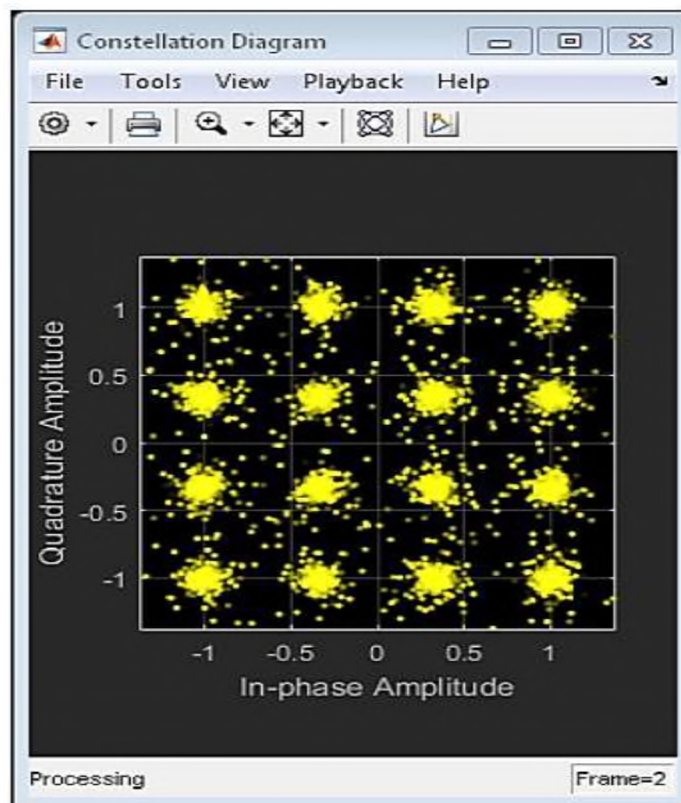


Рисунок 2.25 - Сузір'я діаграми

Тому система дуже чутлива до помилок бездротового керування. З іншого боку, однакова просторова чутливість дозволяє SDMA розрізняти в просторі кількох користувачів. [15].

2.3 5G в MIMO: формування архітектури

Тенденція бездротового зв'язку 5G полягає у переході на більш високі частоти в спектрі міліметрових хвиль і у використанні більшої кількості передавальних і приймальних антен. Оскільки втрати на шляху в міліметровому діапазоні довжин хвиль значні, для забезпечення максимального посилення формування променя для подолання втрат на шляху потрібна більша матриця.

Щоб мати можливість керувати кожним елементом масиву, за кожним елементом слідує перемикач передачі та прийому, який часто називають перемикачем T/R, для досягнення максимальної гнучкості формування променя. Однак у великому масиві така компонентізація може бути складною як через міркування вартості, так і через обмеження простору. Тому в останні роки гібридне формування променя стало популярним методом компромісу для досягнення бажаної продуктивності.

Гібридна технологія формування променя групує елементи масиву замість перемикача T/R для кожного елемента. Кожна підмножина має перемикач T/R, але в кожній підмножині є лише повернення фази для кожного елемента. Цей сигнал можна контролювати як за амплітудою, так і за фазою на рівні підмережі, а також за фазою на рівні елемента. Повернення фази зазвичай реалізується за допомогою аналогових компонентів, а вагові коефіцієнти сітки застосовуються цифровим способом можливо, це дає назву гібридному утворенню архітектури. На наступній діаграмі типова гібридна конфігурація формування бездротового зв'язку 5G показана на рис. 2.28.

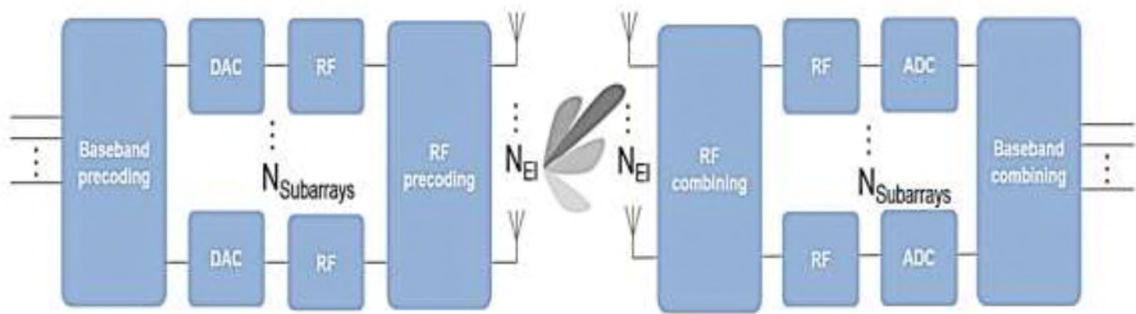


Рисунок 2.26 - Типова гібридна конфігурація для створення бездротової мережі 5G

У цьому прикладі, оскільки антенна решітка MISO доступна лише на стороні передавача, увага зосереджена на гібридному попередньому кодуванні. Наведений нижче фрагмент коду розділяє масив розподілу на два підпростору та обчислює відповідний підпростір і елементи в кожному підпросторі.

```

numSubarray = 2;
numSubElem = numTx/numSubarray;
subpos = (-(numSubarray-1)/2:(numSubarray-1)/2)*(0.5*numSubElem);
subelempos = (-(numSubElem-1)/2:(numSubElem-1)/2)*0.5;
wT_digital = steervec(subpos,[tp.steeringAngle;0]);
wT_analog = exp(1i*angle(steervec(subelempos,[tp.steeringAngle;0])));
wT_hybrid = kron(wT_digital,wT_analog);
[txBits,  rxBits,rxSyms] = helper Rerun MIMO Beam forming
Example(gc,tp,wT_hybrid);
reset(ber);
measurees = ber(txBits, rxBits);
fprintf('BER = %.2f%%; No. of Bits = %d; No. of errors = %d\n',
measures(1)*100,measures(3), measures(2));
constdiag = comm.ConstellationDiagram('SamplesPerSymbol',
1,'ReferenceConstellation', [], 'ColorFading',true, 'Position', gc.constPlotPosition);
constdiag(rxSyms);
BER = 0.02%; No. of Bits = 30714; No. of errors = 5.

