

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

Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри

_____ Явіся В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

За освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.

на тему: Модель каналу LTE для оцінки параметрів мережі 4G.

Виконав : студент II курсу, групи ТМ-81мп
(шифр групи)

_____ Котик Богдан Петрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент ,к.т.н., доцент Явіся В.С. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 рік

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

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Котику Богдану Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Модель каналу LTE для оцінки параметрів мережі 4G.

науковий керівник дисертації Явіся Валерій Сергійович, к.т.н, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «_07_» «_11_» 2019р. № _3840-с_

2. Строк подання студентом дисертації 7.12.2019 _____

3. Об'єкт дослідження модель каналу LTE

4. Предмет дослідження процес моделювання каналу

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- аналіз загальних відомостей про мережі четвертого покоління ;
- вибір середовища моделювання;
- створення моделі каналу LTE
- отримання результатів та порівняння з реальними результатами

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

- 1) Тема, мета та завдання магістерської дисертації
- 2) Загальні відомості про мережу LTE;
- 3) Архітектура мережі LTE;
- 4) Схема моделі каналу LTE
- 5) Результати моделювання
- 6) Реальні результати
- 7) Висновки

7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 20.09.2018

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка, оформлення, узгодження та затвердження технічного завдання на дипломну роботу	20.09.2018	Виконано
2	Опрацювання літературних джерел з теми досліджень	26.12.2018	Виконано
3	Аналіз вимог завдання, вибір методів і засобів розв'язання поставленої задачі	18.01.2019	Виконано
4	Дослідження відомостей про мережу LTE, архітектура, особливості роботи	27.03.2019	Виконано
5	Вибір середовища моделювання	18.06.2019	Виконано
6	Розробка моделі каналу LTE	20.09.2019	Виконано
7	Збір та порівняння реальних показників з модельованими	20.11.2019	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	07.12.2019	Виконано

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Робота містить 103 сторінки, 37 рисунків, 3 таблиці. Було використано 126 джерел інформації.

Актуальність. В наш час в Україні стрімко розвиваються мережі стільникового зв'язку четвертого покоління. Все частіше користувачі надають перевагу стільниковому зв'язку 4g замість Wi-Fi через високу швидкість прийому та передачі інформації. Операторам необхідно забезпечувати заявлені виробниками параметри передачі. Для цього спочатку необхідно змоделювати передачу даних, щоб зрозуміти які вихідні параметри зможуть забезпечити необхідну якість передачі.

Метою даної роботи є розробка моделі каналу LTE для оцінки параметрів мережі 4G

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- дослідження особливостей мережі LTE;
- вибір середовища моделювання;
- створення моделі каналу LTE;
- моделювання вихідних параметрів каналу LTE;
- порівняння модельованих та реальних результатів.

Об'єкт дослідження – модель каналу LTE.

Предмет дослідження – процес моделювання каналу

Ключові слова: стільниковий зв'язок, LTE, Matlab, Simulink ,DLSCN

ABSTRACT

The work contains 103 pages, 38 illustrations, 27 tables, 11 sources of information were used.

Topicality. Nowadays, the fourth generation of cellular communication networks are developing rapidly in Ukraine. Increasingly, users are opting for 4g cellular telephony over Wi-Fi because of the high speed of receiving and transmitting information. Operators must provide the transmission parameters stated by the manufacturers. To do this, you first need to simulate the data transmission to understand what output parameters will be able to provide the required transmission quality.

To achieve this goal, the following tasks are solved in the work:

- study of LTE network features;
- choice of modeling environment;
- creation of LTE channel model;
- simulation of the output parameters of the LTE channel;
- comparison of simulated and real results.

The **object** of study is the LTE channel model.

The **subject** of the study is the process of modeling of channel

Keywords: cellular, LTE, Matlab, Simulink, DLSCH

Зміст

Вступ.....	9
1. Характеристика мобільних мереж четвертого покоління.....	10
1.1. Аналіз особливостей побудови мереж LTE	10
1.2. Структура призначеного для користувача рівня мережі LTE	14
1.3. Аналіз основних зовнішніх факторів, що впливають на продуктивність в мережах LTE	19
1.4. Основні види атак на елементи мереж зв'язку стандарту LTE.....	21
1.5. Аналіз механізмів управління забезпеченням захисту інформації в мережах LTE	23
1.6. Аналіз способів динамічного управління потоками в мережах LTE	24
1.7 Підтримка багатоантенних систем MIMO.....	25
1.8 Послуги в мережах LTE.....	33
1.9 Частотний план роботи мереж LTE	36
Висновок до розділу 1.....	38
2. Вибір середовища моделювання.....	39
2.1. Вибір системи імітаційного моделювання	39
2.2. Matlab Simulink.....	43
Висновки до розділу 2	51
3. Моделювання та оцінка результатів.....	52
3.1. Створення моделі	52
3.2 Параметри для оцінки моделювання.....	84
Висновки до розділу 3	89
Висновок.....	90
Список використаної літератури	91

Список скорочень

РБ - ресурсний блок

ФМ - фазова модуляція

ARQ - Automatic Repeat Reques

CFI - Control Frame Indicator

CQI - Channel Quality Indicator

DA - Data-Aided

DL - downlink

DM-RS - Demodulation Reference Signals

DwPTS - Downlink Pilot Time Slot

FDD - Frequency Division Duplex

FFT - Fast Fourier Transform

GP - Guard Period

HARQ - Hybrid Automatic Repeat Reques

HARQ ACK/NACK - Hybrid Automatic Repeat Reques Acknowledgements

IFFT - Inverse Fast Fourier Transform

LTE - Long Term Evolution

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PBCH - Physical Broadcast Channel

PCFICH - Physical Control Format Indicator Channel

PDCCH - Physical Downlink Control Channel

PDSCH - Physical Downlink Shared Channel

PHICH - Physical Hybrid Automatic Repeat Reques Indicator Channel

PMCH - Physical Multicast Channel

PRACH - Physical Random Access Channel

PSS - Primary Synchronization Signal

PUCCH - Physical Uplink Control Channel

PUSCH - Physical Uplink Shared Channel

QAM - Quadrature Amplitude Modulation

QPSK - Quadrature Phase Shift Keying

SC-OFDM - Single-Carrier Orthogonal Frequency Division Multiplexing

SIB - System Information Blocks

SNR - signal-to-noise ratio

SRS - Sounding Reference Signal

SSS - Secondary Synchronization Signal

TDD - Time Division Duplex

UL - uplink

UpPTS - Uplink Pilot Time Slot

WCDMA - Wideband Code Division Multiple Access

Вступ

Мережі мобільного зв'язку в Україні пройшли модернізацію для збільшення пропускної можливості . 2018 рік запам'ятався українцям впровадженням нового стандарту мобільного зв'язку - LTE або 4G. Три основні оператори мобільного зв'язку - "Київстар", Vodafone Україна і lifecell - виграли тендери на частотні діапазони 1800 та 2600 МГц, отримавши можливість будувати мережі 4g. Разом з цим виникла можливість передачі трафіку з набагато більшою швидкістю, ніж в мережах минулих поколінь. Проте на практиці виявилось, що швидкість передачі та прийому подекуди залишається на тому ж самому рівні, що і в мережах 3G.

