

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
від ___ __ 2024 року, протокол №
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор
_____ Ігор АНІСІМОВ

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**«ПОКРАЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ СИГНАЛУ В
МЕРЕЖАХ 5G»**

Виконав:

студент 2-го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка
ОНП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»
Ковальов Олег Костянтинович

Науковий керівник:

Асистент кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем,
кандидата технічних наук
Аль Шурайфі Муштак _____

Рецензент:

Завідувач кафедри кібербезпеки та комп'ютерної інженерії, Київського
національного університету будівництва та архітектури, професор, доктор
технічних наук
Хлапонін Юрій Іванович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Олег КОВАЛЬОВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 49с., 6 табл., 8 рис., 13 джерел.

СМУГА ПРОПУСКАННЯ, ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, 5G МЕРЕЖА, ПОТУЖНІСТЬ СИГНАЛУ, ВТРАТА ШЛЯХУ.

Об'єкт роботи: покращення пропускної здатності (Throughput) зі зміною смуги пропускання (Bandwidth). Покращення сили сигналу зі зміною відстані між базовими станціями (gNodeB).

Предмет роботи: розрахунок швидкості передачі даних за стандартами 3GPP TS 38.306 використовуючи «5G Tools for RF Wireless» (5G NR Throughput калькулятор). Проведення математичних розрахунків в MATLAB, використовуючи рівняння Фрііса для визначення потужності сигналу в залежності від відстані базових станцій (gNodeB).

Мета роботи: дослідження впливу смуги пропускання на швидкість передачі даних та аналіз впливу вибору несучої частоти сигналу на втрату потужності сигналу зі збільшенням відстані.

Проведено огляд технологій та методів, які покращують пропускну здатність та потужність сигналу в мережах 5G.

Зроблено розрахунок швидкості передачі даних, в залежності від смуги пропускання. Для розрахунку швидкості передачі даних використовувались мінімальні еталонні значення, які взяті з стандарту 3GPP TS 38.306, для передачі сигналу між базовими станціями (gNodeB). Розрахунок базується на стандарті 3GPP TS 38.306. В обчисленні використовувались FR1 та FR2 частотні діапазони, також для порівняння обчислено швидкість передачі даних в 4G, так само з мінімальними еталонними значеннями.

Завдяки рівнянню Фрііса, що забезпечує основу для аналізу передачі та прийому енергії в системах бездротового зв'язку, обчислено потужності сигналу в залежності від відстані між базовими станціями (gNodeB). Для цього використовувався MATLAB, в якому і були побудовані графіки.

В результаті роботи показано швидкість передачі даних між базовими станціями(gNodeB) та втрати потужності сигналу в залежності від відстані. Надані рекомендації, щодо застосування частотних діапазонів для певних ситуацій.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	5
Вступ	6
Розділ 1. Основні поняття.....	8
1.1 Смуга пропускання та частотні діапазони 5G.....	8
1.2 План покриття мережі для мобільних поколінь.....	9
1.3 Методи покращення покриття 5G.....	11
1.4 Передача (Handover).....	13
1.5 Висновки до розділу.....	15
Розділ 2. ПОКРАЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ.....	16
2.1 Вступ.....	16
2.2 OFDM.....	16
2.3 NB-IoT	17
2.4 Модифіковане стиснення часу символу. Modified Symbol Time Compression (MSTC).....	21
2.5 Визначення максимальної пропускну здатності каналу.....	22
2.6 Швидкість передачі даних.....	22
2.7 Висновок до розділу.....	28
Розділ 3. MIMO ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПОТУЖНІСТЬ СИГНАЛУ.....	29
3.1 MIMO Технології.....	29
3.2 Massive MIMO.....	30
3.3 Діапазон частот 5G, mmwave.....	32
3.4 LOS(в межах прямої видимості) та NLOS(поза межами прямої видимості).....	35
3.5 MIMO пропускну здатність каналу	36
3.6 Взаємодія між базовими станціями 5G.....	38
3.7 Потужність передачі та прийому (рівняння Фрііса).....	40
3.8 Обґрунтування вибору середовища моделювання.....	42
3.9 Використання рівнянь Фрііса в матлаб.....	43
Розділ 4. ВИСНОВКИ ТА ОБГОВОРЕННЯ.....	47
Перелік джерел посилання	48

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

1G-5G – перше та п'яте покоління зв'язку

IoT – інтернет речей

FR1 – частотний діапазон 1

D2D -Device-to-Device - зв'язок між пристроями

gNB (gNodeB) - Next Generation Node B - є терміном, який використовується для позначення базової станції 5G

OFDM — Orthogonal Frequency-Division Multiplexing. Мультиплексування з ортогональним частотним поділом

Narrowband Internet of Things (NB-IoT) - Вузькосмуговий Інтернет речей

3D Beamforming - 3d формування променю.

QAM - квадратурна амплітудна модуляція.

FDD (frequency division duplex) - дуплексний поділ частоти.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - кілька входів кілька виходів.

CNR (Carrier Noise Ratio) - Відношення Сигнал / Шум.

BER (Bit Error Rate) - Ставлення Біт / Помилка

LOS (line of sight) – в межах прямої видимості

NLOS (non-line of sight) – поза межами прямої видимості

Slot – комірка, слот

ВСТУП

Покоління мобільних мереж насправді різко просунулися вперед, з кожним стрибком приносячи значне зростання передачі даних. Передача даних описує оптимальну кількість інформації, яку можна передати через мережеве з'єднання за запропонований проміжок часу. Зазвичай вимірюється в мегабітах на секунду (Мбіт/с) або гігабітах на секунду (Гбіт/с)[1]:

- 1G (перше покоління): запущений у 1980-х роках 1G забезпечував лише голосову взаємодію зі швидкістю передачі даних близько 0,02 Мбіт/с. Цього було ледве достатньо для основних голосових дзвінків.
- 2G (друге покоління): запроваджений у 1990-х роках 2G дозволяв надсилати SMS-повідомлення. Швидкість передачі даних зросла приблизно до 0,1 Мбіт/с.
- 3G (третє покоління): 3G, випущений на початку 2000-х років, приніс значне оновлення швидкості передачі інформації. Він дозволяв стандартний веб-серфінг, доступ до електронної пошти та відеодзвінки зі швидкістю передачі даних приблизно 1,0 Мбіт/с.
- 4G (четверте покоління): 4G, запущений наприкінці 2000-х років, забезпечив значну передачу даних, дозволяючи набагато швидше завантажувати, транслювати відеокліпи, а також ігри. Передача даних 4G LTE (Long-Term Evolution) може досягати 100 Мбіт/с.
- 5G (п'яте покоління): найсучасніше покоління мобільних мереж, 5G демонструє надзвичайно високі можливості передачі даних. Він може забезпечувати пікові швидкості до 100 разів швидше, ніж 4G LTE. Тим не менш, реальні швидкості зараз балансують приблизно на рівні 186,3 Мбіт/с у Сполучених Штатах і 432 Мбіт/с у Південній Кореї. Далі наведено таблицю 1, яка підсумовує передачу даних різних поколінь:

Вплив збільшення пропускнуої здатності 5G має значний вплив на технологічний розвиток:

Розвиток Інтернету речей (IoT): 5G може підключати велику кількість інструментів із незначною затримкою, прокладаючи шлях до набагато більш взаємопов'язаного світу розумних інструментів.

Розширена віртуальна реальність (VR) разом із додатками доповненої реальності (AR): висока передача даних 5G може підтримувати VR, а також додатки AR, які вимагають передачі великої кількості інформації.

Швидше завантаження: із завантаженням і встановленням величезних обсягів даних через мережу 5G потокове передавання відеокліпів у форматі HD разом із надсиланням веб-контенту буде значно швидшим.

Покращені мобільні ігри: зменшена затримка 5G (затримка сигналу) робить можливим більш плавний ігровий процес і швидкість реагування в мобільних відеоіграх в Інтернеті.

Таблиця 1. Пропускна здатність в різних покоління зв'язку.

Покоління	Пропускна здатність (Mbps)
1G	0.02
2G	0.10
3G	1.00
4G	100.00
5G	До 10 000 (теоретично), середня швидкість близько 186,3–432,00

Загалом виняткова передача даних за допомогою 5G кардинально змінює правила мобільної взаємодії, відкриваючи двері для різноманітних програм, а також змінюючи засоби, які ми використовуємо.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ В 5G

1.1 Смуга пропускання та частотні діапазони 5G

Вибір смуги пропускання та діапазону частот для розгортання мережі 5G в технології мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) залежить від наявності значно ширшої смуги пропускання та використання ширшого діапазону частот порівняно з попередніми поколіннями. Розгортання мережі в режимі 5G вимагає вищої пропускну здатності порівняно з попередніми поколіннями. Мережі 5G відходять від традиційного підходу, використовуючи два різних діапазони частот.

Діапазон частот FR1: цей діапазон охоплює частоти нижче 6 ГГц, як правило, від 600 МГц до 6 ГГц. Ці нижчі частоти забезпечують чудові характеристики розповсюдження, що забезпечує більш широкі зони покриття. Однак їх обмеження пропускну здатності обмежують швидкість передачі даних, що робить їх придатними для базових програм, таких як веб-перегляд і відеодзвінки.

Діапазон частот FR2: цей діапазон використовує частоти міліметрових хвиль (mmWave), що знаходяться між 24 ГГц і 100 ГГц. Значно вищі частоти в цьому діапазоні пропонують набагато ширшу смугу пропускання, забезпечуючи виняткову швидкість передачі даних. Однак сигнали mmWave страждають від меншої відстані розповсюдження та більш чутливі до блокування будівлями чи іншими перешкодами. Це вимагає більш щільної мережевої інфраструктури для підтримки покриття в областях, де використовується технологія mmWave.

Пропускна здатність – це пропускна спроможність частотного діапазону, яка вказується в мегагерцах (МГц) або гігагерцах (ГГц). Це найважливіший фактор, що впливає на швидкість передачі даних. Це повністю залежить від можливості користувача отримати доступ до ширшого каналу. У порівнянні з попередніми поколіннями, 5G має значне збільшення пропускну здатності та пропонує суттєве збільшення пропускну здатності порівняно з попередніми поколіннями:

Нижче 6 ГГц (FR1): Максимально досяжна смуга пропускання в цьому діапазоні становить близько 100 МГц, що забезпечує основу для помірної швидкості передачі даних, придатної для багатьох повсякденних програм.

Міліметрові хвилі (FR2): діапазони mmWave мають значно ширшу смугу, досягаючи до 400 МГц. Ця розширена ємність безпосередньо перетворюється на високу швидкість передачі даних, синонім mmWave 5G.

Оптимізація продуктивності мережі за допомогою стратегічного розподілу смуг. Мережі 5G можуть використовувати як діапазони FR1, так і FR2, щоб забезпечити усі потреби користувачів. Оператори мереж можуть стратегічно виділяти діапазон нижче 6 ГГц для базових додатків у більш широких областях та інтегрувати технологію mmWave у певних місцях, де потрібна висока швидкість передачі даних. Такий підхід забезпечує баланс між покриттям і швидкістю, дозволяючи 5G реалізувати свою обіцянку трансформаційної мобільної мережі.

Розуміючи взаємодію між діапазонами частот і пропускну здатністю, мережеві інженери можуть оптимізувати розгортання 5G, щоб задовольнити різноманітні потреби користувачів і програми. Цей стратегічний розподіл гарантує, що 5G реалізує свій потенціал як потужна та універсальна технологія мобільного зв'язку.

1.2 План покриття мережі для мобільних поколінь

Мобільні покоління вирости, що призвело до значних змін у плануванні покриття мобільної мережі. У цьому розділі розглядається, як змінювалися підходи відповідно до епохи, зосереджуючись, серед іншого, на доступності спектру, розташуванні веж мобільного зв'язку та міркуваннях щодо використання даних.