```

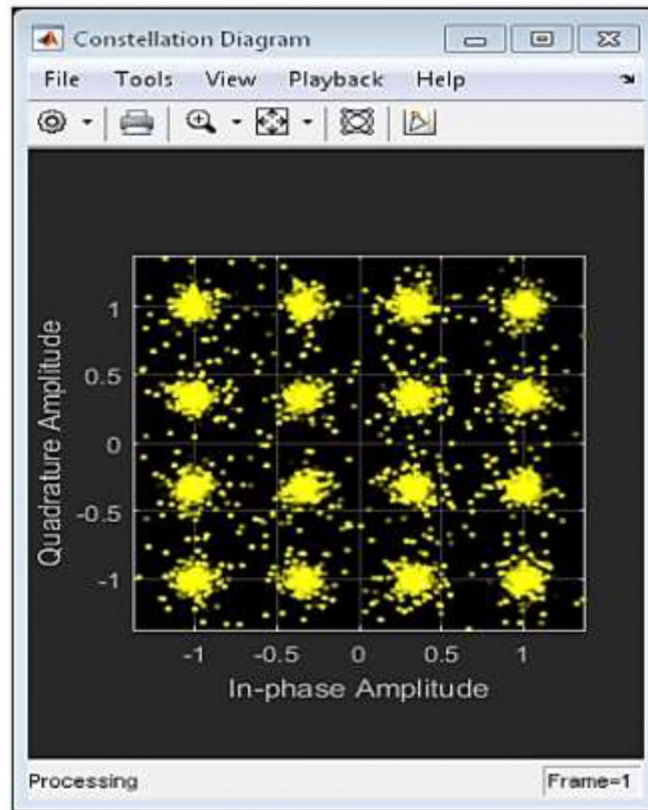


Рисунок 2.27 – Діаграма сузір'їв

2.4 Покращення SNR і пропускної здатності бездротового зв'язку за допомогою антенних решіток

Метою системи бездротового зв'язку є надання якомога більшої кількості послуг користувачам із максимально можливою швидкістю передачі даних з урахуванням таких обмежень, як обмеження потужності випромінювання та операційний бюджет. Ключ до збільшення швидкості передачі даних полягає в покращенні відношення сигнал/шум (SNR). Щоб обслуговувати багато користувачів, ключовим є повторне використання ресурсів.

За останні кілька десятиліть було прийнято багато алгоритмів для повторного використання ресурсів і покращення SNR у часі, частоті та просторі кодування. Цей приклад антенних решіток допомагає покращити SNR прийому та пропускну здатність бездротової мережі. Оскільки в антенній решітці є кілька елементів, такі системи бездротового зв'язку називаються системами з множинним входом і виходом (MIMO). Антенні решітки допомагають покращити SNR шляхом

переважного сканування кількох каналів передачі та прийому. Вони також дозволяють повторно використовувати просторову інформацію в системі для покращення покриття.

Наприклад, система показана на частоті 60 ГГц, яка є частотою для систем 5G. Для вирішення цього прикладу буде використано функцію `scatteringchanmtx` для створення матриці каналів. Ця функція подібна до кількох передавачів між масивами передачі та прийому.

Сигнал спочатку проходить від передавача до всіх передавачів, потім відбивається від передавачів і потрапляє в приймальну мережу. Тому кожен передавач визначає шлях сигналу між масивами передачі та прийому та результуючими каналами матриця описує багатопроменеве середовище. Ця функція працює з антенними решітками довільного розміру в будь-якому діапазоні частот. Найпростішим бездротовим каналом є пряма передача SISO LOS. Незважаючи на свою простоту, такий канал часто можна зустріти в сільській місцевості.

У цьому випадку сітка антени може покращити відношення сигнал/шум на приймальному приймачі та, у свою чергу, покращити частоту бітових помилок (BER) каналу зв'язку [8].

Канал SISO LOS

Перш ніж обговорювати продуктивність системи MIMO, корисно встановити базову лінію за допомогою системи зв'язку з одним входом і одним виходом (SISO). Канал SISO LOS має прямий шлях від передавача до приймача. Такий канал можна моделювати як окремий випадок багатопроменевого каналу. Використовуючи модуляцію BPSK, коефіцієнт бітових помилок (BER) для такого каналу SISO можна побудувати, як показано на рис. 2.28.

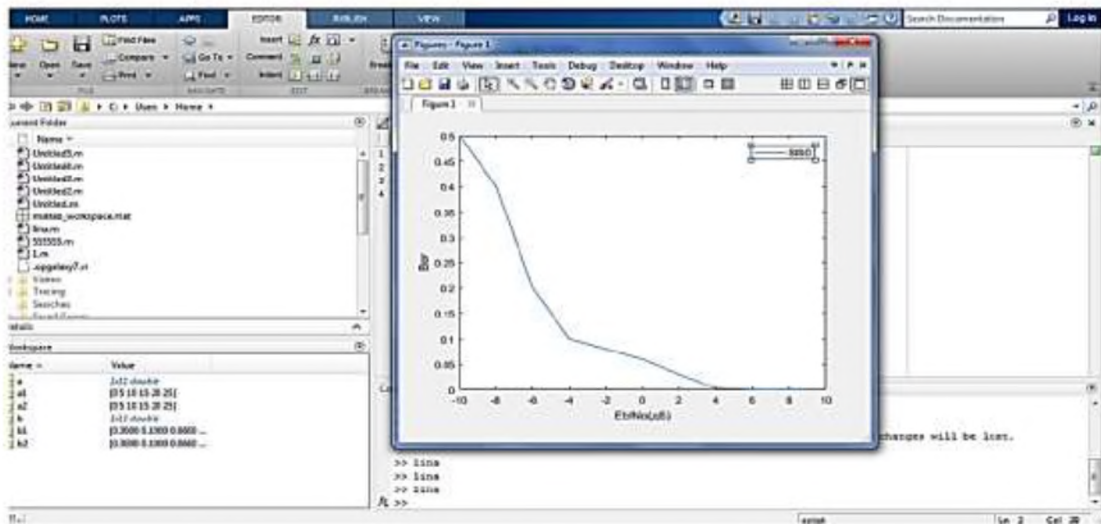


Рисунок 2.38 - Частота бітових помилок (BER) для каналу SISO

2.5 Канал SIMO LOS

Зосереджено на системі з одним входом і декількома виходами (SIMO) із базовим набором для системи SISO. Така система має одну передавальну антену, але кілька приймальних антен. Крім того, існує прямий шлях між передавачем і приймачем.