Актуальність даної роботи якраз і полягає в тому, щоб перевірити за допомогою моделі каналу LTE чи може бути досягнена заявлена виробниками швидкість і параметри, та які можуть бути причини малої швидкості передачі в мережах 4G. Це може допомогти операторам краще проінформувати користувачів про можливі причини незадовільної якості зв'язку.

1. Характеристика мобільних мереж четвертого покоління

1.1. Аналіз особливостей побудови мереж LTE

В даний час найбільш популярною технологією, що реалізує сучасну концепцію управління територіально розосередженими об'єктами, є технологія LTE [115, 122]. Високий ступінь керованості в рамках даної технології досягається застосуванням нової мережевої інфраструктури [18]SAE, в якій забезпечується всебічна підтримка послуг на базі технології IP, а також безперервне обслуговування абонента при його переміщенні між різними мережами бездротового доступу [16, 45, 78, 84, 121].

Мережа LTE складається з двох найважливіших компонентів: мережі радіодоступу E-UTRAN та базової мережі EPC (рисунок 1.1).

Перед технологією LTE висувають вимоги до сумісності: абонентський термінал, маючи відповідну апаратну і програмну підтримку, може бесшовно переходити з мережі LTE як в UMTS, так і в CDMA2000, WiMAX, і навіть в старі мережі GSM або IS-95. [3]

При розробці архітектури мережі LTE були прийняті до уваги наступні загальні принципи:

- логічно розділені транспортні підмережі передачі призначених для користувача даних і службової інформації;
- мережа радіодоступу і базова пакетна мережа повністю звільнені від транспортних функцій схеми адресації, використовувани в цих мережах, не повинні бути пов'язані зі схемами адресації, що використовуються при реалізації транспортних функцій;
- управління мобільністю абонентів і призначених для користувача терміналів повністю покладено на мережу радіодоступу;
- функціональний розподіл інтерфейсів мережі радіодоступу

повинен мати кілька можливих опцій;

- інтерфейси повинні базуватися на логічній моделі блоку, керованого даним інтерфейсом;

- один фізичний елемент мережі може реалізаційно містити в собі кілька логічних блоків. [4]

Взаємодія мережі LTE з мережами 3GPP (UMTS / GSM / HSPA +) [16, 21, 29, 45, 78, 80, 84, 115, 121] здійснюється як при забезпеченні роумінгу, так і хендоверу. Взаємодія мережі LTE з іншими 3GPP мережами, для надання традиційних послуг телефонії, здійснюється за допомогою як традиційної технології комутації каналів (TDM), так і технології комутації пакетів на базі сервісної підсистеми IMS[6].

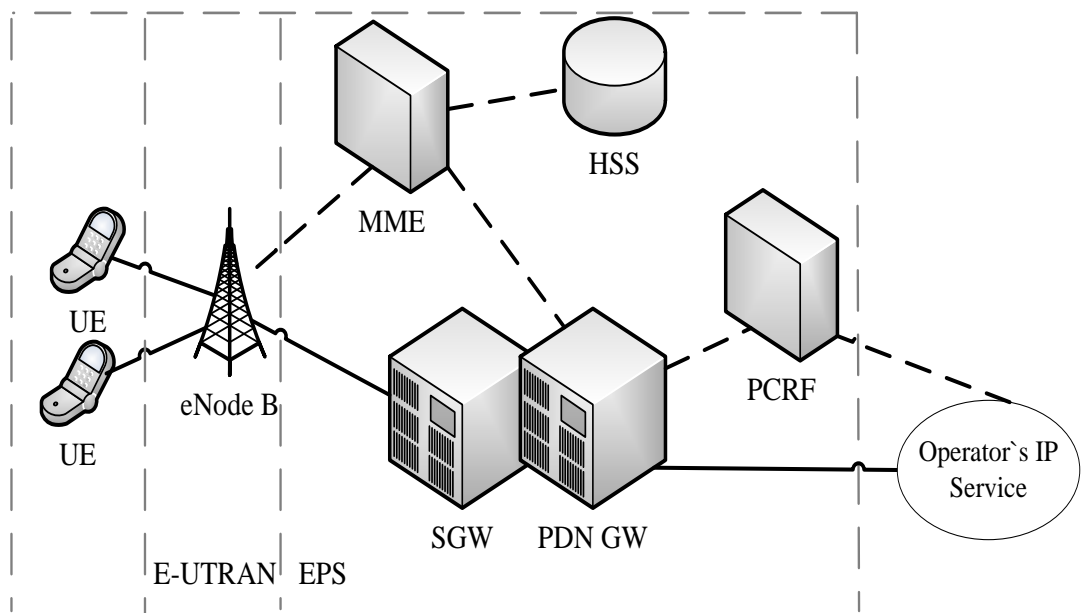


Рисунок 1.1. Архітектура мережі LTE

До цієї мережі входять елементи, що відповідають за управління, маршрутизацію, комутацію і зберігання різних даних.

Радіочастина мережі (E-UTRAN) складається тільки з базових станцій eNodeB які беруть на себе функції радіоінтерфейсу і є сполучною

ланкою між призначеним для користувача обладнанням і мережею передачі даних, на відміну, наприклад, від стандарту GSM [3,7, 34, 42], де підсистема базових станцій BSS складалася з базового приймача BTS і контролера базових станцій BSC, тобто в мережі LTE в одному елементі eNodeB об'єднані функції передавача і контролера. Крім цього, все більше виробників обладнання об'єднують функції опорної мережі в єдину платформу, що створює додаткові проблеми з точки зору інформаційної безпеки [121].