Ранні покоління (1G і 2G) надавали пріоритет голосового підключення. Обмежений спектр: дефіцитні ресурси спектру в 1G і 2G обмежили кількість розгорнутих стільникових веж, що призвело до зосередження уваги на макростільниках – великих вежах із великою зоною покриття. Хоча це

забезпечувало базове голосове підключення в широких регіонах, це погіршувало якість зв'язку в периферійних районах[2].

3G і 4G, призвели до революції даних. Розширення спектру: збільшений розподіл спектру дозволив створити більш щільну мережеву інфраструктуру з більшою кількістю стільникових веж, зокрема мікростільників і пікосотів у районах з інтенсивним трафіком, таких як центри міст. Це розширене покриття та потужність мережі, щоб задовольнити зростаючий попит на послуги мобільного передавання даних.

Планування на основі даних: у міру того, як використання даних зростало в геометричній прогресії, мережеве планування почало інтегрувати шаблони трафіку даних. Для оптимізації продуктивності мережі оператори віддають перевагу областям із більшим споживанням даних.

5G використовує ширший діапазон частот. Нижче 6 ГГц (FR1) забезпечує ширше покриття, але з помірними швидкостями, тоді як mmWave (FR2) забезпечує виняткову швидкість на коротших відстанях[1],[2]. Це вимагає стратегічного підходу, щоб збалансувати потреби в охопленні та вимоги до високошвидкісних даних.

Нарізка мережі для цільового покриття. 5G представляє нарізку мережі, революційну технологію, яка дозволяє створювати віртуальні мережі у фізичній інфраструктурі. Це дає операторам змогу обслуговувати конкретні додатки, такі як Інтернет речей (IoT) або високошвидкісний мобільний широкосмуговий зв'язок, шляхом виділення окремих сегментів мережі для пріоритетного покриття та продуктивності.

Формування променя для підвищення ефективності. 5G використовує технологію формування променя, яка фокусує радіосигнали безпосередньо на користувачах, підвищуючи силу сигналу та ефективність мережі. Це допомагає пом'якшити проблеми, пов'язані з поширенням сигналу mmWave, і забезпечує оптимальну продуктивність у областях, де використовуються ці високочастотні діапазони.

Досягнення балансу між ущільненням мережі та витратами на інфраструктуру залишається ключовим завданням. Операторам необхідно впровадити економічно ефективні рішення для розширення покриття, особливо в сільській місцевості[3]. Подолання розриву між селом і містом, забезпечення повсюдного покриття потребує багатогранного підходу, який задовольняє різноманітні потреби як густонаселених міських середовищ, так і малонаселених сільських районів. Інтеграція нових технологій, як автономні транспортні засоби та віртуальна реальність, набувають популярності, мережеве планування має адаптуватися для підтримки їхніх специфічних вимог щодо пропускну здатності та затримки. Майбутні плани мають бути гнучкими та відповідати змінним вимогам нових технологій.

Як висновок, можна сказати, що планування мережевого покриття для мобільних поколінь стає дедалі складнішою дисципліною. Розуміючи унікальні характеристики кожного покоління та передбачаючи вимоги майбутніх технологій, оператори мереж можуть забезпечити ефективне та дієве покриття для своїх користувачів. Майбутнє — за динамічним підходом, який використовує інноваційні технології, такі як нарізка мережі та формування променя, щоб забезпечити бездоганний і повсюдний мобільний досвід, незалежно від місця чи програми.

1.3 Методи покращення покриття 5G

5G обіцяє неймовірну швидкість передачі даних і пропускну здатність мережі, але досягнення стабільного та надійного покриття може бути складним завданням. Ось деякі ключові методи для покращення покриття 5G[4]:

1) Малі клітини:

Концепція: малі стільники – це малопотужні базові станції з обмеженою зоною покриття, які зазвичай розгортаються в міських умовах або в зонах з інтенсивним трафіком. Вони доповнюють макростільники (традиційні стільникові вежі), згущуючи мережу та заповнюючи пропуски сигналу.

Переваги:

- Покращена потужність сигналу та швидкість передачі даних у певних областях.
- Зменшення перевантаження мережі за рахунок розвантаження трафіку з макростільників.
- Краще підходить для покриття всередині будівель або торгових центрів.

2) Агрегація несучих:

Концепція: ця техніка одночасно об'єднує декілька діапазонів частот для створення ширшого віртуального каналу, простими словами, вона дозволяє мобільному пристрою одночасно підключатися до декількох каналів зв'язку та об'єднувати їх пропускну здатність.

Переваги цього: збільшена загальна пропускну здатність, що сприяє вищій швидкості передачі даних. Більш ефективне використання доступних ресурсів спектру. Покращена продуктивність мережі для програм, які потребують високої пропускну здатності.

3) Зв'язок між пристроями (D2D -Device-to-Device):

Концепція D2D дозволяє пристроям безпосередньо спілкуватися один з одним, не покладаючись на центральну базову станцію. Це особливо корисно в ситуаціях з обмеженим покриттям мережі. Пристрої можуть інтелектуально вибрати найефективніший режим зв'язку (D2D або стільниковий) на основі умов мережі та вимог програми. Пристрої можуть безпосередньо обмінюватися даними без залучення базової станції, підвищуючи ефективність у певних сценаріях, таких як обмін файлами або ігри. Методи використовуються для мінімізації перешкод між передачею D2D і роботою стільникової мережі.

4) Формування променя: точне спрямування радіосигналів на користувачів покращує силу сигналу та ефективність мережі, що особливо корисно для розгортання mmWave.

1.4 Передача (Handover)

Передача (Handover) 5G: забезпечення безперебійного з'єднання в мобільному світі.

У динамічній сфері мобільного зв'язку безперебійний доступ до мережі тає дуже важливим. Коли користувачі переміщуються по середовищах зі своїми пристроями, критично важливий закулісний процес, який називається хендовер, який забезпечує безперебійне обслуговування.

Хендовер, також відомий як handoff, означає критичний процес передачі поточного сеансу даних від однієї базової станції (стільникової вежі) до іншої в межах мобільної мережі. Ця складна операція відбувається, коли користувач фізично виходить за межі зони покриття обслуговуючої комірки, що вимагає нової комірки для підтримки з'єднання.

5G охоплює різні механізми передачі, кожен з яких адаптований до конкретних сценаріїв[5]:

Передача всередині gNB: цей тип відбувається, коли користувач переходить між стільниками, якими керує одна базова станція (gNB - gNodeB). Він являє собою найбільш просту та оперативну форму передачі.

Передача між gNB: цей сценарій виникає, коли користувач перемикається між осередками, якими керують окремі базові станції. Передача між gNB вимагає більш складної координації між різними елементами мережі.

Xn Handover: цей інноваційний підхід використовує пряме з'єднання між обслуговуючою коміркою та цільовою коміркою для сигналізації передачі даних. Це зменшує робоче навантаження на базову мережу, що забезпечує більш ефективний процес передачі.

Хендовер на основі NG: цей метод покладається на базову мережу 5G (NG - Next Generation) для прийняття рішень щодо хендоверу та полегшення сигналізації. Це виявляється придатним у ситуаціях, коли передача Xn неможлива.

Кілька ключових факторів впливають на продуктивність і ефективність хендовера в мережі 5G:

- Потужність сигналу: процес передачі ініціюється, коли потужність сигналу від обслуговуючої комірки погіршується, а нова комірka пропонує значно сильніший сигнал.
- Мобільність користувача: швидший рух користувача вимагає швидшого перемикавання для підтримки безперервного з'єднання.
- Перевантаження мережі: інтенсивний трафік на конкретній комірці може викликати перехід до менш перевантаженої комірки, забезпечуючи оптимальну продуктивність мережі.
- Алгоритм прийняття рішення про передачу: мережа використовує складні алгоритми для визначення оптимального часу та цільової комірки для передачі, щоб звести до мінімуму порушення роботи користувача.

Переваги ефективного хендовера в 5G:

- Безперебійне підключення: забезпечує безперебійне продовження дзвінків, сеансів даних і відеопотоків, навіть коли користувачі перебувають у русі.
- Оптимізація мережевих ресурсів: ефективно розподіляє трафік між осередками, запобігаючи перевантаженням мережі та підтримуючи загальну продуктивність мережі.
- Покращена взаємодія з користувачем: мінімізує розриви викликів і неприємні затримки, гарантуючи плавне та надійне з'єднання для користувачів.

Хоча передача 5G пропонує значні переваги, існують постійні виклики та міркування на майбутнє:

- Управління збільшенням кількості хендоверів: з очікуваним зростанням мобільності користувачів і щільнішого розгортання мереж у 5G ефективно керування хендоверами стає ще важливішим.

- Зменшення затримки. Зменшення затримки передачі має першочергове значення для таких програм, як ігри в реальному часі або віртуальна реальність (VR), які потребують низької затримки.
- Інтеграція нарізки мережі: технологія передачі даних повинна плавно адаптуватися до нарізки мережі, де виділені мережеві ресурси виділяються для конкретних програм і служб.

1.5 Висновки до розділу

5G відкриває нову еру мобільного зв'язку. Вивільняючи величезну пропускну здатність, 5G надає користувачам блискавичне завантаження, відео дзвінки без затримок і захоплюючий досвід доповненої або віртуальної реальності. Але щоб усі могли користуватися цими перевагами, потрібна надійна мережа.

5G використовує ширший діапазон частот, причому нижчі діапазони забезпечують широке покриття, а вищі діапазони забезпечують виняткову швидкість. Малі комірки та агрегація операторів ще більше покращують мережу, забезпечуючи цільове збільшення пропускну здатності та ефективний потік даних.

Невидимий симфонічний диригент у цій виставі – хендовер. Цей критично важливий процес плавно передає поточні сеанси даних між стільниковими вежами, зберігаючи безперервні дзвінки та використання даних навіть під час руху. У міру розвитку додатків 5G хендовер продовжуватиме адаптуватися, мінімізуючи затримку та бездоганно інтегруючись із нарізкою мережі для справді трансформаційного мобільного досвіду.

Розділ 2. ПОКРАЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ

2.1 Вступ

У сучасному світі, де все більше пристроїв підключаються до Інтернету, зростає потреба в більшій пропускній здатності каналів. Це стає особливо важливим для таких застосунків, як потокове відео, ігри та Інтернет речей (IoT). У цьому розділі буде розглянуто різні методи та технології, які можна використовувати для покращення пропускної здатності каналу.

2.2 OFDM

OFDM — Orthogonal Frequency-Division Multiplexing. Мультиплексування з ортогональним частотним поділом — це не надто новий метод модуляції, який використовується в сучасних системах бездротового зв'язку. OFDM має численні переваги перед традиційним, роблячи перший придатним для широкого спектру додатків, таких як Wi-Fi, LTE. Суть OFDM полягає в поділі доступної смуги пропускання каналу на велику кількість вузькосмугових піднесучих, які є взаємно ортогональними та не перекриваються[6]. Модулюють кожну з піднесучих, використовуючи кілька методів модуляції і можуть передавати паралельні потоки даних, не впливаючи один на одного.

OFDM має кілька ключових переваг, які роблять його привабливим для багатьох програм. Стійкість до багатопроменевого завмирання, OFDM ефективно бореться з багатопроменевим завмиранням, яке виникає через відбиття сигналу від різних об'єктів у навколишньому середовищі. Ця властивість робить його ідеальним для використання всередині приміщень та інших середовищ, де багатопроменеве завмирання є поширеною проблемою. Проста реалізація, OFDM легко реалізувати за допомогою цифрових методів обробки сигналу. Гнучкість, OFDM можна адаптувати до різноманітних умов каналу та вимог до швидкості передачі даних. Спектральна ефективність, OFDM може досягти високої спектральної ефективності, тобто він може передавати більше даних на одиницю

пропускної здатності. Зменшення шуму, OFDM ефективно пом'якшує шум, роблячи його стійким до перешкод. Низька складність приймача, OFDM можна реалізувати за допомогою простих приймачів, що робить його економічно ефективним рішенням.