Наприклад, матриця прийому - це 4-елементна ULA з інтервалом напівхвилі, де канал SIMO може бути закодований як:

```
rxarray = phased.ULA('NumElements',4,'ElementSpacing',lambda/2);
rxmopos = getElementPosition(rxarray)/lambda;
simochan = scatteringchanmtx(txsipos,rxmopos,txang,rxang,g).
```

У цьому випадку, оскільки сигнали, що приймаються елементами сітки приймача, когерентні, приймач решітку можна надіслати на передавач для покращення SNR. Напрямок цього вхідного сигналу відомий приймачу.

На рис. 2.31 показана крива BER при посиленні 6 дБ, що забезпечується приймальною решіткою. [9].

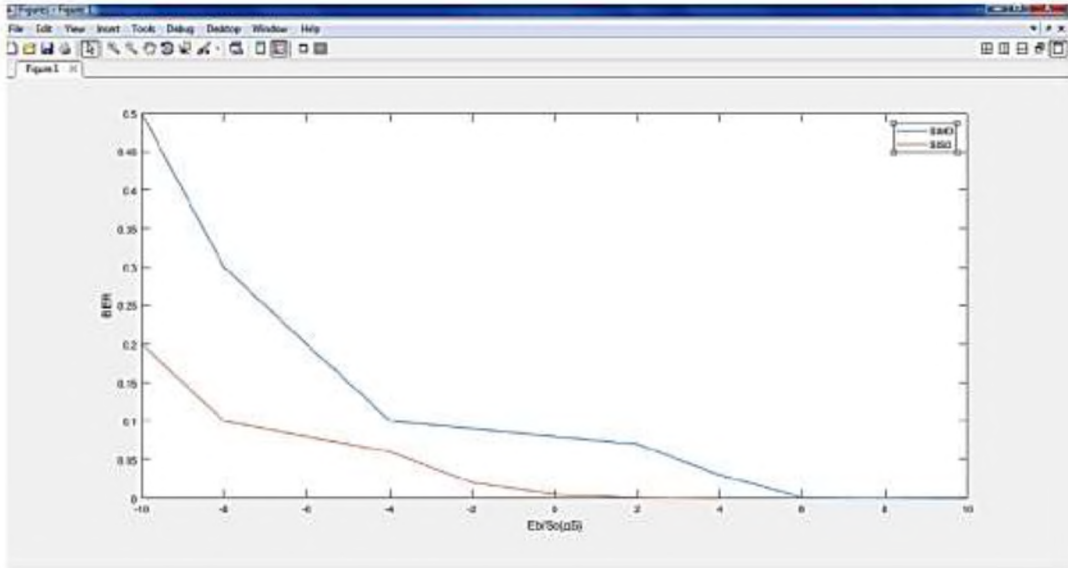


Рисунок 2.29 - Крива Бера для посилення 6 дБ

Закон Бугере -Ламбера -Бера (також просто закон Бугере) - фізичний закон, який визначає ослаблення паралельного монохроматичного пучка світла під час його поширення в поглинаючому середовищі. Показник поглинання визначається властивостями речовини і, як правило, залежить від довжини хвилі λ поглиненого світла. Цю залежність називають спектром поглинання речовини.

Таким чином, якщо на каналі є 10 випадково розташованих передавачів, буде 10 шляхів від передавача до приймача, як показано на рис. 2.30 нижче.

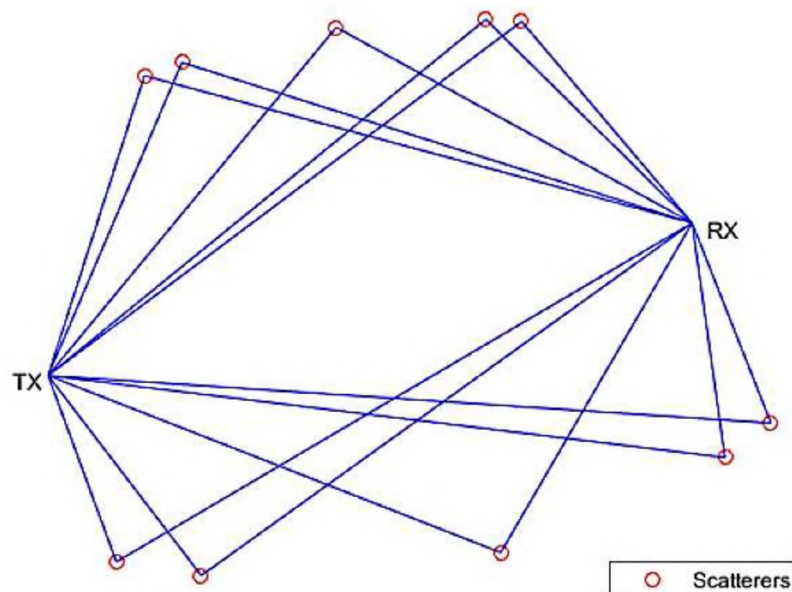


Рисунок 2.30 - 10 шляхів від передавача до приймача

Це означає, що сигнали, що проходять через усі шляхи, надходять одночасно, тому канал має рівну частоту.

Щоб змоделювати криву BER для каналу з завмиранням, канал повинен змінюватися з часом. Наприклад, у нас є 1000 кадрів, і кожен кадр має 10000 біт. Базову криву багатопроменевого каналу BER SISO зображено на рис. 2.33.