Основними елементами базової мережі EPC [122] є:

- вузол управління мобільністю -MME, який виконує завдання з управління мобільністю абонентського терміналу, управління службою передачі даних, а також управління безпекою мобільного зв'язку. Для управління безпекою в вузол MME інтегровано мережеве сховище даних NAS Security;
- обслуговуючий шлюз мережі LTE -S-GW, який відповідає за обробку та маршрутизацію пакетів, що надходять з підсистеми базових станцій eNodeB;
- шлюз для взаємодії з мережами інших операторів - P-GW, він відповідає за передачу голосу і даних від мережі оператора LTE до інших мереж 2G, 3G, не-3GPP і Internet;
- сервер абонентських даних HSS, де зберігається інформація про абонентів;
- вузол виставлення рахунків абонентам за надані послуги PCRF;
- сервер виділення IP-адрес DHCP / DNS.

Основною перевагою архітектури мереж LTE, в порівнянні з архітектурою мереж попередніх поколінь є зниження затримки при передачі як призначених для користувача даних, так і керуючої інформації, в зв'язку з проходженням через менше число проміжних елементів [121].

Обмін даними тут здійснюється за допомогою комутації пакетів по протоколу IP, що є істотною відмінністю мережі LTE від мереж попередніх поколінь.

В даний час поряд з мобільними мережами другого, третього і четвертого поколінь широкого поширення набули високошвидкісні локальні мережі стандарту Wi-Fi [17], що розгортаються в загальнодоступних системах торгівлі, системах громадського харчування та громадського транспорту і т.д. При цьому з'явилися спільні базові станції, призначені як для роботи в мережах Wi-Fi, так і в мережах стільникового зв'язку. Все це дозволяє обслуговувати абонентів із застосуванням різних варіантів доступу.

У зв'язку з цим в архітектурі SAE передбачені механізми вибору найбільш зручною мережі передачі даних для надання абоненту необхідних послуг. При цьому всі сучасні мобільні термінали вибирають, при наявності декількох мереж, передачу трафіку на дозволеній користувачем мережі Wi-Fi[77], що зазвичай супроводжується перемиканням з однієї технології на іншу і відповідно передачею даних про користувача між мережами.

Проключення з'єднання між мережею LTE і іншою мережею стандарту 3GPP[18] при встановленні голосового виклику відбувається за допомогою взаємодії логічного елемента MME з сервером MSC по інтерфейсу Sv у разі викликів з мережі LTE в мережу комутації каналів (CS-домен); і за допомогою взаємодії логічного елемента MME з вузлом SGSN по інтерфейсу S3 в разі голосового виклику з мережі LTE в мережу комутації пакетів (PS-домен).

Взаємодія мережі LTE з не-3GPP поділяється на взаємодію з мережами з гарантованою безпекою - «надійними» і з мережами, безпека яких не гарантована - «ненадійними». «Надійними» є мобільні мережі інших стандартів, «ненадійними» - загальнодоступні IP-мережі Інтернету.

Взаємодія мережі LTE з «надійними» мережами стандартів не-3GPP здійснюється через шлюз P-GW, Взаємодія з «ненадійними» мережами - через шлюз ePDG.

Ускладнення характеру трафіку[57], зокрема зниження мовного навантаження в порівнянні з обсягом мультимедійних повідомлень при організації різних видів мобільного доступу призводить до того, що безпека передачі інформації, може бути забезпечена тільки при використанні ефективних методів підвищення пропускної здатності, так як саме при бездротовому доступі можуть виникати різкі перекоси навантаження через стохастичного переміщення абонентів по зонам мобільної мережі, при цьому всі протоколи і схеми взаємодії є відкритими, а передача даних здійснюється на базі протоколу IP.

Розглянемо структуру користувальницького рівня мережі LTE.

1.2. Структура призначеного для користувача рівня мережі LTE

Розглянемо структурну схему мережі LTE[78, 121] (Рисунок 1.2) на рівні користувача. Сигнали від абонентів надходять на базові станції eNodeB. Базова станція перевіряє справжність абонента, але перед цим для устаткування користувача UE перевіряється справжність мережі по надісланим мережею повідомленням (talking). Між базовими станціями для обмеження навантаження через вузли обробкою сигналізації в вузлі управління мобільністю MME передбачений інтерфейс X2, через який між вузлами eNodeB проключаються абоненти високої мобільності. Це особливо важливо при хендоверах[7]. Можливість безпосередньої бездротової передачі даних між eNodeB фактично означає, що в архітектурі SAE закладена функціональність mesh-мережі [67, 84]. Нова архітектура дозволяє при необхідності велику кількість заявок направляти не в основну мережу, а в межі суміжних сот, що мінімізує взаємодію з основною мережею.

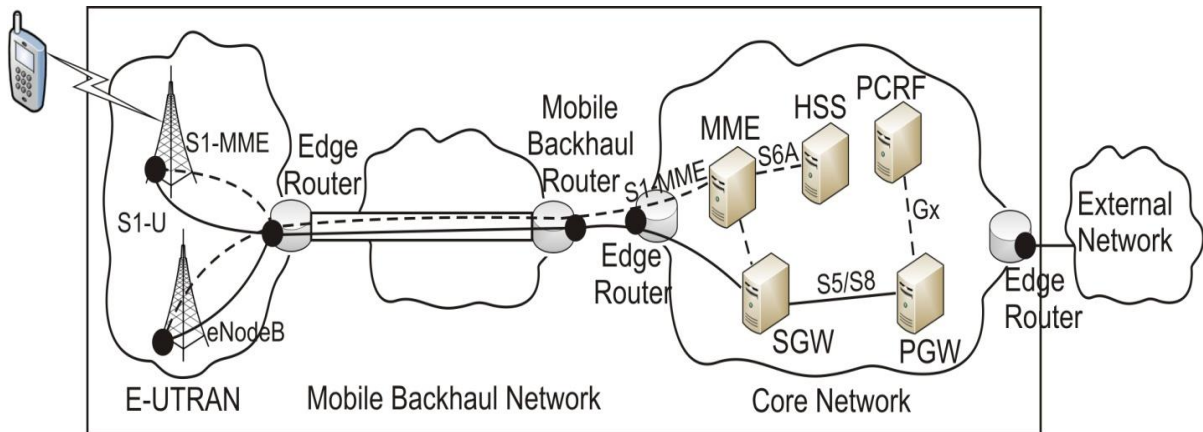


Рисунок 1.2. Архітектура системи LTE з інфраструктурою SAE

Вузол управління мобільністю MME займається обробкою службової інформації: аутентифікацією, пошуком обслуговуючого шлюзу (S-GW) сигналізацією. Сигнальне навантаження в мережах LTE не обмежене[121]. Нагадаємо, що в мережах LTE для абонентів встановлено такі швидкості передачі: для статичних, або малої мобільності - 1 Гбіт / с і для рухомих в транспортному засобі - 100 Мбіт / с. Відомо, що в реальних мережах в даний час через інтерфейс S1-MME проходить 3.5% хендовера від об'єктів високої мобільності[29]. Модуль MME забезпечує зберігання службової інформації про абонента, авторизацію термінальних пристроїв в наземних мережах мобільного зв'язку і загальне управління мобільністю абонентів.