OFDM знайшов широке застосування в різних областях[6]:

Wi-Fi: OFDM — це основна технологія модуляції для стандартів Wi-Fi 802.11a/g/n/ac/ax. LTE: OFDM використовується в LTE, стандарті мобільного зв'язку четвертого покоління. Цифрове радіо: OFDM використовується в стандартах цифрового радіомовлення, таких як DAB+ і HD Radio. Цифрове телебачення: OFDM використовується в стандартах цифрового телебачення, таких як DVB-T і DVB-T2. Когнітивне радіо: OFDM відіграє важливу роль у когнітивному радіо, де радіоприймачі можуть динамічно підлаштовуватися під доступний спектр. Підводний зв'язок: OFDM використовується у підводному зв'язку, де багатопроменеве завмирання становить значну проблему.

OFDM може значно збільшити пропускну здатність каналу завдяки своїй здатності ефективно використовувати доступну пропускну здатність. Його стійкість до багатопроменевого завмирання також робить його ідеальним для використання в середовищах, де багатопроменеве завмирання є загальною проблемою. Ці атрибути роблять OFDM цінним інструментом для покращення пропускної здатності каналу.

2.3 NB-IoT

Narrowband Internet of Things (NB-IoT) - Вузькосмуговий Інтернет речей виступає як відомий стандарт радіотехнології глобальної мережі малої потужності (low-power wide-area network - LPWAN). Розроблений у рамках Партнерського проекту третього покоління (3GPP), NB-IoT спеціально призначений для міжмашинного зв'язку (M2M) у домені Інтернету речей (IoT) [7]. Він ідеально підходить для пристроїв зі скромними вимогами до передачі даних і критичною потребою в подовженому терміні служби батареї.

NB-IoT використовує ретельно підібрану підмножину стандарту довгострокового розвитку (Long-Term Evolution - LTE), домінуючої технології, що лежить в основі стільникових мереж 4G. Однак, на відміну від традиційного LTE, NB-IoT працює в значно вужчій смузі пропускання, як правило, у обмеженому діапазоні 200 кГц[7]. Три типи моделі розгортання показані на рисунку 2.1.

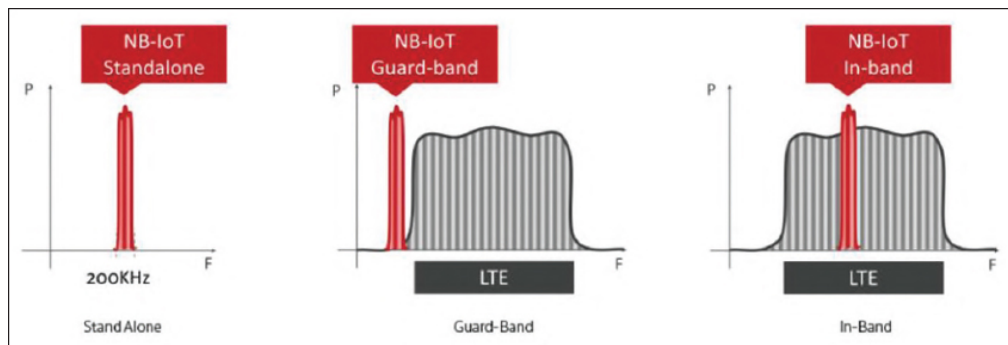


Рисунок 2.1

Три розгортання, що підтримуються вузькосмуговим Інтернетом речей.[7]

1. Незалежне розгортання (автономний режим), яке використовує смугу вільного повторення, яка не має покриття смугою повторення LTE
2. Розгортання захисної смуги (режим захисної смуги), що використовує частоту крайової смуги
3. Внутрішньосмугове розгортання (внутрішньосмуговий режим), яке використовує діапазон частот LTE для розгортання та бере один фізичний блок ресурсу з джерела діапазону частот LTE для розгортання

Це навмисне зосередження на більш вузькій смузі дає явні покращення: спрощена конструкція пристроїв: пристрої NB-IoT можуть бути розроблені з меншою складністю завдяки зменшеним вимогам до пропускну здатності. Це означає менші витрати на виробництво та потенційно менші форм-фактори. Підвищена енергоефективність: передаючи й отримуючи дані меншими пакетами, пристрої NB-IoT значно подовжують термін служби акумулятора. Це часто може призвести до роботи протягом кількох років на одній зарядці, мінімізуючи потреби в обслуговуванні. Покращене проникнення всередину будівлі: більш вузька смуга пропускання, яку використовує NB-IoT, забезпечує чудове поширення сигналу

всередині будівель та інших складних середовищ, схильних до ослаблення сигналу. Це забезпечує надійне підключення в різних сценаріях розгортання. Пряма видимість (LOS, Line-of-Sight) забезпечує найсильніший сигнал, якщо між базовою станцією NB-IoT та пристроєм немає перешкод, сигнал буде найпотужнішим, що дозволить передавати дані на більші відстані та з меншою ймовірністю помилок.

NB-IoT пропонує переконливу пропозицію для комунікацій M2M у середовищі IoT[7]: незрівнянне низьке енергоспоживання: як згадувалося раніше, пристрої NB-IoT перевершують ефективність використання акумулятора. Це полегшує розгортання у віддалених місцях або сценаріях, де часта заміна батарей є недоцільною. Широке географічне покриття: NB-IoT використовує існуючу інфраструктуру стільникової мережі, забезпечуючи широке географічне покриття для підключених пристроїв. Це у багатьох випадках усуває потребу у розгортанні спеціальної мережі. Економічне впровадження: простіша конструкція пристрою та ефективна робота мережі сприяють меншій загальній вартості порівняно з іншими стільниковими рішеннями IoT. Надійні механізми безпеки: NB-IoT успадковує надійні механізми безпеки основного стандарту LTE. Це забезпечує надійну та безпечну передачу даних, захищаючи конфіденційну інформацію, якою обмінюються пристрої. Масштабованість для масового розгортання: Мережі NB-IoT здатні безпроблемно працювати з великою кількістю підключених пристроїв. Це робить його ідеальним для широкомасштабного розгортання IoT, що включає безліч датчиків і пристроїв.

Завдяки своїм унікальним характеристикам NB-IoT знаходить застосування в різноманітних вертикалях IoT, зокрема: інфраструктура інтелектуального вимірювання (Smart Metering Infrastructure): NB-IoT ідеально підходить для передачі даних з лічильників електроенергії, води та газу, забезпечуючи дистанційний моніторинг та ефективну практику виставлення рахунків. Відстеження та управління активами: NB-IoT можна ефективно використовувати для відстеження розташування та стану різних активів, таких як транспортні засоби, контейнери та промислове обладнання, оптимізуючи логістику та операції

з технічного обслуговування. Програми віддаленого моніторингу (Remote Monitoring Applications): системи моніторингу навколишнього середовища, сільськогосподарські датчики та моніторинг промислових процесів можуть отримати вигоду від можливостей NB-IoT з низьким енергоспоживанням і широким покриттям. Розвиток розумного міста: NB-IoT може сформувати основу для ініціатив розумного міста, підключаючи безліч датчиків для управління трафіком, моніторингу наявності паркувальних місць та оптимізації збору відходів. Носимі пристрої з низьким енергоспоживанням: певні носимі пристрої з обмеженими потребами в передачі даних можуть використовувати NB-IoT для подовження терміну служби батареї та надійного підключення.

NB-IoT існує в конкурентному середовищі поряд з іншими технологіями LPWAN, такими як LoRaWAN і Sigfox. Ось стисле порівняння, яке виділяє ключові відмінності, наведені в таблиці 2.1:

Таблиця 2.1. Порівняння NB-IoT, LoRaWAN та Sigfox.

Feature	NB-IoT	LoRaWAN	Sigfox
Network Infrastructure	Cellular Network (LTE, 5G)	Dedicated Network or Public Network	Dedicated Network
Range	Indoor, outdoor	Long (outdoor)	Long(outdoor)
Power Consumption	Very Low, Moderate, High	Very Low	Very Low
Data Rate	High	Low	Very Low
Security	High	Moderate	Moderate
Cost per Device	Moderate	Low	Low

Оптимальний вибір між NB-IoT та іншими варіантами LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) залежить від конкретних вимог конкретної програми. NB-IoT пропонує добре збалансований підхід, забезпечуючи хороший компроміс між енергоспоживанням, швидкістю передачі даних, безпекою та використанням існуючої інфраструктури стільникової мережі.

2.4 Модифіковане стиснення часу символу. Modified Symbol Time Compression (MSTC)

Технологія MSTC в контексті 5G є однією з ключових інновацій, яка дозволяє оптимізувати передачу даних в мережах п'ятого покоління. Ця технологія впроваджується для підвищення ефективності і надійності зв'язку, а також для підтримки різноманітних застосунків, які вимагають високої пропускної здатності і низької затримки.

Основна ідея MSTC полягає в тому, щоб використовувати інформацію з різних датчиків і сенсорів для адаптації параметрів передачі даних в реальному часі. Це може бути корисним в ситуаціях, коли мережа стикається з різними типами завад або коли потрібно забезпечити оптимальну якість обслуговування для конкретного застосунку.

Однією з ключових переваг MSTC є здатність адаптувати передачу даних залежно від умов мережі і вимог застосунків. Це може включати автоматичне регулювання пропускної здатності, вибір оптимального способу модуляції або використання різних антенних конфігурацій для максимізації швидкості і стабільності зв'язку.

Крім того, MSTC може бути використана для підтримки розширених функцій мережевого управління, таких як динамічне розподілення ресурсів, управління якістю обслуговування і механізми реалізації QoS (Quality of Service). Це дозволяє мережам 5G працювати ефективніше в умовах високої навантаженості і забезпечувати високу якість зв'язку для користувачів різних застосунків, включаючи мобільні комунікації, інтернет речей (IoT), віртуальну реальність (VR) та інші.

У підсумку, технологія MSTC в 5G є важливим компонентом, який сприяє оптимізації роботи мережі, забезпеченню надійного і швидкого зв'язку і відкриває нові можливості для розвитку сучасних телекомунікаційних сервісів і застосунків.

2.5 Визначення максимальної пропускної здатності каналу

Для визначення максимальної пропускної здатності каналу зв'язку використовується формула Шеннона, вона описує теоретичну межу кількості інформації, яку можна надійно передати через канал за одиницю часу

$$C = B * \log_2(1 + S/N) \quad (2.1)$$

де:

C: Пропускна здатність каналу (біт/секунду)

B: Ширина смуги частот каналу (Гц)

S: Потужність сигналу (Вт)

N: Потужність шуму (Вт)

Формула для коефіцієнта бітових помилок (BER) дуже проста:

$$BER = E_b / N_b \quad (2.2)$$

де:

BER: Частота бітових помилок (без одиниць)

E_b : кількість бітів, отриманих з помилкою

N_b : Загальна кількість отриманих бітів

Ця формула по суті розраховує частку бітів, які були отримані неправильно, порівняно із загальною кількістю переданих бітів. Нижчий BER вказує на більш надійну передачу даних.