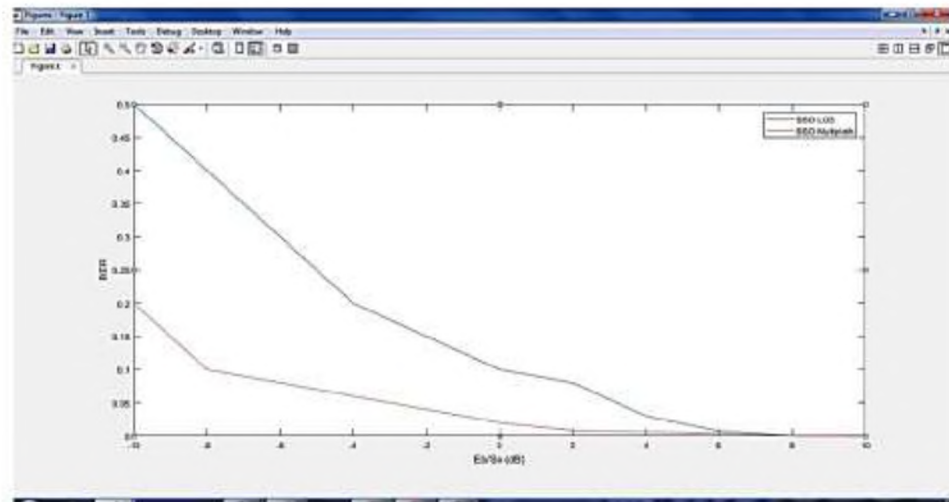


Рисунок 2.31 - Базова крива багатопроменевого каналу BER SISO

Таким чином, порівняно з кривою BER, отриманою з каналу LOS, LOS сповільнюється зі збільшенням потужності шуму, доки спектральна щільність не вимивається, оскільки множник енергії BER зменшується. Крім того, крива BER системи SISO також є крутішою порівняно з кривою BER системи SISO

У результаті ви повинні побачити, що ці різні способи використання масивів пов'язані. Починаючи з каналу Los, як згадувалося в попередніх розділах, перевагою масиву є покращення SNR.

```
[~,txang] = rangeangle(rxcenter,txcenter);
[~,rxang] = rangeangle(txcenter,rxcenter);
mimochan = scatteringchanmtx(txmipos,rxmopos,txang,rxang,1);
wt = txarraystv(fc,txang)';
wr = conj(rxarraystv(fc,rxang));
helperPlotSpatialMIMOScene(txmipos,rxmopos,txcenter,rxcenter,(txcenter+rxcenter)/2,wt,wr).
```

У цьому випадку з'являються два промені, спрямовані один на одного. Таким чином, посилення масиву досягається методом формування променя. З іншого боку, подібно до каналу MIMO, це буде так, як показано на рис. 2.32.

```
[txang,rxang,scatg,scatpos]
=helperComputeRandomScatterer(txcenter,rxcenter,Nscat);
mimompchan = scatteringchanmtx(txmipos,rxmopos,txang,rxang,scatg);
[wp,wc] = diagbfweights(mimompchan);
helperPlotSpatialMIMOScene(txmipos,rxmopos,txcenter,rxcenter,scatpos,wp(1,:),
wc(:,1))
```

Блок LOS Channel поширює сигнали від однієї точки у просторі до кількох точок або від кількох точок назад до однієї точки через канали кута огляду.

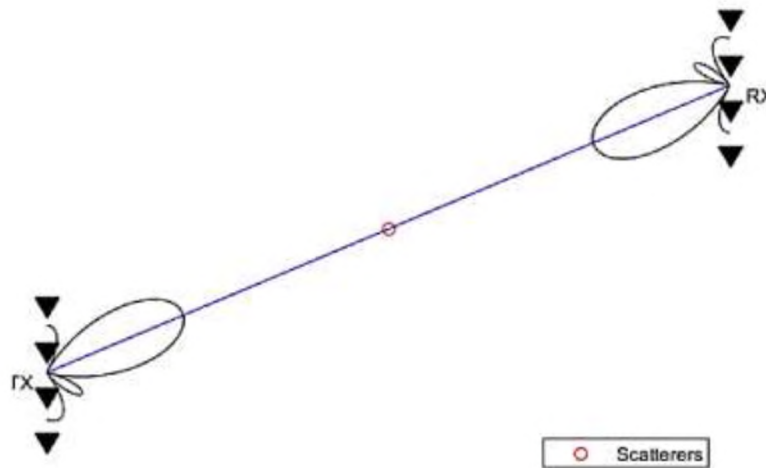


Рисунок 2.32 - Два променя в каналі LOS

На рис. 2.35 показано лише шаблон для першого потоку даних, однак ясно, що шаблон не має домінуючого головного променя.

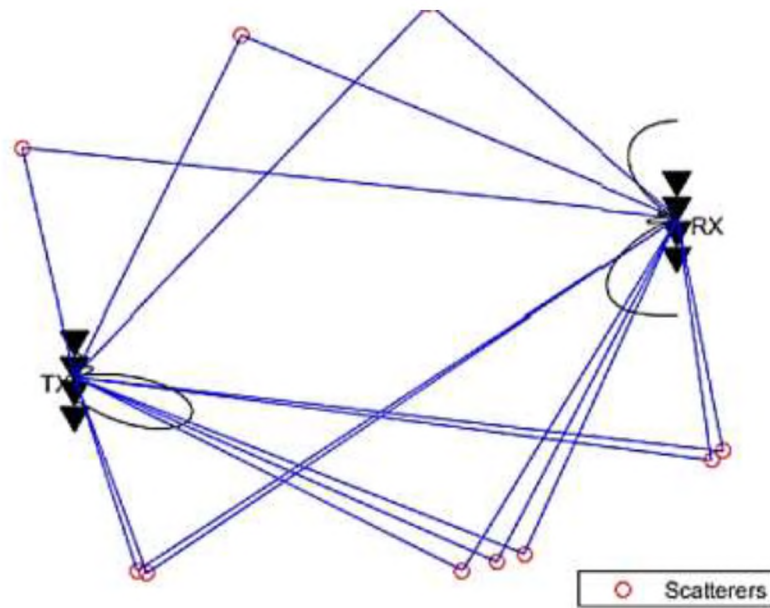


Рисунок 2.33 - Шаблон для першого потоку даних

Отже, на закінчення ми можемо пояснити, як ми можемо використовувати масивну обробку для покращення якості системи бездротового зв'язку 5G.

Залежно від характеру каналу масиви можна використовувати для покращення SNR за рахунок збільшення масиву чи рознесення або для покращення пропускної здатності шляхом просторового мультиплексування.

У цьому прикладі використовуються `likecatteringchanmtx` і `diagbfweights` для моделювання цих сценаріїв. [7].

Висновок другого розділу

Як можна побачити зі спеціальної частини, програма пройшла повну ітерацію і в контрольних точках показала правильний вихід. Ці тести можна використовувати для складання звіту про самоконфігурацію. Наприклад, записувати код `1.2.3.4.5` означає правильну самоконфігурацію без помилок, а код `1.2.3.32.32.32` означає фатальну помилку в 3 блоці.