Обслуговуючий шлюз S-GW виконує функції обробки інформаційного трафіку, забезпечує прив'язку призначеного для користувача устаткування до опорної мережі при хендовері. Крім того, шлюз S-GW веде білінгові записи про те, скільки абонент скачав трафіку і з яких серверів. Також шлюз S-GW здійснює маркування трафіку (висхідного (UL) і низхідного (DL)) в транспортній мережі відповідно до рівня якості QoS. Маркування займає 6 біт, при цьому 0 означає найгіршу якість.

Пакетний шлюз P-GW забезпечує з'єднання від устаткування користувача UE до зовнішніх пакетних мереж передачі даних[6], будучи

точкою входу і виходу трафіку, при цьому для користувача устаткування UE може одночасно з'єднуватися з декількома шлюзами P-GW для одночасного підключення до декількох мереж. Шлюз P-GW виконує також функції захисту, фільтрації пакетів для кожного користувача, підтримку білінгу, узаконеного перехоплення і сортування пакетів. Інша важлива роль шлюзу P-GW-управління мобільністю між 3GPP і не-3GPP технологіями, такими як WiMAX і 3GPP2 (CDMA 1X і EvDO)[65].

Сервер абонентських даних HSS є великою базою даних. Він зберігає дані про абонентів та замінює набір реєстрів VLR, HLR, AUC і EIR в мережах 2 і 3 поколінь [7, 78]. У сервері HSS здійснюється аутентифікація та реєстрація абонентів, завантаження профілю абонента в MME, забезпечуються роумінгові обмеження і обмеження сервісів за типами мереж доступу (в даний час деякі сервіси доступні тільки в мережах LTE). При цьому сервер HSS підключається до ядра пакетної мережі по інтерфейсу протоколу Diameter, а не на базі системи сигналізації SS7 [60], яка використовувалася в мережах GSM і UMTS. Сигналізація для забезпечення COPM також заснована на протоколі Diameter.

Вузол управління нарахуванням плати PCRF виконує функції: контролю за наданням послуги (gatingcontrol - початок надання послуги, зміна її параметрів, завершення надання послуги і т.п.) і контролю якості, при якому здійснюється безперервний моніторинг якості, а також підтримання заданих характеристик (QoS) , причому не тільки для голосових з'єднань, але і для пакетних сервісів.

В даний час поряд з мобільними мережами широкого поширення набули високошвидкісні локальні мережі стандарту Wi-Fi[16, 73, 121], що розгортаються в загальнодоступних системах торгівлі, громадського харчування, транспорту (кафе, аеропорти, магазини) і т.д. Розробляються базові станції, що дозволяють обслуговувати абонентів із застосуванням

різних варіантів доступу як для роботи в мережах Wi-Fi, так і в мережах стільникового зв'язку. У зв'язку з цим, в архітектурі призначеного для користувача рівня SAE передбачені механізми вибору найбільш зручної інфраструктури надання послуги, необхідної абоненту. Таким чином, створюється нова мережа радіодоступу, що значно збільшує швидкість передачі даних і зменшує час встановлення з'єднань. Наявність загального ядра в мережі дозволяє підтримувати мобільні послуги не тільки технологією LTE, але також і іншими радіотехнологіями (Wi-Fi, WIMAX, CDMA2000 і ін.)[64, 65, 78, 117]завдяки інтегрованості різних інтерфейсів передачі даних, див. рисунок 1.3.

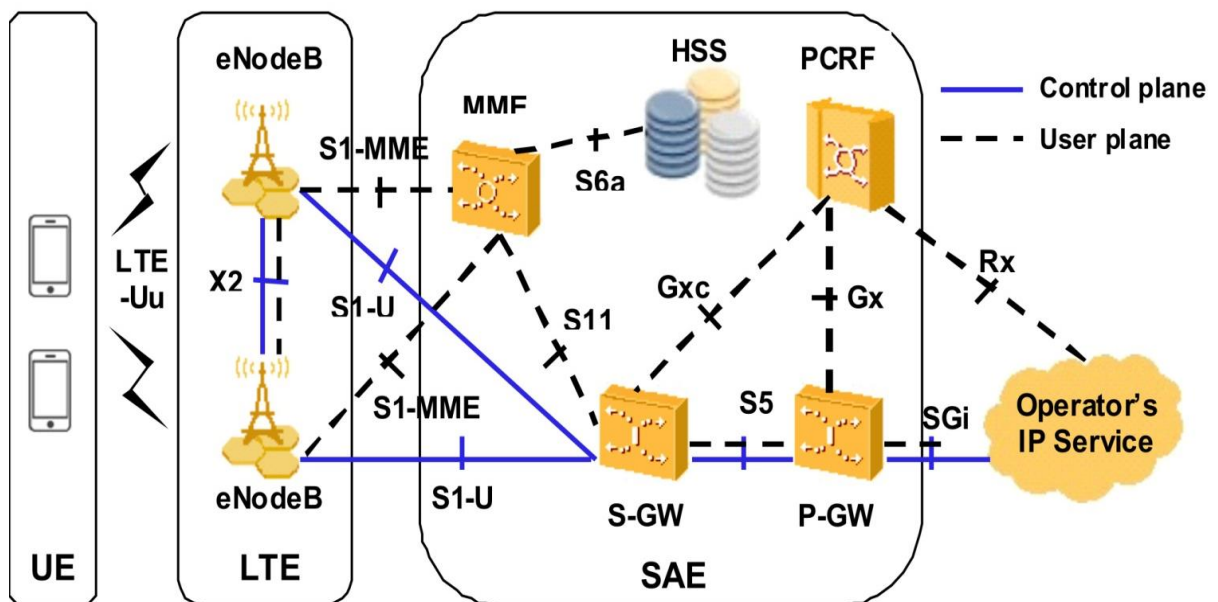


Рисунок 1.3. Мережева інфраструктура технології LTE

Для додатків реального часу, передбачається on-line тарифікація, при якій абонент і оператор можуть відстежувати стан рахунку в реальному масштабі часу. Технологія дозволяє застосовувати кілька моделей нарахування плати, зокрема: за наданим обсягом послуг, по витраченому на послугу часу, за фактом надання послуги, також є комбіновані моделі. Вузол PCRF виконує всі зазначені функції і в разі, коли абонент знаходиться за межами зони операторської мережі.