2.6 Швидкість передачі даних

Для обчислення пропускної здатності 5G NR було використано сайт «5G Tools for RF Wireless» (5G NR Throughput calculator) [8]. Калькулятор дозволяє розрахувати максимальну пропускну здатність мережі 5G NR для користувача (в залежності від його мобільного пристрою (UE)) або стільника. Розрахунок базується на стандарті 3GPP TS 38.306: можливості радіодоступу обладнання користувача (UE) і використовує формулу для отримання швидкості пропускної здатності 5G NR у DL (низхідній лінії зв'язку) та UL (висхідній лінії зв'язку). Для отримання коректного результату необхідно ввести такі важливі параметри, як:

режим мережі 5G, кількість агрегованих несучих, кількість шарів MIMO, смуга пропускання, частотний діапазон, тип модуляції та ін.

Приблизну швидкість передачі даних 5G NR в Мб/с можна розрахувати за формулою:

$$\text{data rate} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^{J\Sigma} \left(v_{\text{Layers}}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f_{\text{max}}^{(j)} \cdot R \frac{N_{\text{PRB}}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} (1 - OH^{(j)}) \right) \quad (2.3)$$

Де:

J це кількість агрегованих компонентних несучих у смузі або комбінації смуг

$$R_{\text{max}} = 948/1024$$

$v_{\text{Layers}}^{(j)}$ це максимальна кількість підтримуваних шарів

$Q_m^{(j)}$ є максимальним підтримуваним порядком модуляції

$f^{(j)}$ це коефіцієнт масштабування, може приймати значення 1, 0.8, 0.75, і

0.4.

T_s^μ це середня тривалість символу OFDM у субфреймі для нумерології μ ,

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}$$

$N_{\text{PRB}}^{BW(j),\mu}$ це максимальний розподіл RB у смузі пропускання з нумерологією.

$OH^{(j)}$ є накладними витратами та приймає такі значення

0,14, для діапазону частот FR1 для DL

0,18, для діапазону частот FR2 для DL

0,08, для діапазону частот FR1 для UL

0,10, для діапазону частот FR2 для UL

Приблизну максимальну швидкість передачі даних можна обчислити як максимальну з приблизних швидкостей передачі даних, обчислених за допомогою наведеної вище формули (3) для кожного з підтримуваних діапазонів або комбінацій діапазонів.

Для розрахунку швидкості передачі даних використовувались мінімальні еталонні значення, які взяті з стандарту 3GPP TS 38.306 та наведені в таблицях нижче. Також варто зазначити, що для обрахунку використовувались такі дані, як: напрямок передачі даних UL (висхідна лінія), режим FDD (дуплекс з частотним поділом), режим модуляції 64QAM та швидкість коду R_{max} , значення залежить від типу кодування з 3GPP 38.214 (Швидкість цільового коду $R / 1024$) = 0.92578125, діапазон частот 3GPP 38.104: FR1 (450 МГц – 6000 МГц) і FR2 (24250 МГц – 52600 МГц), інтервал між піднесучими 30 кГц, $T_s^\mu = 0.00003571428571428572$. Дані наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Вхідні дані для FR1 діапазону та Розрахована пропускна здатність 5G NR, Mbps

№	j	$v_{Layers}^{(j)}$	$Q_m^{(j)}$	R_{max}	$f^{(j)}$	$BW^{(j)}$, MHz	μ , kHz	$N_{PRB}^{BW^{(j)}, \mu}$	$OH^{(j)}$	Розрахована пропускна здатність 5G NR, Mbps
1	1	1	6	948	1	15	30	38	0,08	65,248
2						30	30	92		133,931
3						60	30	162		278,165
4						100	30	273		468,759

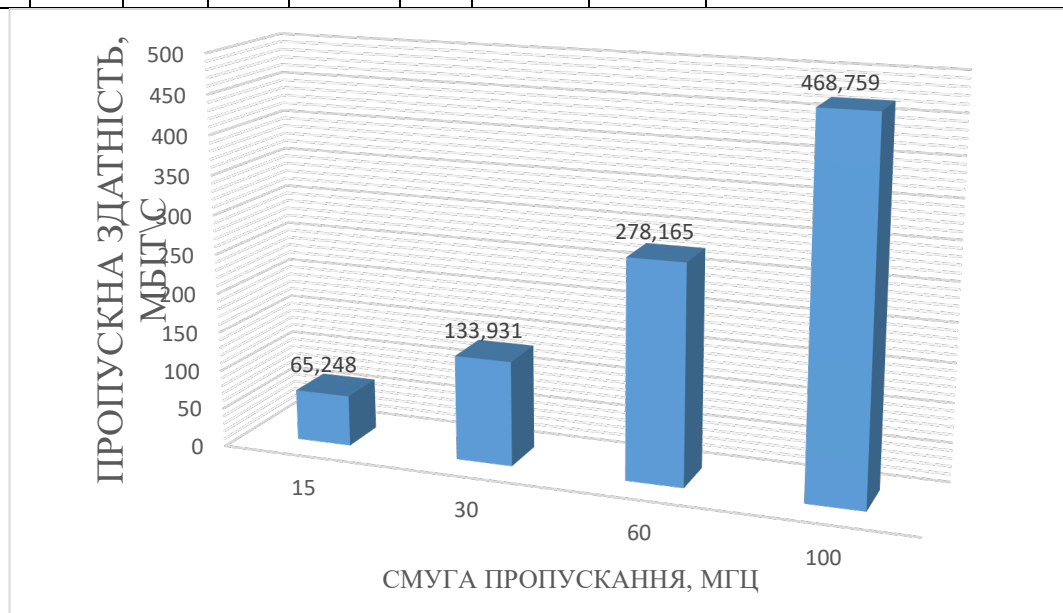


Рисунок 2.2. Залежність розрахункової пропускної здатності 5G NR, Mbps від смуги пропускання

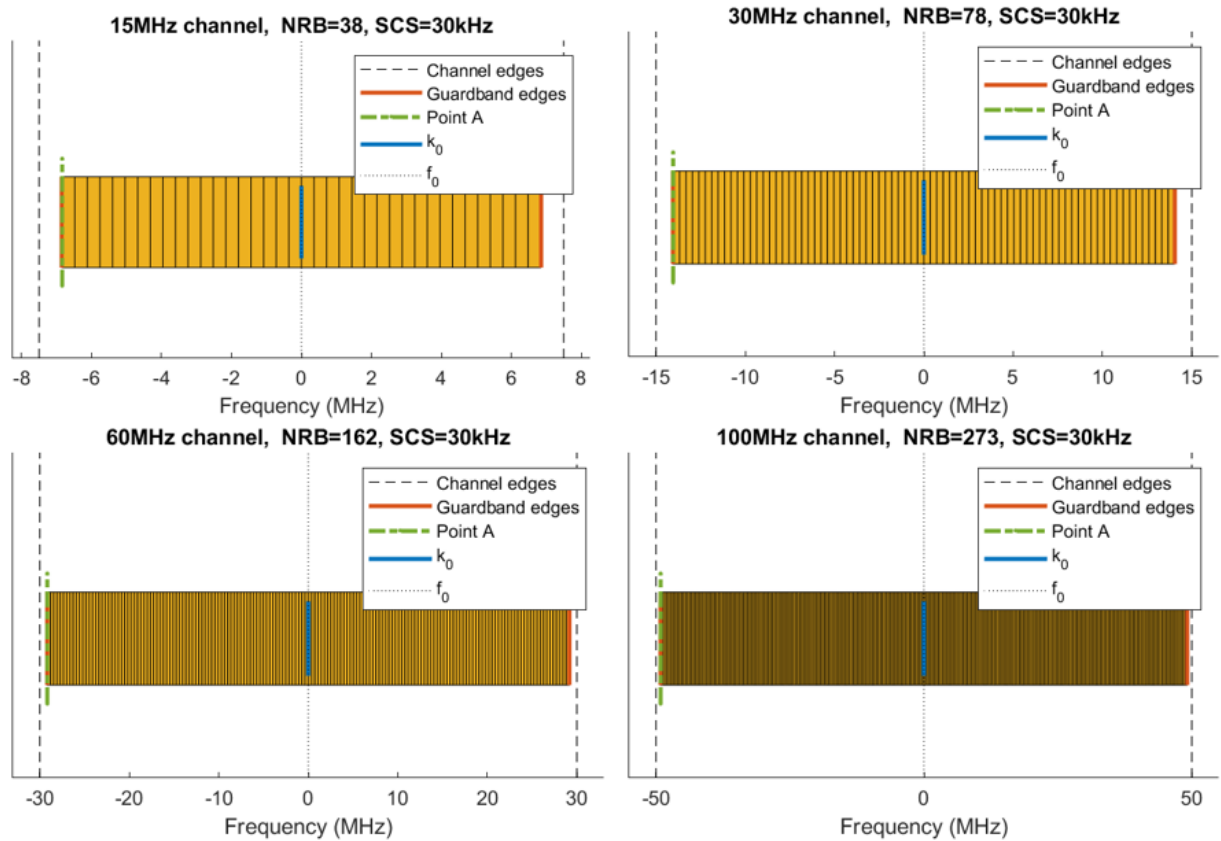


Рисунок 2.3 Wireless Waveform Generator - Channel View (Вигляд каналу)

Використовуюючи Matlab, Wireless Waveform Generator - Channel View , ми дізнались скільки ресурсних блоків (NRB) передається за одиницю часу при різних смугах пропускання, результати в таблиці 2.3 та рисунок 2.3.

Таблиця 2.3. Смуга пропускання та ресурсний блок.

Смуга пропускання, МГц	15	30	60	100
Ресурсний блок, RB	38	78	162	273

Отримані дані, зображені в таблиці 2.2 та рисунку 2.2, демонструють нам, як при збільшенні смуги пропускання збільшується швидкість передачі даних для **15МГц** швидкість передачі даних становить **65,248 Mbps**, **30МГц** швидкість передачі даних становить **133,931 Mbps**, **60МГц** швидкість передачі даних становить **267,862 Mbps**, **100МГц** швидкість передачі даних становить **446,437 Mbps**.

становить **278,165 Mbps**, **100МГц** швидкість передачі даних становить **468,759 Mbps**.

Для порівняння, нижче будуть наведені результати з використанням FR2 діапазону, що використовує більші значення смуги пропускання, інтервал між піднесучими тут дорівнює 120 кГц, результати мона побачити в таблиці 2.4 та рисунку 2.4. $T_s^\mu = 0.00000892857142857143$

Таблиця 2.4. Вхідні дані для FR2 діапазону та Розрахована пропускна здатність 5G NR, Mbps

№	j	$\nu^{(j)}$ Layers	$Q_m^{(j)}$	R_{\max}	$f^{(j)}$	$BW^{(j)}$, MHz	μ , kHz	$N_{PRB}^{BW^{(j)}}$	$OH^{(j)}$	Розрахована пропускна здатність 5G NR, Mbps
1	1	1	6	948	1	50	120	32	0.08	215.006
2						100	120	66		443.451
3						200	120	132		886.901
4						400	120	264		1773.803