3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Актуальність впровадження бізнес-плану мереж SON для стандарту 5G

На сьогоднішній день технології Штучного Інтелекту та Машинне навчання розвивається у швидких темпах. У телекомунікаціях також є проблеми, які можуть вирішити технології машинного навчання. Однією з таких проблем є налаштування, оптимізація та підтримка мережі 5G. Стільникова мережа 5G знаходиться на початковій стадії впровадження, що дозволяє використовувати потенціал нових технологій по максимуму. Налаштуванням займаються працівники телекомунікаційних компаній, що потребує великої кількості задіяного персоналу як інженерів, так і маркетологів, які визначають доцільність структури.

Тому вважаю тему магісторської роботи актуальною та перспективною. Впровадження технології Штучного Інтелекту дозволить перекласти складні розрахунки та обчислення на комп'ютер, а також дозволить провести глибокий аналіз системи, що надасть нові можливості розвитку мережі. Розробка та впровадження технології є економічно вигідним, тому що воно виконуватиме роль налаштувача та підтримки стільникової мережі, тим самим оптимізує та прискорить роботу мережі, додасть можливості для аналізу, звільнить персонал.

Розробка алгоритмів SON для мереж 5G. Для написання магісторської роботи я використовуватиму бібліотеки для розробки машинного навчання мовою Python 3.7. Також я користуватимуся точними даними з налаштування мереж 5G, і розроблені раніше у роботі алгоритми машинного навчання, для перевірки працездатності розробити модель тестування.

В даному розділі викладено маркетинговий аналіз перспектив використання технології SDN для розділення рівня управління та передачі даних.

3.2 Організація та планування робіт для мереж SON

Будь-який бізнес-проект розробляється з єдиною метою отримання прибутку. При цьому на етапі планування майбутнього проекту необхідно оцінити всі витрати, пов'язані з його реалізацією. У цьому розділі розраховуються часові та економічні витрати на розробку проекту.

Перед початком розробки бізнес-проекту слід приділити увагу складанню плану організаційної роботи. З точки зору послідовності і раціональності використання робочого часу воно повинно здійснюватися в такому порядку:

а) етап передпроектних робіт:

- ознайомлення з основними правилами майбутнього проекту;
- створення плану процесу моделювання;
- створення ТТ із замовником;
- проведення практичної частини роботи;
- корекція та доопрацювання ТТ;

б) етап проектування:

- підбір обладнання згідно ТТ;
- створення генеральної проектної документації;
- розрахунок якісних показників моделювання в середовищі MATLAB;
- стійкість спілкування під впливом різних факторів визначати;
- складання пояснювальної записки;
- внесення змін до обладнання та матеріалів, що використовуються в проекті;
- розробка питань охорони праці, економічної частини проекту;
- створення кошторисної документації по проекту;

с) стадія розробки:

- виправлення надісланих помилок та попередження клієнтів видалити;

д) етап реалізації проекту:

3.3. Аналіз ринкових можливостей запропонованого проекту

При дослідженні ринкових можливостей, в першу чергу проведений аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку. Дані наведені у таблиці 3.1 нижче.

Таблиця 3.1. - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж	100 млн. грн.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	20%

Інтерес до SDN зростає з кожним днем: нові технології дозволять вендорам вирішувати свої проблеми, а головне – за менші кошти.

Таблиця 3.2 - Характеристика потенційних клієнтів проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Розділення рівня управління та передачі даних	Оператори зв'язку	Оператори зв'язку зможуть самостійно розділяти та керувати рівнями управління та передачею даних за допомогою спеціального графічного інтерфейсу.	Можливість оптимізувати мережу для використання максимальної кількості ресурсів при залученні мінімальних затрат

Таблиця 3.3 - Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Відсутність зацікавленості у продукті	Успіх системи залежить від підтримки великих операторів зв'язку, адже проект потребує великих інвестицій на довготривалий термін. Що просто може бути не цікавим та не вигідним компаніям-лідерам ринку зв'язку.	Відмова у повній заміні телекомунікаційного обладнання на обладнання, необхідного для роботи SDN.

Таблиця 3.4. - Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Забезпечення повного управління параметрами мережі в цілому та і окремими елементами системи	За рахунок керування параметрами мережі – можливий підхід при якому мережа досягне своєї максимальної продуктивності при мінімальних затратних ресурсах.	Застосування та розробка новітнього обладнання, необхідного для роботи SDN

Таблиця 3.5 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Тип конкуренції: олігополія	На ринку представлені декілька компаній, що поставляють подібні послуги рішення проблеми розділення рівня управління та передачі даних.	Акцентування переваг продукту, що забезпечує використання протоколу OpenFlow та API інтерфейсу.
2. Рівень конкурентної боротьби: національний/інтернаціональний	Першим етапом є боротьба за ринок України з подальшим виходом на ринки інших країн	Маркетингова компанія в першу чергу орієнтована на захоплення місцевого ринку
3. Галузева ознака: внутрішньогалузева	Економічна боротьба з конкурентами	Пропозиція суттєвих переваг у порівнянні з

	відбувається в одній галузі економіки, пропонуються аналогічні послуги, що мають архітектурні відмінності у функціонуванні	продуктами конкурентів у визначеній галузі економіки
--	--	--

Таблиця 3.6 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактори конкурентоспроможності	Обґрунтування
Динаміка галузі	Проблема розділення рівня управління та передачі даних є дуже важливою, а оператори мобільного зв'язку зацікавлені у вирішенні цієї проблеми.
Концепція товару і послуги	Система розділення рівня управління та передачі даних дозволяє ефективно використовувати кожен елемент мережі та безпосередньо керувати усіма параметрами.
Після продажне обслуговування	Підтримка щодо використання системи після її продажу

Таблиця 3.7 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін системи підвищення лояльності абонентів операторів мобільного зв'язку

Фактори конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з власною системою						
Динаміка галузі	3							✓
Концепція товару і послуги	1					✓		
Після продажне обслуговування	2						✓	

Таблиця 3.8 - Альтернативи ринкового впровадження проекту

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Державні підприємства	Не готові	Дуже високий	Дуже висока	Важко
Оператори мобільного зв'язку	Переважно готові	Дуже високий	Висока	Легко

Таблиця 3.9 - Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
Динамічний розвиток завдяки висвітленню унікальних характеристик реалізованої технології	Зменшення витрат компанії шляхом використання більшої кількості ресурсів за менші ціни.	Незалежність від посередника, який утримує кошти за свої послуги	Стратегія лідерства по витратах

Таблиця 3.10 - Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
Висока доступність	Стратегія диференціації	Використання протоколу OpenFlow та API інтерфейсу для новітнього підходу вирішення поставленої задачі.	Доступність, якість, швидкість

3.4 Розроблення маркетингової програми проекту

Маркетингова програма - це розроблений на основі комплексних маркетингових досліджень стратегічний план-рекомендація щодо виробничо-збутової і науково-технічної діяльності фірми на певний період часу, покликаний забезпечити оптимальний варіант її майбутнього розвитку з урахуванням запитів споживачів і відповідно до висунутих цілям і стратегії.