При знаходженні абонента в мережі одного оператора IP-адреса користувацького обладнання змінюватися не повинна, таким чином, базова станція eNodeB завжди «знає» всі IP адреси даної мережі, отже, може посилати тегований [56]трафік.

В даний час в рамках однієї зони оператора в межах великого міста знаходиться два ММЕ і приблизно 7000 базових станцій eNodeB, але максимально в один ММЕ може включатися до 30000 портів eNodeB. До однієї базової станції eNodeB одночасно можуть бути підключені до 800 абонентів. Передача речі і даних в мережах LTE може здійснюватися з різними ступенями стискання. Передбачена функція адаптації модуляції кодування і швидкості (Link adaptation), яка може змінювати тип кодека стиснення мови[13]в режимі реального часу, в залежності від умов роботи каналу. Тип кодека для передачі мови, залежить від умов на радіо мережі. При невиконанні мінімальних умов якості радіоканалу, відбувається розрив з'єднання.

У мережах LTE на базових станціях eNodeB використовується модифікований алгоритм управління потужністю передавачів обладнання користувача, який враховує положення абонента всередині соти: чим ближче користувач до eNodeB, тим вище відношення сигнал / шум використовується для регулювання потужності. Таким чином, поблизу eNodeB обладнання користувача працює з більш високим співвідношенням сигнал / шум, а значить і з більш високою швидкістю кодування і кратністю модуляції, що збільшує швидкість передачі.

У мережах LTE використовується адаптивний розподіл смуги передачі, який забезпечує гнучкий і безнадлишковий розподіл ресурсних блоків відповідно до заданої якості наданої послуги (QoS) [123]. Алгоритм адаптивного розподілу смуги передачі виділяє користувачам на краю стільниці меншу кількість ресурсних блоків відповідно до спектральної

щільністю потужності сигналу. Точність оцінки спектральної щільності впливає на оптимальність виділення користувачеві необхідного ресурсу.

У мережах LTE-Advanced абонентське обладнання UE може для передачі даних зв'язуватися відразу з двома станціями eNodeB, що дозволяє знизити відношення сигнал / шум.

Для визначення найбільш прийнятних способів передачі даних користувача на фрагменті мережі LTE, проведемо аналіз існуючих методів підвищення пропускної здатності інформаційних мереж.

1.3. Аналіз основних зовнішніх факторів, що впливають на продуктивність в мережах LTE

Одним із зовнішніх факторів, що впливають на продуктивність мережі, є загрози безпеки[65, 121]. Акценти загроз технології LTE змістилися, тепер всі вони пов'язані з протоколом IP. Якщо в 3G голосовий трафік і дані передавалися по двох різних мереж - по мережі з комутацією каналів[10, 32] і по мережі передачі даних, то в мережах 4G весь трафік проходить через єдину архітектуру EPC по протоколу IP (рисунок 1.1).

При цьому мережа LTE накладає деякі обмеження на продуктивність[78]. Зокрема, при збільшенні швидкості підключення знижується радіус дії станції eNodeB - в середньому для LTE він становить близько 5 км (це залежить від використовуваного частотного діапазону: 800 МГц або 2600 МГц). При цьому число цих станцій в мережі стає більше, і вони починають розташовуватися все ближче і ближче один до одного. Зауважимо, що при цьому визначення місця розташування абонента за сигналами станцій eNodeB (тріангуляція) працює точніше. З одного боку - оператор точніше знає місцезнаходження абонента, але з іншого боку, сервіси геопозиціонування (Location-BasedService, LBS) можна використовувати і для стеження за абонентом, що створює небезпеку нових загроз.

Збільшення щільності розміщення мережевого обладнання для поліпшення покриття (рисунок 1.4) призводить до появи на мережі LTE фемто- і навіть пікосоти [85, 121], які сам користувач або підприємство може встановити у себе. Але при цьому поява нових мережевих елементів може призводити до атак на них і на канали зв'язку з іншою мережею. В даний час ще не зрозуміло, хто буде конфігурувати і забезпечувати безпеку цих фемтосот: оператор мережі або окремі фірми, що займаються їх обслуговуванням[45], користувач, який їх набуває, або оператор, до чия мережі вони підключаються [9]. Потрібно враховувати так само, що базові станції eNodeB стають все більш інтелектуальними, наприклад, у версії REL10[40] вони отримали можливість маршрутизувати трафік.

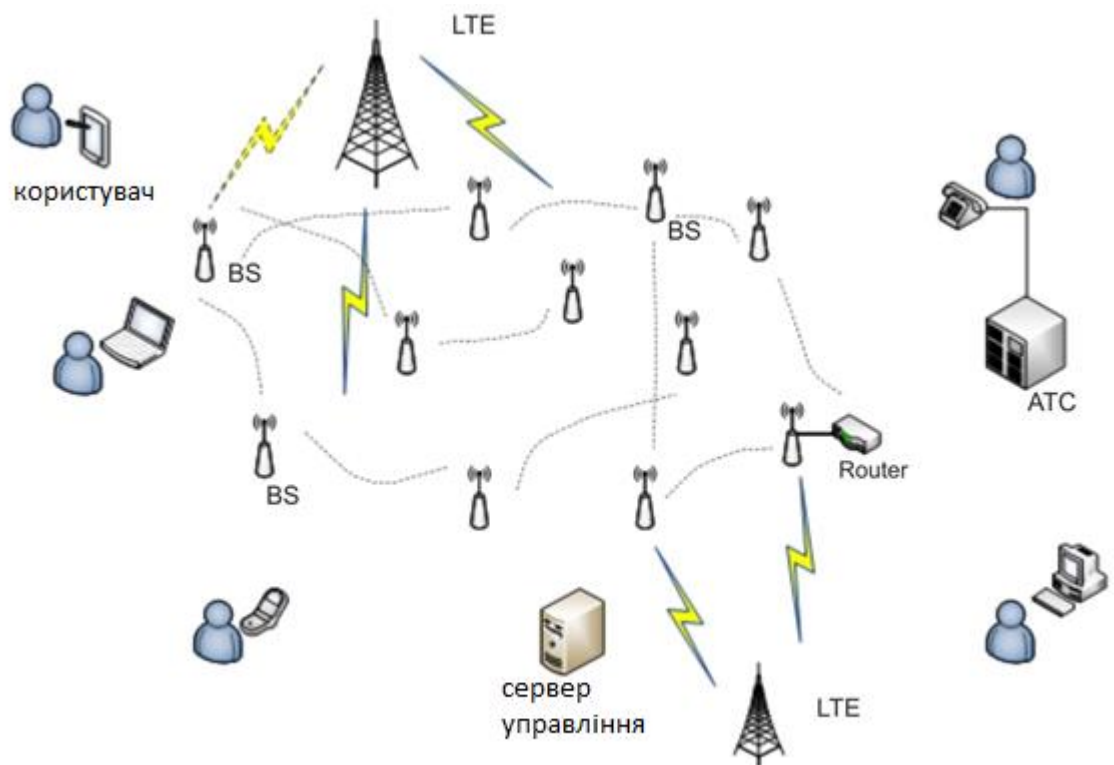


Рисунок 1.4. Підключення різних абонентів до мережі

У мережах LTE-Advanced з архітектури мережі LTE зникло поняття контролера радіомережі (RNC) [2], який виконував функцію з управління комунікаційними ресурсами. Для того щоб здійснити атаку на