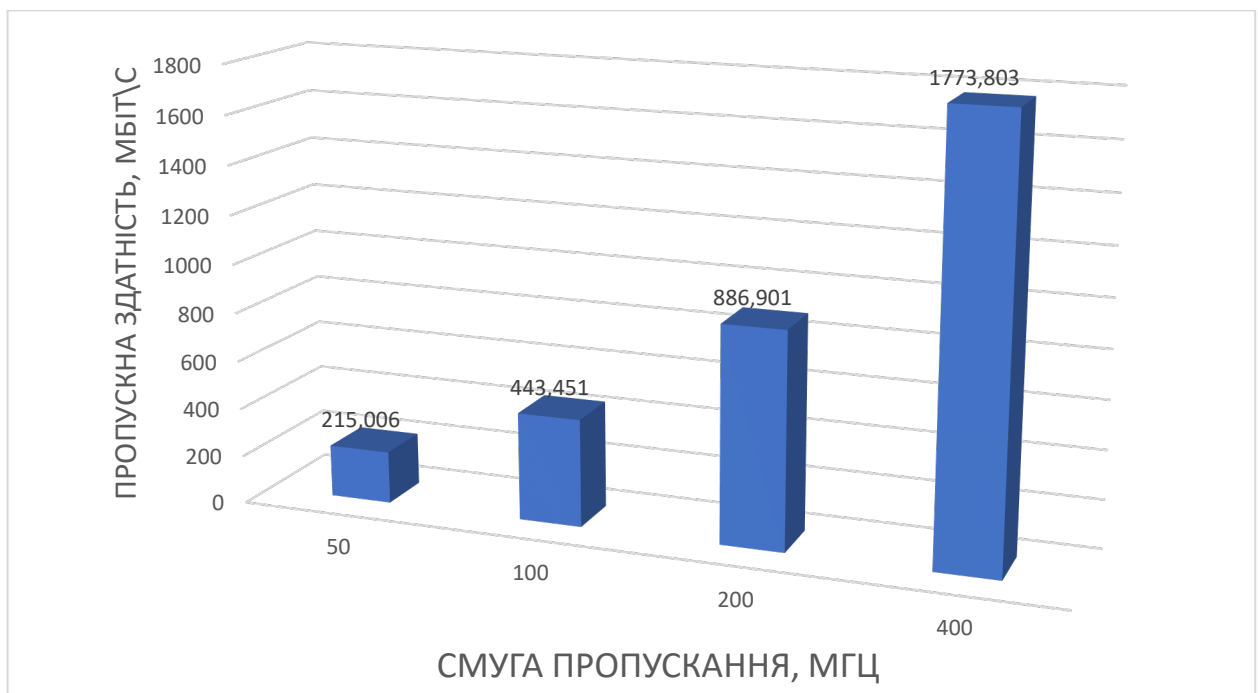


Рисунок 2.4 FR2 смуга пропускної здатності

Як можемо бачити з таблиці 2.4 та рисунку 2.4, FR2 діапазон дозволяє використовувати більшу смугу пропускання, що впливає на збільшення швидкості

передачі даних, наприклад при смузі пропускання **200МГц** отримаємо швидкість в **886.901 Мбіт\с**, **400МГц** швидкість передачі даних **1773.803 Мбіт\с**.

Також, можемо порівняння результати швидкості передачі даних в мережах 4 покоління зв'язку з подібними вхідними даними, але набагато меншою пропускну здатність мережі 4G, вхідні дані та результати в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Вхідні дані для та розрахована пропускна здатність для 4G.

№	1	2	3	4	5	6
Смуга пропускання, MHz	1.4	3	5	10	15	20
Ресурсний блок(RB)	6	15	25	50	75	100
Розрахована пропускна здатність 4G, Mbps	4	11	19	38	57	76

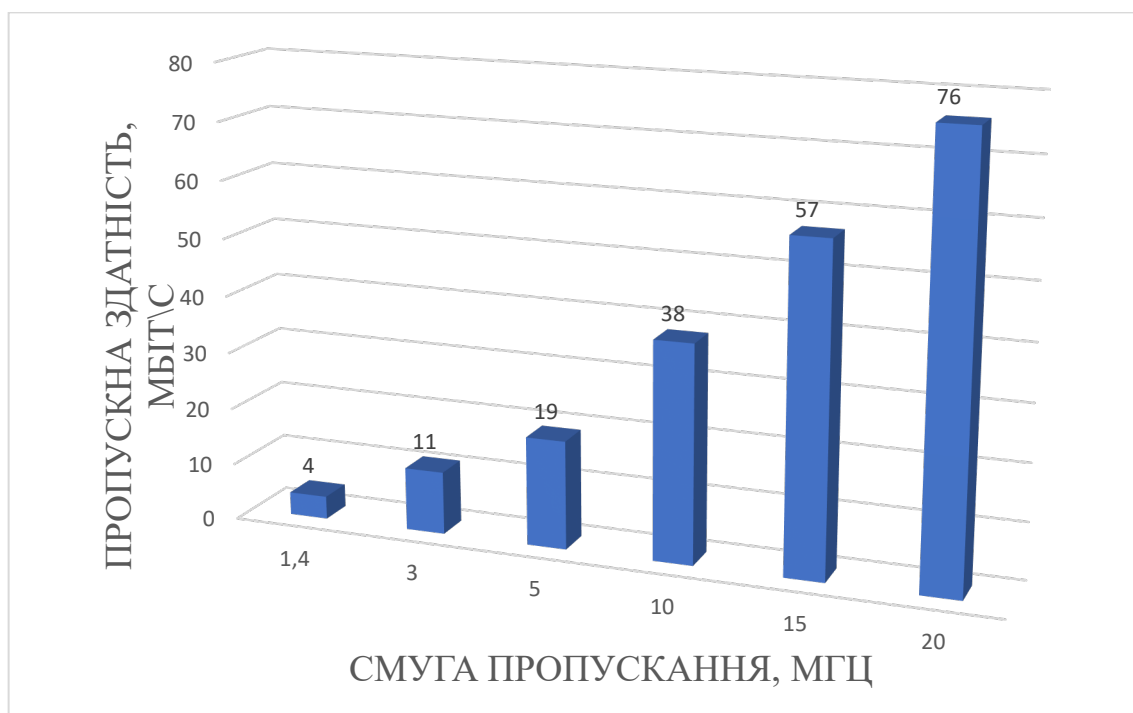


Рисунок 2.5

Завдяки отриманим результатам ми можемо бачити на скільки сильно 5G випереджає попереднє покоління зв'язку у швидкості передачі даних, а саме, приблизно в 20 разів швидше за 4G.

2.7 Висновок до розділу

Дослідження чітко показало, що збільшення смуги пропускання в мережах 5G має прямий і значний вплив на підвищення швидкості передачі даних. Обидва діапазони FR1 та FR2 демонструють вражаючі результати, однак FR2, завдяки своїм ширшим смугам пропускання, забезпечує набагато вищі швидкості передачі даних. Порівняння з 4G підтверджує, що технологія 5G, значно перевершує попереднє покоління мобільного зв'язку за всіма ключовими показниками.

Ці результати підкреслюють важливість впровадження широких смуг пропускання для досягнення максимальних переваг мереж 5G, що є критичним фактором для задоволення зростаючих вимог до швидкості та якості обслуговування в сучасних комунікаційних системах.

Розділ 3. MIMO ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПОТУЖНІСТЬ СИГНАЛУ

3.1 MIMO Технології

Постійно зростаючий попит на трафік даних у системах бездротового зв'язку спонукав розвиток інноваційних технологій для підвищення пропускної здатності мережі та покращення взаємодії з користувачем. Ключову роль у досягненні цієї мети відіграє технологія Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), ключова антенна технологія. MIMO використовує кілька антен як на передавачі, так і на приймачі, щоб підвищити ефективність передачі даних і боротися з погіршенням каналу. У цьому розділі розглядаються фундаментальні принципи технології MIMO та її важливий внесок в успіх мереж 5G.

MIMO використовує просторову область, використовуючи кілька антен як на базовій станції, так і на обладнанні користувача (UE- user equipment) для одночасної передачі та прийому сигналів даних. Цей підхід пропонує кілька переваг перед традиційними системами з одним входом і одним виходом (SISO-single-input single-output) [9]:

- Збільшена пропускна здатність даних: MIMO забезпечує передачу кількох потоків даних одночасно, ефективно збільшуючи пропускну здатність каналу порівняно з SISO.
- Покращена якість сигналу: MIMO може використовувати просторове рознесення для пом'якшення завмирання каналу, явища, коли потужність сигналу слабшає через перешкоди або багатошляхове поширення. Отримуючи сигнали з різних просторових шляхів, MIMO може реконструювати сильніший і надійніший сигнал.
- Покращена пропускна здатність системи: MIMO дозволяє просторове мультиплексування, коли кілька користувачів можуть спільно використовувати одну частотну смугу без перешкод, використовуючи різні просторові канали. Це значно збільшує пропускну здатність мережі та обслуговує зростаючу кількість користувачів.

3.2 Massive MIMO

Загальна концепція масивного MIMO визначається як технологія фізичного рівня, яка оснащує кожен BS величезною кількістю активних антен, які можна використовувати для просторового мультиплексування, щоб можна було спілкуватися з ними на одному і тому ж частотно-часовому ресурсі. Спектральна ефективність на клітинку може бути покращена на порядки в порівнянні з класичними стільниковими мережами, впорючись із загасанням сигналу та перешкодами за допомогою просторової обробки сигналу за допомогою таких методів, як комбінування прийому та попереднє кодування передачі. Варто нагадати, що масивний MIMO є модернізованою версією множинного доступу з просторовим поділом (SDMA), що висуває просторове мультиплексування на екстремальний рівень, що продемонстровано на рисунку 3.1.

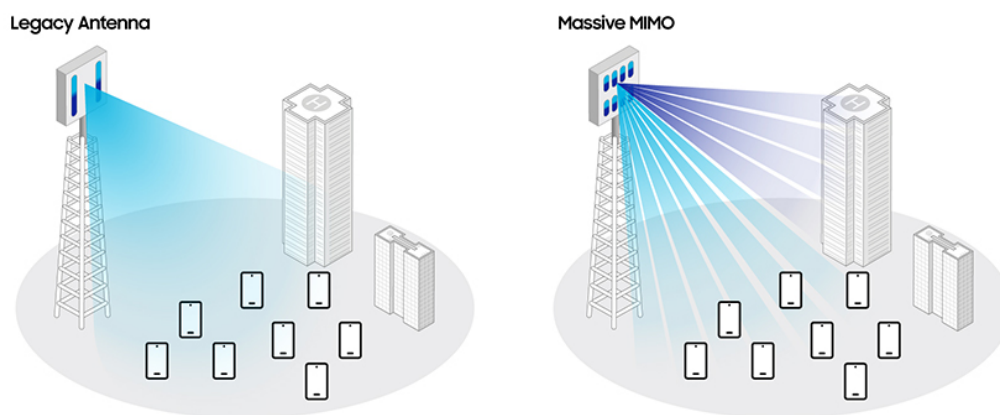


Рис. 3.1. [10]

Основні переваги масивних систем MIMO можна підсумувати як:

- Величезна спектральна ефективність;
- Надійність зв'язку;
- Висока енергоефективність;
- Низька складність обробки сигналів;

- Сприятливе розмноження;
- Канальне зміцнення.

Massive MIMO успадковує всі переваги від звичайного багатокористувацького MIMO (MU-MIMO), тобто з M -антенною BS і користувачами з однією антенною K ми можемо досягти різноманітності порядку M і мультиплексного посилення (M, K) [9]. Збільшуючи як M , так і K , ми можемо отримати величезну спектральну ефективність і дуже високу надійність зв'язку за допомогою простої лінійної обробки.

Масивний MIMO для 5G

Мережі 5G змінюють парадигму мобільного зв'язку, вимагаючи значно вищої швидкості передачі даних, меншої затримки та масового підключення пристроїв. Щоб відповідати цим суворим вимогам, 5G значною мірою покладається на спеціалізовану форму MIMO, відому як Massive MIMO.

Massive MIMO використовує велику кількість антен на базовій станції, як правило, від десятків до сотень, порівняно з меншою кількістю антен на користувацькому обладнанні. Ця велика антенна решітка пропонує кілька ключових переваг для 5G:

Формування променя: Massive MIMO забезпечує чітку передачу сигналу до певних користувачів. Цей метод, який називається формуванням променя, значно покращує потужність сигналу та зменшує перешкоди для цільових користувачів.

Розширене покриття: збільшений коефіцієнт посилення антени в Massive MIMO розширює зону покриття стільника, забезпечуючи кращий зв'язок на периферії мережі.