В процесі розробки маркетингових програм враховуються множинні умови, перспективи та обмеження як в розвитку ринку, так і у внутрішньофірмової розвитку, а також дію прямих і зворотних зв'язків з ринком, необхідність пристосування до мінливих запитам ринку і активного впливу на формування та розширення ринкового попиту.

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (таблиця 3.11).

Таблиця 3.11 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентом
Підвищення швидкодії мережі	Можливість, що забезпечується новітніми покращених технологій.	Використання новітніх технологій до рішення цієї задачі
Адаптивність мереж	Дозволяє розглядати кожен параметр телекомунікаційної мережі окремо	Проектування та моделювання мережі перед розгортанням
Вигідність	Отримання списку з вказанням у відсотках про затрати та окупність технологій	Подання інформації для більшого розуміння продукту.

Таблиця 3.12 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1. Товар за задумом	Товар забезпечує підвищення ефективності та швидкодії телекомунікаційної мережі
2. Товар у реальному виконанні	Властивості: доступність, надійність, зручність, релевантність, окупованість
	Продукт представляє собою програмний комплекс реалізований за допомогою протоколу OpenFlow та API інтерфейсу
	Поставляється у вигляді застосунку для всіх популярних платформ.
	Назва: OFapi – Open Flow Application Program Interface
3. Товар із підкріпленням	До продажу: відбувається інсталяція та конфігурування системи
	Після продажу: відбувається обслуговування програмного забезпечення та його доопрацювання по бажанню клієнта

Аналіз системи збуту передбачає визначення ефективності кожного елемента цієї системи, оцінювання діяльності апарату працівників збуту. Аналіз витрат обігу передбачає зіставлення фактичних збутових витрат за кожним каналом збуту і видом витрат із запланованими показниками для того, щоб виявити необґрунтовані витрати, ліквідувати затрати, що виникають у процесі руху товарів і підвищити рентабельність наявної системи збуту. Дані щодо визначення системи збуту надаються в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 - Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Власна система збуту	Проведення та розгортання програмного забезпечення на стороні компанії-клієнта	Канал нульового рівня, продаж товару відбувається безпосередньо споживачам через відділ збуту	Оптимальною системою збуту є прямий збут з каналом нульового рівня за відсутності посередників

3.5 Визначення трудомісткості розробки моделі

Трудомісткість створення моделі визначається тривалістю кожної робочої операції, починаючи зі складання технічного завдання й закінчуючи оформленням документації (за умови роботи одного проектувальника):

$$t = tmz + tv + ta + tnp + tonp + td \text{ [год]}. \quad (3.1)$$

де: tmz – тривалість складання технічного завдання на впровадження методу;

tv – тривалість вивчення технічного завдання (ТЗ) та літературних джерел за темою;

ta – тривалість розробки моделі;

tnp – тривалість модулювання віртуального аналога каналу зв'язку;

$tonp$ – тривалість опрацювання здобутих характеристик;

td – тривалість підготовки технічної документації.

Вихідні дані для визначення трудомісткості створення моделі приведені в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Тривалість розробки моделі

$t_{mз}$, год	$t_{в}$, год	$t_{а}$, год	t_{np} , год	t_{onp} , год	t_{∂} , год
45	48	69	19	19	29

Розрахуємо трудомісткість розробки моделі за формулою (3.1):

$$t = 45 + 48 + 69 + 19 + 19 + 29 = 229 \text{ [год]}.$$

3.6 Розрахунок витрат на розробку моделі

Витрати на розробку моделі $K_{ПЗ}$ складаються з витрат на заробітну платню розробника $З_{ЗП}$ і вартості витрат машинного часу, що необхідний для опрацювання моделі мережі на ПК $З_{МЧ}$:

$$K_{ПЗ} = З_{ЗП} + З_{МЧ} \text{ [грн]} \quad (3.2)$$

Заробітна плата виконавця враховує основну і додаткову заробітну плату, а також відрахування на соціальні потреби (пенсійне страхування, страхування на випадок безробіття, соціальне страхування тощо) і визначається за формулою:

$$З_{ЗП} = t \cdot З_{пр} \text{ [грн]}. \quad (3.3)$$

де: t – трудомісткість створення моделі;

$З_{пр}$ дорівнює 70 грн/год.

Розрахуємо заробітну платню проектувальника за формулою (3.3):

$$З_{ЗП} = 229 \cdot 70 = 16030,00 \text{ [грн]}.$$

Вартість машинного часу на ПК визначається за формулою:

$$З_{мч} = \left(t_a t_a + t_{np} t_{np} + t_{onp} t_{onp} + t_{\partial} t_{\partial} \right) \cdot C_{мч} \text{ [грн]}. \quad (3.4)$$

де: $C_{мч}$ – вартість 1 години машинного часу ПК, грн/година.

Вартість 1 години машинного часу ПК визначається за формулою:

$$C_{мч} = P_e \cdot t \cdot C_e + \frac{\Phi_{перв} \cdot H_a}{F_p} + \frac{K_{лнз} \cdot H_{анз}}{F_p} \text{ [грн/год]}, \quad (3.5)$$

де: P_e – встановлена потужність ПК;

t – трудомісткість створення моделі;

C_e – енерговитрати;

$\Phi_{перв}$ – первісна вартість ПК на початок року;

H_a – річна норма амортизації на ПК;

$K_{лнз}$ – вартість ліцензійного програмного забезпечення;

$H_{анз}$ – річна норма амортизації на ліцензійне програмне забезпечення;

F_p – річний фонд робочого часу (за 40-годинного робочого тижня).