інфраструктуру мереж попередніх поколінь, необхідно було отримати доступ до цього контролеру, а це було пов'язане з труднощами з фізичного доступу. Керуючі функції перейшли до базових станцій, які тепер, крім обслуговування радіочастини, стали приймати рішення про маршрутизацію всього надійшов до них трафіку від абонентів. Це дозволило організувати з'єднання між близькими абонентами безпосередньо, минаючи ядро мережі, що істотно розвантажує міжвузловими навантаження на опорній мережі. Але при цьому у злоумисників з'являється можливість атакувати самі станції eNodeB, які працюють тільки по протоколу IP, що полегшує несанкціонований доступ. Можуть бути використані класичні атаки на каналному рівні, ширококомвні шторми,

Питання забезпечення безпеки в мережах четвертого покоління вирішуються на кількох структурних рівнях: на фізичному (так званому повітряному інтерфейсі), на рівні внутрішньої мережі оператора, а також на рівні взаємодійнаслідком різних операторів.

Розглянемо основні види атак на елементи мереж зв'язку стандарту LTE.

1.4. Основні види атак на елементи мереж зв'язку стандарту LTE

Існує два варіанти атак [12]: пасивний варіант, коли злоумисник прослуховує канал зв'язку між мобільним пристроєм і базовою станцією, або активний варіант, коли на додаток до прослуховування, злоумисник впливає на вже циркулює трафік, вносячи в нього модифікації. В даний час можливості активних атак істотно знижені за рахунок застосування криптографічного захисту передачі інформації, але пасивні атаки, такі як аналіз трафіку і відстеження місця розташування користувачів, все ще можливі.

Стандарти попередніх поколінь мобільного зв'язку GSM, UMTS[2, 21] і стандарт LTE для захисту ідентифікаторів мобільних пристроїв в повітряному інтерфейсі використовують непридатні для фальсифікації тимчасові

ідентифікатори (TMSI, GUTI). Але неповне розгортання мережі LTE по всій території робить ці заходи недостатніми для забезпечення гарантованого рівня захисту користувачів.

Крім того, існують: атаки типу підміна довіреного об'єкта, атаки на мережеві служби з використанням Інтернет протоколів, атаки-повідомлення про неправдиве розташування іншим особам або атаки несанкціонованої переконфігурації радіоапаратури. Вони ускладнюють процес управління для оператора мережі LTE інтерференцією, що несприятливо позначається на якості обслуговування.

Ще одна особливість мережі LTE полягає в тому, що ця технологія орієнтована також на підключення інтелектуальних пристроїв користувача з LTE-модемами[45]: Персональних комп'ютерів, планшетів, смартфонів і т.д. Це означає, що в міру збільшення в мережі LTE числа інтелектуальних пристроїв число нападів на них буде зростати. Очевидно, що ці інтелектуальні пристрої можуть бути підвласні більш широкому колу загроз. Поширення вірусів у відкритих комп'ютерних платформах, наприклад, Android стає все більш масштабним[90], а продукція Apple і Microsoft також вразлива для шкідливих програм. В мобільні мережі перейшли всі загрози з провідних мереж: атаки на мережі, розсилка спаму, перехоплення відео і звуку з камери мобільного пристрою і т.д.

Однак, атаки можуть відбуватися не тільки на призначене для користувача устаткування. Все більше стає популярною технологія міжмашинного взаємодії (M2M)[78], За допомогою якої здійснюється взаємодія різних бездротових інтелектуальних пристроїв (вендрінг, датчики сигналізації і т.д.) мають LTE-модеми, які здійснюють передачу даних і управляються через мережі бездротового зв'язку.

Загрози для користувачам мереж LTE можуть так само виходити і від сервісів подвійного призначення[124]. Відомо, що мобільні оператори накопичують багато цінної інформації про абонентів (місце розташування,

інтереси на основі Інтернет запитів, і т.д.). Це, в кінцевому рахунку, може призводити до монетизації інформації. Типовим прикладом є LBS-сервіси - тип інформаційних та розважальних послуг, заснованих на визначенні поточного місця розташування мобільного телефону. Їх можна використовувати, наприклад, для контролю за переміщенням вантажів або громадського транспорту, для визначення місцезнаходження дітей і для оповіщення про надзвичайні ситуації, але їх же можна використовувати і для незаконного стеження за абонентом. Злом кожного такого сервісу дозволить отримувати доступ до цінної інформації провайдера і побудувати нові схеми злочинів.

1.5. Аналіз механізмів управління забезпеченням захисту інформації в мережах LTE

Функції захисту інформації в мережах LTE стандартизовані і здійснюються на декількох рівнях[45, 78]. Є захист на рівні доступу користувача до мережі, на рівні додатків, а також на рівні конфігурацій[121]. При цьому кожен рівень на відміну від мережі Інтернет здійснює аутентифікацію і авторизацію всіх пристроїв. Відомо, що кожен пристрій в IP-мережі має свою адресу, а також і унікальний ідентифікатор MAC, але їх досить легко змінити і підробити. Технологія LTE використовує для всіх пристроїв, підключених до мережі, не тільки IP-адреси, а й системи поширення передачі ключів шифрування. Все це дозволяє організувати в мобільній мережі безпечний обмін ключами і встановлення шифрованого каналу зв'язку між елементами мережі.

У мережах LTE зберігаються так само методи аутентифікації по прив'язці користувачів до карти USIM[12]. Як і в традиційній мобільного зв'язку користувач може заблокувати доступ до телефону по PIN-коду. У мережах LTE успадковані від мереж GSM і UMTS алгоритми протоколів аутентифікації, але до них додані довші ключі і розширена ієрархія інфраструктури відкритих ключів - PKI. Також передбачені нові можливості для в сценаріях межмашинного взаємодія M2M і одноразової

аутентифікації SSO. Передбачена, крім того, захист від несанкціонованих з'єднань поверх мультимедійної платформи IP-мережі - IMS[40, 55].