Massive Machine-Type Communication (mMTC): Massive MIMO сприяє ефективному керуванню безліччю малопотужних пристроїв у програмах, таких як сенсорні мережі та Інтернет речей (IoT), завдяки просторовому мультиплексуванню та ефективному розподілу ресурсів.

Технологія MIMO, зокрема Massive MIMO, є наріжним каменем для мереж 5G. Використовуючи просторову область, MIMO покращує пропускну здатність

даних, покращує якість сигналу та збільшує пропускну здатність мережі. Масштабні можливості формування променя MIMO та ефективне керування численними пристроями дають змогу 5G виконувати свої обіцянки щодо надшвидкої швидкості передачі даних, наднизької затримки та масового підключення пристроїв, прокладаючи шлях для інноваційних програм і перетворюючи майбутнє мобільного зв'язку.

Очікується, що кожна антена буде міститися в недорогому модулі з простою обробкою і малопотужним підсилювачем. Декілька результатів можна використовувати при розробці системи, оскільки події, які раніше були випадковими, починають виглядати детермінованими. Прикладом є розподіл сингулярних значень матриці каналів, які наближаються до детермінованої функції. Інший приклад: дуже широкі або дуже високі матриці, як правило, дуже добре обумовлені. Крім того, коли розміри великі, деякі матричні операції, такі як інверсії, можна виконати швидко за допомогою методів розширення рядів[9].

3.3 Діапазон частот 5G, mmwave

Найвищі швидкості передачі в мережах 5G становлять близько 2 гігабіт на секунду (Гбіт/сек), що у два порядки вище швидкостей у мережах LTE, де максимальні показники становлять 35 мегабіт на секунду (Мбіт/сек).

Для того, щоб досягти таких швидкостей, мережі 5G використовують набагато вищі робочі частоти в порівнянні з тими, які використовувалися стільниковими мережами раніше, захоплюючи і так званий міліметровий діапазон. Однак, через те, що радіус поширення хвиль на високих частотах менший за радіус охоплення низьких частот, мережі 5G використовують для роботи поєднання частот з декількох діапазонів, які зазвичай класифікуються як високі, середні та низькі.

Огляд частотних діапазонів:

1) Низькочастотний 5G працює у діапазоні 600-850 МГц. Це приблизно той же діапазон, який використовують існуючі мережі 4G, і швидкість передачі даних

тут лише не набагато вище, ніж у мережах 4G, - близько 50-250 Мбіт/сек, при практично ідентичному радіусі охоплення стільникових вишок. Далеко не всі регіональні оператори і не у всіх містах ставлять на вежах обладнання для низькочастотного 5G; деякі вважають за краще починати із середньочастотного 5G. Тим не менш, не варто забувати про те, що 5G-сумісні пристрої можуть підключатися до низькочастотних мереж 5G і працювати на швидкості, схожій на швидкість мереж 4G/LTE.

2)Середньочастотний 5G працює в діапазоні 2.5-3.8 ГГц і забезпечує можливість передачі даних на швидкості 100-900 Мбіт/сек. Незважаючи на менший радіус покриття кожної вежі стільникового зв'язку, цей тип 5G, згідно з прогнозами, стане найбільш поширеним практичним рішенням для роботи мереж 5G протягом багатьох років. Це розумний компроміс між швидкістю роботи мережі та дальністю поширення сигналу – як у міських районах із середньою щільністю забудови, так і у сільській місцевості із менш щільною забудовою.

3)Високочастотний 5G – це діапазон, який найчастіше асоціюється із 5G. Цей діапазон охоплює частоти від 25 до 39 ГГц і відомий як міліметровий. Він забезпечує можливість передачі на гігабітних швидкостях (практичні тести показали можливість передачі на швидкості до 3 Гбіт/сек). Проблема полягає в тому, що передавачі міліметрового діапазону мають дуже обмежений радіус покриття, тому для нормальної роботи мережі потрібна установка безлічі невеликих передавачів, а це можливо лише в міських агломераціях, де передавачі можна встановлювати поряд із будинками.

Міліметрова хвиля (mm-Wave). Спектр міліметрових хвиль потрапляє в діапазон від 30 ГГц до 300 ГГц. Термін міліметрова хвиля описує короткочасність довжини радіохвилі, що становить лише кілька міліметрів або менше. 5G промисловість також використовує трохи довший спектр ніж мм хвилі, наприклад 24 ГГц і 28 ГГц – але ці частоти багато в чому схожі своїми експлуатаційними характеристиками. Ці групи разом з частотами 39 ГГц і вище називаються міліметрова хвиля. Основна привабливість спектру мм хвиль це його велика

пропускна здатність, що робить можливим доставку гігабітних бездротових послуг.

Ще одна перевага цього спектру є те, що антени можуть передавати та приймати настільки мало, що ви можете упакувати велику кількість антенних елементів на невелику площу, що дає можливість досягти високого посилення антени та формування променя, навіть у телефонах. Однак основним недоліком є маленька область, яка використовується для прийому сигналу.

Досягнення в науковій сфері знизило вартість виробництва mmWave обладнання до такого рівня, що зараз його можливо застосовувати для побутової електроніки. Подальше дослідження та розробки в даний час тривають.

Втрати в міліметрових хвилях. Зростаючий попит на більш високу швидкість передачі даних привів до значної уваги 5G на mmWaves, чия широка смуга пропускання є надзвичайно перспективною. Однак, щоб оптимально спроектувати бездротову систему mmWave, важливо зрозуміти їх поведінку поширення. MmWaves поведуться по-різному в кількох ключових аспектах, ніж частоти нижче 6 ГГц, які сьогодні частіше використовуються стільниковими системами. Залежно від конкретного випадку використання ці відмінності можуть створювати проблеми або можливості.

Величина контуру вільного простору. Pathloss – це ослаблення або зменшення щільності потужності електромагнітної хвилі під час її поширення. Це головне значення для всіх систем бездротового зв'язку, оскільки є фундаментальним для аналізу та проектування бюджету каналу. Часто стверджується, що мм хвилі зазнають більших втрат в тракці порівняно з нижчими частотами, тим самим обмежуючи діапазон. Однак це приховує важливі деталі, тому корисно зрозуміти походження цієї частотно-залежної втрати. За відсутності атмосферного поглинання або розсіювання щільність випромінюваної потужності ізотропного джерела зменшується як $1/d^2$, де d – відстань від передавача. Цей квадратичний спад виникає внаслідок збереження енергії і не залежить від частоти.

3.4 LOS(в межах прямої видимості) та NLOS(поза межами прямої видимості)

5G mmWave використовує масивні антени MIMO. Осередки меншого розміру 5G mmWave не тільки забезпечують високу пропускну здатність, але також дозволяють ефективно використовувати спектр, оскільки частоти можна повторно використовувати на відносно невеликих відстанях. Передбачається, що розміри зовнішніх осередків зазвичай становитимуть від 100 м до 200 м, а розгортання в приміщеннях з високою щільністю розміщення може становити всього 10 м. Тому важлива частина характеристик 5G mmWave залежить від поширення сигналів у межах прямої видимості (LOS) і поза прямою видимості (NLOS) та конструкції антени.[5]

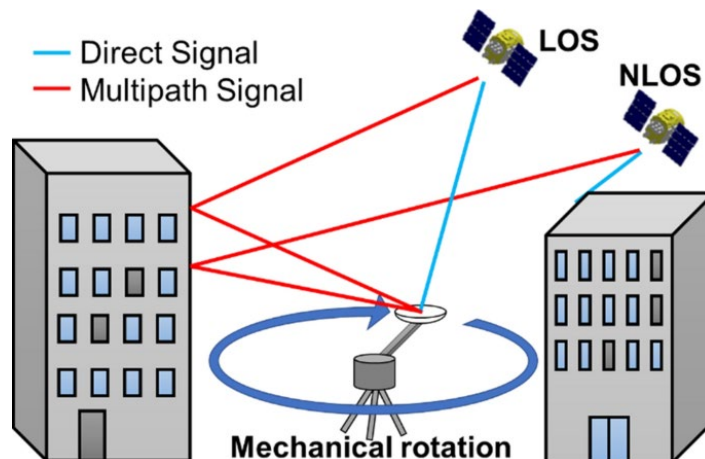


Рисунок 3.2. (LOS and NLOS)[11]

LOS означає лінію видимості. На рис. 3.2 зображено зв'язок прямої видимості між двома приймачами (позначено синім кольором) [11]. Це розгортання LOS можливе, коли немає перешкод між базовою станцією (gNodeB) і мобільними/фіксованими абонентськими станціями (SS). Іншими словами, зв'язок LOS можливий, коли немає перешкод між передавачем і приймачем. Завдяки меншому ослабленню зв'язку LOS, він пропонує хорошу силу сигналу та більшу пропускну здатність порівняно з аналогом NLOS.

На рисинку 3.2 зображено сценарій розгортання NLOS (позначено червоним кольором). Як показано, бездротовий зв'язок вважається NLOS, коли природні та/або штучні споруди блокують шлях між базовою станцією (gNodeB) та абонентськими станціями. Іншими словами, зв'язок NLOS можливий навіть за наявності перешкод між передавачем і приймачем. Сигнал надходить до приймача після того, як пройде багато перешкод між ними. На шляху сигнал проходить через загасання, а також відбиття, дифракцію, а також проникнення, про які зазначалось раніше.

На щастя, у кремнієвих ВЧ-технологіях було досягнуто великих успіхів, які дозволяють підтримувати велику кількість ВЧ-ланцюжків у великих антенних ґратах. Доступна обчислювальна та комутаційна здатність дозволяє антенам з «масивною безліччю входів і безліччю виходів (масивний MIMO)» створювати високоспрямовані промені, які фокусують енергію, що передається таким чином, щоб подолати втрати на трасі та умови NLOS. Фундаментальна характеристика mmWave - короткі довжини хвиль - означає, що навіть масивні антени MIMO можуть бути відносно компактними, а невеликі ефективні антени можуть бути легко інтегровані в пристрої. У той час як антени MIMO для бездротової мережі до 6 ГГц можуть підтримувати вісім елементів, на частотах mmWave кількість масивних елементів MIMO може бути 128, 256 або вище. Ці «фазовані ґрати» виконують формування променю, управління променем.

3.5 MIMO пропускна здатність каналу

Модель каналу MIMO

Канали MIMO можна моделювати за допомогою матриць для представлення зв'язку між переданими та прийнятими сигналами. Типовий канал MIMO можна виразити так:

$$y = Hx + n \quad (3.1)$$

де:

y: вектор прийнятого сигналу (довжина = кількість приймальних антен)

H : Матриця каналів (розміри: кількість приймальних антен \times кількість передавальних антен)

x : вектор переданого сигналу (довжина = кількість передавальних антен)

n : вектор шуму (довжина = кількість приймальних антен)

Матриця каналу (H) фіксує комплексне згасання та фазовий зсув, які відчуває кожен переданий сигнал, коли він поширюється через канал. Пропускна здатність каналу MIMO залежить від статистичних властивостей матриці каналу (H) і характеристик шуму.

Формула ємності

Теоретична пропускна здатність каналу MIMO за ідеальної інформації про стан каналу (CSI) на передавачі (тобто передавач знає точну матрицю каналу) може бути розрахована за такою формулою, виведеною Емре Телатаром у 1999 році:

$$C = E[\log_2(\det(I_r + (SNR/M)HH^H))] \quad (3.2)$$

де:

C : Ємність каналу (біт/с/Гц)

E : Оператор очікування

I_r : Матриця ідентифікації з розмірністю, що дорівнює кількості приймальних антен

SNR : співвідношення сигнал/шум

M : Кількість передавальних антен

Ця формула підкреслює залежність пропускної здатності каналу від кількох факторів:

- Співвідношення сигнал/шум (SNR): вищий SNR призводить до вищої пропускної здатності каналу, оскільки сигнал стає краще відрізнити від шуму.
- Кількість передавальних антен (M): Збільшення кількості передавальних антен може потенційно збільшити пропускну здатність каналу за рахунок використання просторового рознесення.