Енерговитрати розраховуються за формулою:

$$C_e = P_e \cdot C_{кВт} \text{ [грн/год]}, \quad (3.6)$$

де: $C_{кВт}$ - тариф на електричну енергію.

Розрахунок витрат на розробку моделі зводимо в таблицю 3.2

Таблиця 3.15 – Розрахунок витрат на розробку моделі

P_e , кВт	$C_{кВт}$ кВт·год	$\Phi_{перв}$, грн	H_a , частка одиниці	$K_{лнз}$, грн	$H_{анз}$, частка одиниці	F_p , год
1,4	1,60	20000,00	0,4	8100,00	0,4	1920,00

Тоді за формулою (3.6) отримаємо розмір енерговитрат:

$$C_e = 1,4 \cdot 1,60 = 2,24 \text{ [грн/год]}.$$

Річна норма амортизації, якщо використовується метод прискорення зменшеної вартості, визначається за формулою:

$$H_a = 2/T \cdot 100\% \quad (3.7)$$

де: T – строк корисного використання ПК, дорівнює 5 років.

Розрахуємо річну норму амортизації за формулою (3.7):

$$H_a = 2/5 \cdot 100\% = 40\% = 0,40 \text{ [частки одиниці]}.$$

Строк корисного використання ліцензійного програмування дорівнює 5 років.

Річна норма амортизації на ліцензійне програмне забезпечення визначається за формулою (3.7):

$$H_{\text{ЛПЗ}} = 2/5 \cdot 100\% = 40\% = 0,40 \text{ [частки одиниці]}.$$

Ліцензійне програмне забезпечення, яке використовується в даному випадку Microsoft Windows 7 Professional. Його вартість 8000 грн.

Вартість 1 години машинного часу ПК визначаються за формулою (3.5):

$$C_{\text{мч}} = 1,4 \cdot 229 \cdot 1,60 + \frac{20000 \cdot 0,40}{1920} + \frac{8100 \cdot 0,40}{1920} = 518,82 \text{ [грн/год]}$$

Розрахуємо вартість машинного часу за формулою (3.4):

$$Z_{\text{мч}} = (69+19+19+29) \cdot 518,82 = 70559,52 \text{ [грн]}.$$

Отже, підставивши отримані результати у формулу (3.2), отримаємо величину витрат на розробку моделі:

$$K_{\text{ІЗ}} = 16030 + 70559,52 = 86589,52 \text{ [грн]}.$$

3.7 Розрахунок капітальних витрат

Загальні капітальні витрати на розробку визначаються за формулою:

$$KЗ = K_{нз} + K_{навч} + K_n \text{ [грн]}, \quad (3.8)$$

де $K_{навч}$ - витрати на навчання технічних фахівців і обслуговуючого персоналу;

K_n - Витрати на встановлення обладнання та налагодження системи.

Дані про витрати на розробку моделі зводимо в таблицю 3.16.

Таблиця 3.16 – Витрати на розробку моделі

$K_{нз}$, грн	$K_{навч}$, грн	K_n , грн
86589,52	5400,00	1300,00

Отже, капітальні витрати становлять:

$$KЗ = 86589,52 + 5400 + 1300 = 93289,52 \text{ [грн]}.$$

3.8 Висновки третього розділу

В даному розділі був проведений маркетинговий аналіз перспектив реалізації системи розділення рівня управління та передачі даних.

В результаті дослідження було визначено, що стартап має високу рівень ринкової цікавості та ефективності проекту. За рахунок існуючого попиту та майбутнього розвитку проекту є зацікавленість зі сторони великих операторів.

Проаналізувавши конкурентоспроможність проекту, було освідомлено, що стартап має високу конкурентну спроможність. Перспектива впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів є доволі сприятливою,

Використання новітніх технологій мінімізує бар'єри входження, та збільшує стан конкуренції.

В економічному розділі було розраховано:

1. Трудомісткість розробки імітаційної моделі – 229 год.
2. Заробітна платня проєктувальника – 16030,00 грн.
3. Витрати на розробку моделі – 86589,52 грн.
4. Капітальні витрати на розробку імітаційної моделі Технології мережі SON, що самоорганізується, для мобільних мереж 5G. - 93289,52 грн.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного імітаційного моделювання технологій самоорганізованих мереж SON у магістерській роботі отримано такі основні результати:

— були розкриті способи моделювання алгоритмів SON, і був обраний та застосований оптимальний для віртуальної мережі 5G, який дозволив скоротити затримку передачі сигналу від 7 до 11%;

— були проведені та описані заплановані експерименти з самоконфігурації мережі 5 та підведені висновки при роботі з алгоритмами SON, що збільшує швидкість передачі даних від 10 до 17%;

— було розроблено та запропоновано оптимальну модель організації сегменту мережі під управлінням протоколу OpenFlow та формату пакетів з урахуванням можливостей управління рівнем передачі даних, що дозволило мінімізувати, а в деяких випадках повністю виключити можливу втрату до -80% даних при передачі потоку інформації..

— дослідним шляхом були проаналізовані отримані характеристики затримки та пропускної спроможності змодельованого сегмента мережі, які демонструють перевагу SDN мереж при використанні запропонованого формату керуючих пакетів у середньому за затримкою до 63%. Досвідченим шляхом було визначено наступні переваги та вигода запропонованої системи:

1. Оперативність виведення нових послуг ринку. Замість проведення маркетингових досліджень, будувати нову апаратну платформу для нових сервісів, проводити тести, робити пілотні проекти, на які зазвичай йдуть місяці, з NFV можна «конструювати» нові послуги програмно, у дата-центрах, там же їх тестувати та швидко виводити на ринок. У разі невдачі чи незатребуваності нової послуги (іноді трапляється при прорахунках маркетингу) ціна невдачі буде мінімальною.

2. Зменшення капітальних витрат. Реалізація мережевих елементів на стандартних (commodity) серверах у дата-центрах при масовому розгортанні буде значно дешевшою, ніж на виділеному обладнанні.

3. Скорочення операційних витрат. Обслуговування стандартних серверів у дата-центрах проводиться сертифікованим ІТ-персоналом, якому для роботи з NFV не потрібно проходити курси підвищення кваліфікації, і спеціалізованими інженерами з апаратних платформ операторських мереж теж такої необхідності немає. Крім того, чисельність необхідного персоналу також скорочується з тих самих причин.