Однак, багато проблем, що виникають при перевантаженні мережі LTE, Зокрема: втрата доступності і втрата цілісності інформації, ще не вирішені. У даній дисертаційній роботі розглядається спосіб підвищення пропускнуєї спроможності мобільної мережі стандарту LTE, а саме - динамічне управління потоками інформації користувачів. Для конкретизації завдання, проведемо аналіз способів динамічного управління потоками в мережах LTE.

1.6. Аналіз способів динамічного управління потоками в мережах LTE

Динамічне управління потоками має на увазі під собою управління вхідного та вихідного навантаженнями на вузлах мобільної мережі[39](Таких як MME, S-GW, PGW, PCRF, HSS / DNS / GW см. П.1.1), а також адаптивну диспетчеризацію його програм. Динамічним управлінням потоками на мережі LTE займаються алгоритми управління самооптимізації мережі SON.

У вдосконаленій архітектурі SAE введені дві принципово нові функції: перша - автоматичної самооптимізації управління мережею SON, які виникли через вимоги до складних мережевих мультітехнологіям, що передбачає інтеграцію 2G, 3G, 4G і WiMAX і друга - використання в мережі більш дрібних нових ієрархій, таких як піко- і фемто- соти. Функції SON стандартизовані в рамках 3GPP[24], Вони є природним розвитком алгоритмів адаптивного управління, які вже використовуються в системах IMT-2000 [78](наприклад, динамічне управління потужністю випромінювання, планування ресурсів радіомережі RRC і т.п.) і дозволяють розширювати область автоматизації процесів управління мережі в цілому. Однак, вбудовування даної функції так і не було вироблено жодним

оператором мережі через помилки по пріоретізації трафіку що виникають при частковому розгортанні даної функції на мережі[121].

Інтенсивне зростання трафіку від міжмашинної взаємодії трафіку [55, 58, 125], Ставить перед операторами завдання оптимізації доступу до ресурсів мережі. Компанія Еріксон представила прогноз динаміки підключення абонентів до мереж фіксованого і мобільного широкосмугового доступу до 2020р., який показує збільшення трафіку від межмашинного взаємодії в два рази за найближчі два роки[104].

Технологія LTE в силу особливостей побудови радіоінтерфейсу є найбільш придатною для застосування алгоритмів динамічного управління пропускнуою спроможністю мереж[30]. Тому проведемо розгляд і аналіз методів управління пропускнуою спроможністю в стаціонарних і мобільних мережах з метою постановки задачі розробки оптимального методу управління.

1.7 Підтримка багатоантенних систем MIMO

У системах LTE передбачені різні режими роботи з декількома передавальними і приймальними антенами. Робота таких систем може бути організована за двома принципами: за принципом просторового ущільнення і за принципом просторово-часового кодування.

Суть першого принципу полягає в тому, що різні передавальні антени будуть передавати різні частини блоку інформаційних символів або різні інформаційні блоки. Передача даних ведеться паралельно з двох або з чотирьох антен. На приймальній стороні проводиться прийом і розподіл сигналів різних антен, і стає можливим збільшення максимальної швидкості передачі даних в два або в чотири рази.

У системах, побудованих за принципом просторово-часового кодування, з усіх передавальних антен здійснюється передача одного і того ж потоку даних з використанням схем попереднього кодування з

метою забезпечення кращої якості прийому. Так, наприклад, при формуванні сигналу з двох передавальних антен потік комплексних модуляційних символів, які будуть модулювати одну з піднесучих OFDMA-сигналу, розбивається на непарні (x_1) і парні (x_2) символи, тобто дані модуляційні символи відповідають одній піднесучій, але різним OFDMA-символам. [4]

У системах MIMO, побудованих за принципом TD з чотирма передавальними антенами, в будь-який момент часу ведеться передача сигналу тільки з двох антен. При цьому послідовність комплексних модуляційних символів розбивається на «четвірки» символів x_1 , x_2 , x_3 і x_4 , які будуть передаватися в порядку, показаному на рисунку 1.5 [4]

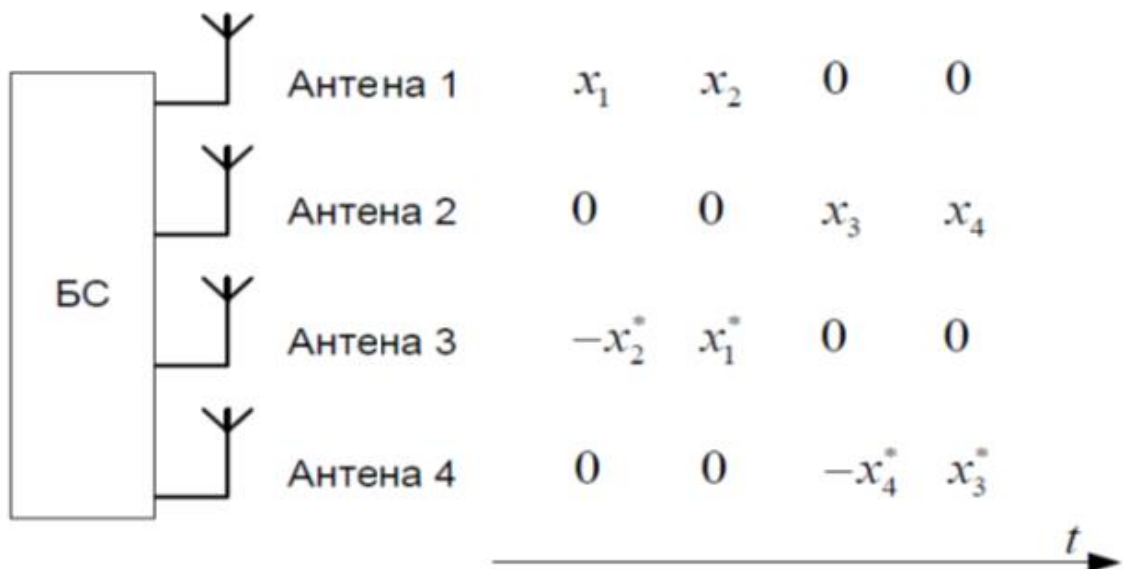


Рисунок 1.5 - Сигнали антен багатоантенної системи

На рисунку 1.6 показана структурна схема MIMO-системи з двома передавальними і двома приймаючими антенами. Така система, побудована за принципом просторового ущільнення, дозволяє підвищити максимальне значення швидкості передачі даних в два рази. [4]