- Матриця каналу (H): статистичні властивості матриці каналу, такі як її власні та сингулярні значення, впливають на досяжну пропускну здатність. Ємність з недосконалим CSI

У практичних сценаріях передавач може не мати ідеальних знань про матрицю каналу через такі фактори, як помилки оцінки каналу та обмеження зворотного зв'язку. Цей недосконалий CSI погіршує досяжну пропускну здатність каналу порівняно з випадком ідеального CSI. Для пом'якшення впливу недосконалого CSI на системи MIMO використовуються різні методики, такі як каналне кодування та попереднє кодування.

Пропускна здатність каналу MIMO є фундаментальною концепцією для оцінки продуктивності систем зв'язку MIMO. Формула Telatar забезпечує теоретичну основу для аналізу пропускну здатності на основі характеристик каналу та SNR. Розуміння факторів, що впливають на пропускну здатність каналу, допомагає розробляти ефективні системи MIMO, які можуть досягати високих швидкостей передачі даних і надійного зв'язку в реальному середовищі. Хоча ідеальний CSI пропонує найвищу ємність, практичні системи використовують методи, щоб впоратися з недосконалим CSI та досягти майже оптимальної продуктивності. Подальші дослідження вивчають передові технології MIMO та схеми кодування каналів, щоб розширити межі пропускну здатності каналу MIMO та задовольнити постійно зростаючі вимоги бездротових мереж зв'язку.

3.6 Взаємодія між базовими станціями 5G

Мережі 5G використовують складну систему взаємодії між базовими станціями (БС) (gNodeB) для забезпечення безперебійної роботи та оптимального обслуговування користувачів. Ця система ґрунтується на декількох ключових принципах таких як, обмін інформацією, БС 5G постійно обмінюються інформацією одна з одною, використовуючи різні протоколи та канали зв'язку. Ці дані включають статистику трафіку, дані про обсяг даних, що передаються, типів трафіку (голосові дзвінки, текстові повідомлення, потокове відео тощо) та розподіл

користувачів. Стан мережі, інформацію про доступні ресурси, рівень завантаження, якість сигналу та будь-які потенційні проблеми. Інформацію про користувачів, дані про місцезнаходження, швидкість пересування та типи пристроїв, які використовують користувачі.

На основі обміну інформацією БС 5G динамічно регулюють параметри мережі, щоб оптимізувати її роботу це включає:

Регулювання потужності передачі: БС (gNodeB) можуть змінювати потужність своїх сигналів, щоб економити енергію, зменшувати перешкоди та покращувати покриття.

Перенаправлення трафіку: БС (gNodeB) можуть перенаправляти трафік між собою, щоб збалансувати навантаження та забезпечити оптимальну маршрутизацію даних.

Формування променів: БС (gNodeB) використовують складні алгоритми, щоб фокусувати свої сигнали на окремих користувачах, покращуючи якість з'єднання та зменшуючи рівень перешкод.

Мережі 5G здатні до самоорганізації та відновлення після збоїв. Це означає, що БС (gNodeB) можуть автоматично налаштувати себе та співпрацювати без втручання людини. У разі виходу з ладу однієї БС інші БС (gNodeB) в мережі можуть перерозподілити її трафік, щоб забезпечити безперебійну роботу.

БС 5G також зв'язуються з центральним ядром мережі, яке відповідає за загальне керування та координацію. Центральне ядро використовує інформацію, отриману від БС, щоб оптимізувати мережу на ширшому рівні, включаючи планування ресурсів, маршрутизацію та управління якістю обслуговування (QoS).

Взаємодія між БС 5G забезпечує ряд переваг, включаючи підвищену пропускну здатність та швидкість передачі даних, завдяки динамічному регулюванню мережі та оптимальній маршрутизації даних. Зменшення затримок, завдяки ефективному перенаправленню трафіку та формуванню променів. Покращене покриття та якість з'єднання, завдяки самоорганізації та відновленню мережі. Підвищену ефективність та масштабованість, завдяки централізованому

керуванню та плануванню ресурсів. Підтримку нових послуг та застосунків, завдяки гнучкості та адаптивності мережі.

Підсумовуючи, взаємодія між базовими станціями 5G є ключовим фактором, що робить цю технологію такою революційною. Завдяки поєднанню обміну інформацією, динамічного керування мережею, самоорганізації та координації з центральним ядром, мережі 5G можуть забезпечувати безпрецедентні рівні продуктивності, ефективності та гнучкості.

3.7 Потужність передачі та прийому (рівняння Фрііса)

Аналіз передачі та прийому енергії за допомогою рівняння Фрііса

Системи бездротового зв'язку покладаються на ефективну передачу та прийом електромагнітних хвиль для передачі інформації. Розуміння зв'язку між потужністю, що передається, і потужністю, отриманою приймальною антеною, має вирішальне значення для розробки ефективних каналів зв'язку. Рівняння передачі Фрііса є фундаментальним інструментом для аналізу цього співвідношення в умовах розповсюдження у вільному просторі. Основне співвідношення між потужністю передачі та прийому в умовах прямої видимості визначається рівнянням Фрііса: тут P_T – потужність передачі, P_R – потужність прийому, d – відстань між передавачем і приймачем, G_T – коефіцієнт посилення передавальної антени, G_R – коефіцієнт посилення антени приймача, λ – довжина хвилі, при цьому передбачають $d \gg \lambda$.

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (3.3)$$

(3.3) - рівняння Фрііса

Довжина хвилі обернено пропорційна частоті, тобто $\lambda = c/f$, де c – швидкість світла, а f – частота.

Рівняння Фріса виділяє кілька ключових факторів, що впливають на отриману потужність:

1. Передана потужність: як і очікувалося, збільшення переданої потужності (P_t) призводить до пропорційного збільшення отриманої потужності (P_r).
2. Підсилення антени: підсилення (G_t і G_r) передавальної та приймальної антен, відповідно, кількісно визначають їх здатність фокусувати або направляти електромагнітну хвилю. Вищі коефіцієнти посилення антени призводять до більшої прийнятої потужності.
3. Довжина хвилі: рівняння показує обернену квадратичну залежність від довжини хвилі (λ). Це означає, що нижчі частоти (довші довжини хвилі) мають менші втрати на шляху порівняно з вищими частотами (коротші довжини хвилі).
4. Відстань: найважливішим фактором, що впливає на отриману потужність, є відстань (d) між антенами. Рівняння Фріса демонструє обернену квадратичну залежність, що означає, що отримана потужність швидко слабшає зі збільшенням відстані поділу.

Застосування рівняння Фріса

Рівняння Фріса знаходить численні застосування в системі бездротового зв'язку, зокрема:

Аналіз бюджету зв'язку: використовується для розрахунку мінімально необхідної переданої потужності для досягнення бажаного рівня прийнятої потужності на певній відстані, враховуючи посилення антени та втрати системи.

Оцінка зони покриття: знаючи потужність передавання та характеристики антени, рівняння Фріса допомагає оцінити зону покриття лінії зв'язку, де отримана потужність залишається вище певного порогу.

Оцінка підсилення антени: це рівняння можна використовувати для оцінки ефективності різних конструкцій антен шляхом порівняння отриманої потужності з тією самою переданою потужністю та відстанню.

Обмеження рівняння Фріса

Важливо визнати, що рівняння Фрііса базується на кількох припущеннях.

Поширення у вільному просторі: передбачається, що середовище вільне від перешкод і відображень, що може не відповідати реальним сценаріям.

Умова дальнього поля: відстань між антенами вважається значно більшою за розміри антени.

Лінійно поляризовані хвилі: рівняння застосовується до лінійно поляризованих електромагнітних хвиль.

У практичних застосуваннях ці обмеження вимагають використання додаткових моделей розповсюдження, які враховують такі реальні ефекти, як багатопроменевість розповсюдження, атмосферне затухання та умови ближнього поля.

Рівняння Фрііса забезпечує основу для аналізу передачі та прийому енергії в системах бездротового зв'язку. Він підкреслює залежність отриманої потужності від переданої потужності, підсилення антени, довжини хвилі та відстані поділу. Хоча воно має обмеження в сценаріях реального світу, рівняння Фрііса служить цінним інструментом для початкового проектування системи та оцінки продуктивності. Це відкриває шлях для подальшого дослідження з використанням більш складних моделей розповсюдження для точного аналізу бездротових каналів зв'язку.

3.8 Обґрунтування вибору середовища моделювання

MATLAB - пакет прикладних програм для цифрового аналізу, а також мова програмування, що використовується в даному пакеті. Система створена компанією MathWorks - це зручний засіб для роботи з математичними матрицями, зображення функцій, робота з алгоритмами, створення робочих оболонок (користувальницьких інтерфейсів) з програмами в інших програмах мовах. Хоча цей продукт спеціалізується на чисельних виданнях, спеціальні інструментальні засоби працюють із програмним забезпеченням Maple, що робить його повноцінною системою для роботи з алгеброю[12].

3.9 Використання рівнянь Фрііса в матлаб

```

1  %% Модель поширення у вільному просторі
2  % рівняння простору Фрііса, дБм, дБВт
3
4  fc = 34*10^8; % Несуча частота [Гц]
5  lambda = 3*10^8/fc; % Довжина хвилі [м]
6
7  Pt = 50; % Потужність передавача [Вт]
8  Gt = 1; % посилення передавача (одичне посилення)
9  Gr = 1; % підсилення приймача (одичне підсилення)
10 L = 1; % системних втрат (без втрат)
11 d0 = 100; % Відстань наближення [м]
12 d = 100:10^3; % Робоча відстань до 1 кілометра [м]
13 % Використовуючи рівняння Фрііса, ми можемо знайти P, отримане на близькій відстані d0, і використовувати його як
14 % посилення для будь-якого d > d0
15
16
17 Pr_d0 = Pt*Gt*Gr*lambda^2/(16*pi^2*d0^2*L); % Рівняння простору Фрііса для отриманої потужності на близькій (еталонній) відста
18 Pr_d0_dBm = 10*log10(Pr_d0/0.001); % Отримана потужність наближення в дБм
19 Pr_d0_dBW = 10*log10(Pr_d0); % наближеної отриманої потужності в дБВт
20 Pr_d = Pt*Gt*Gr*lambda^2./(d.^2*16*pi^2*L); % Рівняння простору Фрііса для отриманої потужності зведовж робочої відстані [Вт]
21 Pr_d_dBm = Pr_d0_dBm+20*log10(d0./d); % Отримана потужність, розрахована з використанням еталонної потужності в дБм
22 Pr_d_dBW = Pr_d0_dBW+20*log10(d0./d); % Отримана потужність, розрахована з використанням еталонної потужності в дБВт
23
24 PL = -10*log(Gr*Gt*lambda^2./(16*pi^2*d.^2)); % втрати шляху
25

```

Рисунок 3.3

Перетворені рівняння Фрііса в код матлаб для обчислення потужності сигналу в залежності від відстані між базовими станціями(gNodeB).