4. Гнучкість використання ресурсів. При невеликому трафіку викликів задіюється мінімальна кількість віртуальних машин на серверах, при зростанні трафіку автоматично підключаються нові віртуальні машини, де VNF працюють для емуляції функцій мережного устаткування. При апаратній реалізації ресурси обладнання використовуватимуться нераціонально, оскільки ресурси завжди розраховуються на максимальний трафік у мережі, а такі ситуації трапляються лише за години максимального навантаження. Іншим часом обладнання (у разі апаратної реалізації) залишається недовантаженим.

У магістерській роботі було розроблено модель мережі масового обслуговування для аналізу продуктивності граничних хмар 5G на основі SDN. Новим внеском цієї моделі є облік впливу поділу даних та площини управління на трафік до комутатора та контролера. Щоб продемонструвати застосування моделі, аналізується середня затримка пакета, що проходить через комутатор в граничній хмарі, що підтримує дві вертикалі обслуговування 5G, eMBB і mMTC, і пріоритет для планування їх трафіку. Створили 3D математичну модель за допомогою MatLab; О тримано графіки залежності відношення сигнал/шум.

За допомогою включення реалістичних налаштувань параметрів аналіз затримок отримують і обговорюють числові результати. Хоча для можливості аналізу зроблено деякі припущення щодо процесів руху та обслуговування, суттєві наслідки результатів у більшості випадків виявляються, напр. порядок затримки та допустимий регіон, що, на нашу думку, дозволяє отримати нове уявлення про надання QoS у периферійних хмарах 5G.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бабков В.Ю., Вознюк М.А. та ін. Системи зв'язку з кодовим поділом каналів. - СПб.: СПбГУТ, 1999. - 256с.
2. Бородін В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Моделювання службового каналу передачі маршрутної інформації адаптивної літаючої мережі зв'язку // Електрозв'язок. 2016. № 11. С. 41 – 45.
3. Варакин Л.Є. Системи зв'язку із шумоподібними сигналами. - М: Радіо і зв'язок, 1985.
4. Демідов В.М., Пузінков С.А., Макаров Н.В. Стандарт стільникового зв'язку CDMA. // Вісник зв'язку. - 1997, №7. - С.50-53; №8. - С.49-51.
5. Моржов С.В., Алексєєв І.В., Нікітінській М.А. Організація мультиконтролерної взаємодії в програмно-конфігурованих мережах // Моделювання та аналіз інформаційних систем. 2018. Т. 25. № 2. С. 207 – 216.
6. Смірнов Н.І., Георгадзе С.Ф. Синхронний кодовий розподіл абонентських станцій: перспективне покоління персональних систем зв'язку. // Технології та засоби зв'язку. - 1998, №4. - С.58-62.
7. Andrews JG. et al., What will 5G be? // IEEE Journal of Selected Areas in Communication, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 1065 - 1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
8. Baskakov A.E. et al. Development of a Mathematical Model of Software-defined Network Segment // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), IEEE, 2020, pp. 1689 - 1693. DOI: 10.1109/EIconRus49466.2020.9039461.
9. Lara A., Kolasani A., Ramamurthy B. Network innovation using openflow: A survey // IEEE Communication Survey Tuts, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 493 - 512. DOI: 10.1109/SURV.2013.081313.00105.
10. Pashkov V., Shalimov A., Smeliansky R. Controller Failover for Enterprise SDN // Proceedings of the Modern Networking Technologies (MoNeTec'2014), IEEE, 2014, pp. 27 - 29. DOI: 10.1109/MoNeTeC.2014.6995594.

11. Rappaport T.S., Roh W., Cheun K. Wireless ingeneers long considered high freqences worthless for cellular systems. They couldn't be more wrong // IEEE Spectrum, 2014, vol. 51, no. 9, pp. 34 – 58. DOI: 10.1109/MSPEC.2014.6882985.

12. Voellmy A. та ін. Maple: Simplifying SDN programming за допомогою algorithmic policies // ACM SIGCOMM Computer Communication Review, ACM, 2013, vol. 43, no. 4, pp. 87 – 98. DOI: 10.1145/2534169.2486030.

Електронні ресурси

13. Баскаков А.Є., Волков А.С. Алгоритм управління ресурсами транспортної програмно-конфігурованої мережі зв'язку // Праці МАІ. 2020. №115. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119920>. DOI: 10.34759/trd-2020-115-06

14. Баскаков А.Є., Волков А.С. Алгоритм управління ресурсами транспортної програмно-конфігурованої мережі зв'язку // Праці МАІ. 2020. №115. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119920>. DOI: 10.34759/trd-2020-115-06.

15. Бородін В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Аналіз ефективності передачі у мережі зв'язку угруповання безпілотних літальних апаратів // Праці МАІ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57894>

16. Бородін В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Імітаційна модель на дослідження адаптивних сенсорних мереж // Праці МАІ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93398>

17. GSMA Intelligence, Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, White paper, 2014. URL: - c88a32b3c59a11944a9c4e544fee7770.pdf

ДОДАТОК А. Відомість матеріалів дипломної роботи

№	Формат	Найменування	Кількість листів	Примітки
<i>Документація</i>				
1	A4	Реферат	1	
2	A4	Список умовних скорочень	2	
3	A4	Зміст	3	
4	A4	Вступ	2	
5	A4	Стан питання. Постановка задачі	55	
6	A4	Спеціальна частина	44	
7	A4	Економічний розділ	16	
8	A4	Висновки	2	
9	A4	Перелік посилань	2	
10	A4	Додаток А	1	
11	A4	Додаток Б	1	
12	A4	Додаток В	3	
12		Матеріали дипломної роботи на оптичному носії		Оптичний диск

ДОДАТОК В Відгук керівника дипломної роботи

ВІДГУК на магістерську дипломну роботу

Студента(ки) _____ гр.

(прізвище, ім'я)

на тему: _____

Актуальність теми _____

Повнота розкриття теми _____

Теоретичний рівень _____

Практична значущість _____

Самостійність виконання роботи _____

Якість оформлення, загальна та спеціальна грамотність _____

Переваги та недоліки роботи _____

Загальна оцінка роботи та висновок щодо рекомендації до захисту в ДЕК

Науковий керівник

к.ф.-м.н., професор

(посада)

(підпис)

Гусев О.Ю.

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2021 р.