Для обчислення потужності сигналу в залежності від відстані між базовими станціями (gNodeB) було використано матлаб, рівняння Фрііса переведено в код[13], який зображений на рисунку 3.3. У бездротовому зв'язку модель розповсюдження у вільному просторі використовується для розрахунку отриманої потужності, якщо між передавачем і приймачем є безперешкодна лінія прямої видимості. Ця модель життєздатна, доки відстань передавача та приймача перевищує відстань у дальньому полі (Фраунгофера). Цей код використовував рівняння вільного простору Фрііса для обчислення отриманої потужності на деякій відстані у Ватах, а також для визначення отриманої потужності на близькій відстані, щоб потім використовувати його як еталон і обчислити отриману потужність у дБм і дБВт. Інший спосіб вираження затухання потужності - обчислення втрати на шляху. Змінними, необхідними для рівнянь Фрііса, є потужність передавача, посилення антени передавача та приймача, несуча частота або довжина хвилі, втрати в системі, відстань TR та близька відстань для дБм і

дБВт. Потім отримана потужність і втрати на шляху були побудовані як функція відстані.

Значення несучої частоти змінювались на 700МГц та 3,4ГГц, дозволені в Україні діапазони для мереж 5G, а також 24ГГц міліметровий діапазон. Інші данні мали значення: $\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f_c}$; Довжина хвилі [м], $P_t = 50$; Потужність передавача [Вт], $G_t = 1$; посилення передавача (одиничне посилення), $G_r = 1$; підсилення приймача (одиничне підсилення), $L = 1$; системних втрат (без втрат), $d_0 = 100$; Відстань наближення [м], $d = 100:10^3$; Робоча відстань до 1 кілометра [м].

Рисунок 3.4.а,в,г. Отримана потужність [дБм] від відстані [м], а) 700МГц, в) 3,4ГГц, г)24ГГц. На всіх графіках вісь X відповідає відстані в метрах, а вісь Y - отриманій потужності в децибелах на міліват (дБм).

Графік 3.4а (700 МГц) показує, що отримана потужність зменшується з відстанню. Зменшення потужності більш різке на більших відстанях. Наприклад, на відстані 100 метрів отримана потужність становить -22,3 дБм, 500м -36,3 дБм а на відстані 900 метрів - близько -41,4 дБм.

Графік 3.4в (3,4 ГГц) показує аналогічну залежність, але зменшення потужності більш різко. Наприклад, на відстані 100 метрів отримана потужність становить близько -36 дБм, 500м -50 дБм, а на відстані 900 метрів - близько -55 дБм.

Графік 3.4г (24 ГГц) показує, що отримана потужність зменшується з відстанню ще більш різко. Наприклад, на відстані 100 метрів отримана потужність становить близько -53 дБм, 500м -67 дБм, а на відстані 900 метрів - близько -72 дБм.

Графіки 3.4б, 3.4г, 3.4д показують залежність втрати на шляху (Path loss) від відстані для трьох різних частот: 700 МГц, 3,4 ГГц та 24 ГГц. На всіх графіках вісь X відповідає відстані в метрах, а вісь Y - втраті на шляху в децибелах (дБ).

Графіки показують, що отримана потужність і втрата на шляху залежать від частоти сигналу та відстані між передавачем і приймачем. Зі збільшенням частоти сигналу отримана потужність зменшується, а втрати на шляху зростають.

Це пов'язано з тим, що на більш високих частотах електромагнітні хвилі мають меншу довжину хвилі, що робить їх більш схильними до розсіювання та поглинання перешкодами.

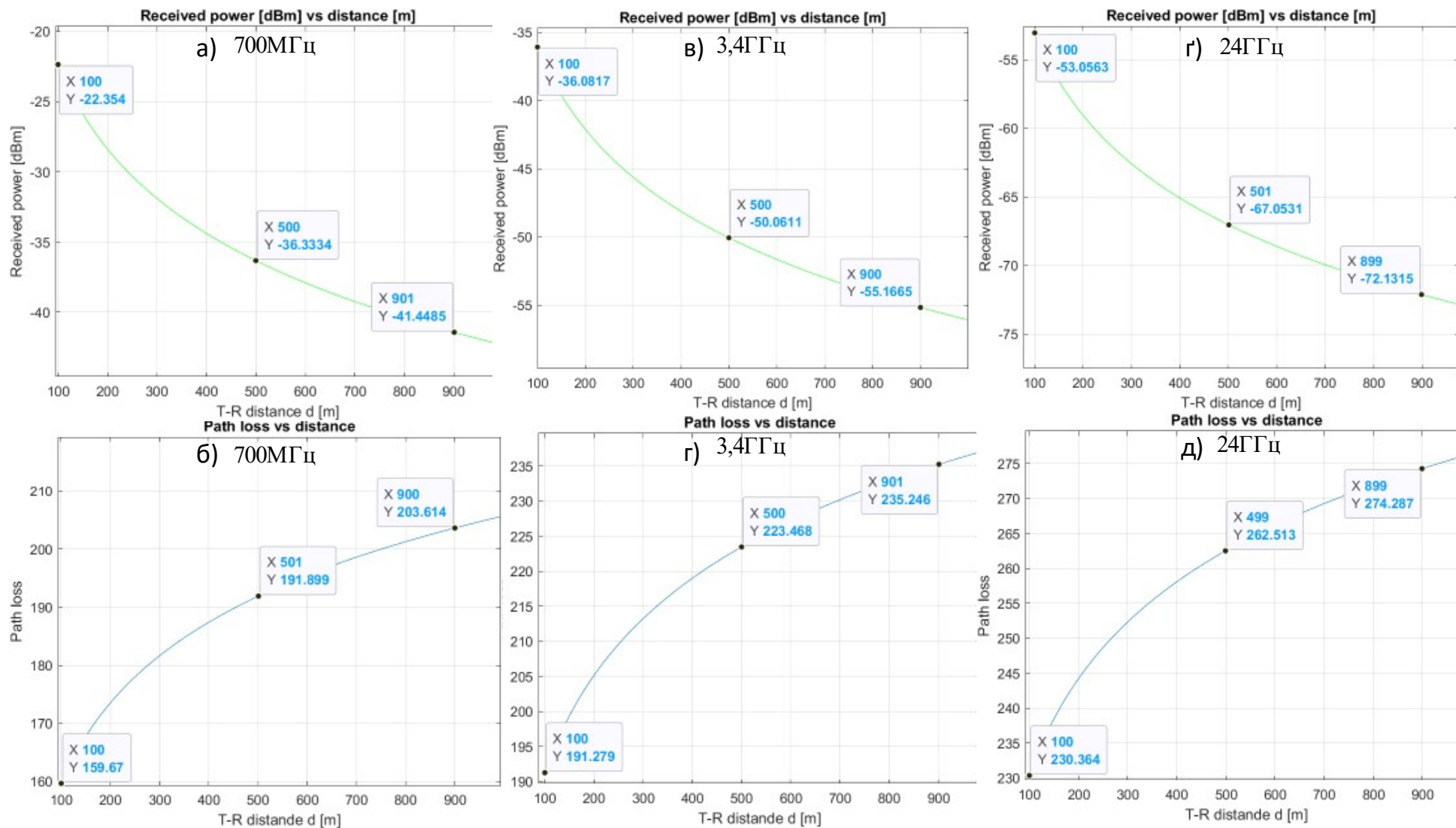


Рисунок 3.4. Отримана потужність від відстані [м], а) 700МГц, в) 3,4ГГц, г)24ГГц. Втрата на шляху проти відстані, б) 700МГц, г) 3,4ГГц, д)24ГГц

Розділ 4. ВИСНОВКИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Підсумовуючи дану роботу слід сказати, що з використанням більшого частотного діапазону мобільні мережі зробили значний крок вперед, завдяки цьому збільшилась смуга пропускання, що призвело до підвищення швидкості передачі даних, в порівнянні з 4G, у 20 разів. Але вищий частотний діапазон поставив перед інженерами та науковцями ще більше викликів, такі як, втрата потужності сигналу та втрати на шляху.

Виходячи з нашого дослідження можна зробити певний висновок і дати рекомендації, щодо налаштування частотних діапазонів на базовій станції (gNodeB), тим паче, що в 5G базова станція може одночасно використовувати FR1 та FR2 діапазони частот. Отже, для передачі даних на далеку відстань, наприклад від однієї базової станції (gNodeB) до іншої, слід використовувати як можна меншу несучу частоту. Бо, виходячи з рисунку 3.4, чим менше значення несучої частоти, тим менші значення втрати сигналу зі збільшенням відстані. Але у випадку, якщо базова станція (gNodeB) передає дані користувачу, який знаходиться на близькій відстані, можна використовувати вищі значення несучої частоти, що в свою чергу збільшить швидкість передачі даних.

Основна перевага 5 покоління зв'язку, це збільшена пропускна здатність самої базової станції (gNodeB). В майбутньому в нас з'являтиметься все більше і більше нових пристроїв, які будуть використовувати мобільну мережу для передачі даних, наприклад вже зараз на вулицях можна побачити велику кількість пристроїв IoT, такі як: розумні світлофори, освітлення вулиць, системи моніторингу стану навколишнього середовища, все це створює тиск на мережу. Але розуміючи взаємодію між діапазонами частот і пропускною здатністю, мережеві інженери можуть оптимізувати розгортання 5G, щоб задовольнити різноманітні потреби користувачів. Цей стратегічний розподіл гарантує, що 5G реалізує свій потенціал як потужна та універсальна технологія мобільного зв'язку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- [1] Dangi R, Lalwani P, Choudhary G, You I, Pau G. Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. *Sensors*. 2022; 22(1):26. <https://doi.org/10.3390/s22010026>
- [2] Sidhartha Sankar Sahoo, Malaya Kumar Hota and Kalyan Kumar Barik. 5G Network a New Look into the Future: Beyond all Generation Networks. *American Journal of Systems and Software*. 2014; 2(4):108-112. doi: 10.12691/ajss-2-4-5
- [3] The 5G economy: How 5G technology will contribute to the global economy Karen Campbell, Senior Consultant, IHS Economics Jim Diffley, Vice President, IHS Economics Bob Flanagan, Director, IHS Economics Bill Morelli, Research Director, IHS Technology Brendan O’Neil, Managing Director, IHS Economics Francis Sideco, Vice President, IHS Technology <https://cdn.ihs.com/www/pdf/IHS-Technology-5G-Economic-Impact-Study.pdf>
- [4] Sudhamani C, Roslee M, Tiang JJ, Rehman AU. A Survey on 5G Coverage Improvement Techniques: Issues and Future Challenges. *Sensors*. 2023; 23(4):2356. <https://doi.org/10.3390/s23042356>
- [5] Saad WK, Shayea I, Hamza BJ, Mohamad H, Daradkeh YI, Jabbar WA. Handover Parameters Optimisation Techniques in 5G Networks. *Sensors*. 2021; 21(15):5202. <https://doi.org/10.3390/s21155202>
- [6] OFDM Inspired Waveforms for 5G. Behrouz Farhang-Boroujeny, Hussein Moradi. May 2016
- [7] Kakarash, Z. A., & Mardukhi, F. (2020). A Review of Properties and Functions of Narrow Band Internet of Things and its Security Requirements. *UHD Journal of Science and Technology*, 4(1), 71–80. <https://doi.org/10.21928/uhdjst.v4n1y2020.pp71-80>
- [8] <https://5g-tools.com/5g-nr-throughput-calculator/>
- [9] Van Chien, T., Björnson, E. (2017). Massive MIMO Communications. In: Xiang, W., Zheng, K., Shen, X. (eds) *5G Mobile Communications*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_4
- [10] <https://news.samsung.com/global/samsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper>

[11] Suzuki, T., Matsuo, K. & Amano, Y. Rotating GNSS Antennas: Simultaneous LOS and NLOS Multipath Mitigation. *GPS Solut* 24, 86 (2020).

<https://doi.org/10.1007/s10291-020-01006-w>

[12] MATLAB [Электронный ресурс] Режим доступа:

<https://uk.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

[13] Received power in free space propagation model. Version 1.0.0 (457 KB) by Georgiy Pankov