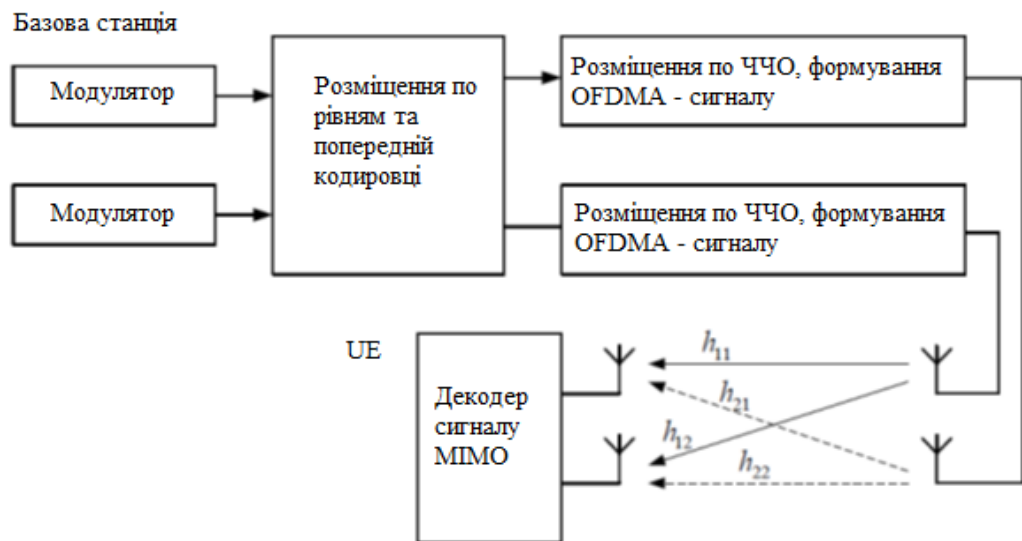


Рисунок 1.6 - Система MIMO з двома передавальними і двома приймальними антенами

У системах MIMO, що працюють за принципами TD і SM, на приймальній стороні необхідна оцінка комплексних коефіцієнтів передавальної характеристики від кожної з передавальних антен до кожної приймальної. Оцінка цих коефіцієнтів проводиться по пілотним символам. В той момент часу, коли одна з передавальних антен передає OFDMA-символ, що містить на одній з тих, що піднесуть пілотний символ, сигнали інших антен на даній піднесе повинні бути відсутніми. Порядок розміщення пілотних символів для систем MIMO по піднесучих визначається специфікацією TS 36.211. Приклад такого розміщення наведено на рисунку 1.7. [4]

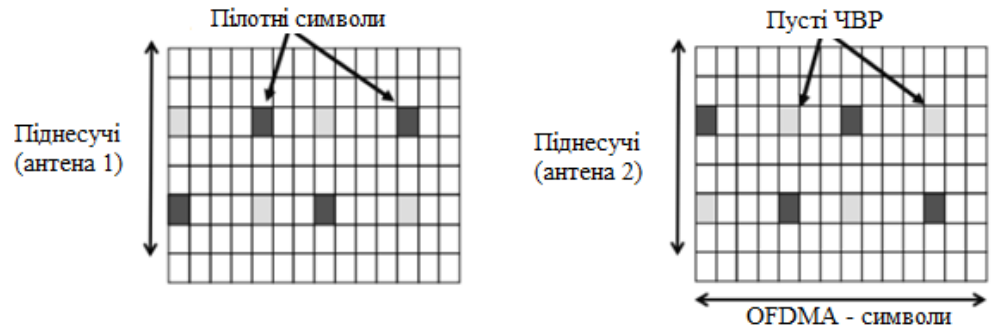


Рисунок 1.7 - Приклад розміщення пілотних символів по піднесучим

У мережах LTE для кожного користувача терміналу (ПТ) визначені два стану по відношенню до RRC-подуровню: з'єднання (RRC CONNECTED) і очікування (RRC IDLE). Функціонуючи, АТ переходить (Рисунок 1.8) зі стану RRC-очікування в стан RRC-з'єднання, коли з'єднання успішно встановлено; далі, АТ може назад повернутися в стан RRC-очікування, розірвавши з'єднання на RRC-підрівні.

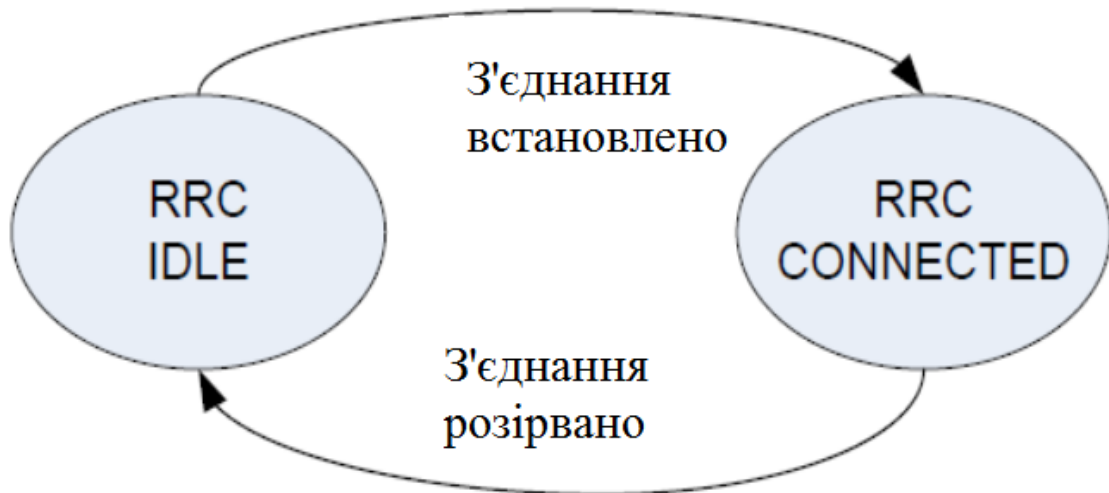


Рисунок 1.8 - Зміна станів АТ

Перебуваючи в стані RRC-очікування, АТ може проводити моніторинг каналу виклику, отримувати мовну інформацію, здійснювати вимірювання, що відносяться до обслуговуючої соти і, при необхідності, здійснювати її зміну. Крім того, в цьому стані можлива установка певного циклу переривчастої передачі для економії випромінюваної потужності ПВ. У цьому стані управління мобільністю здійснюється самою ПВ.

У стані RRC-з'єднання може відбуватися передача індивідуальної інформації, що відноситься до певного АТ, в обох напрямках, а також мовної (групової) інформації в низхідному напрямку, установка циклу переривчастої передачі. ПТ здійснює моніторинг керуючих каналів, пов'язаних зі спільними транспортними каналами, щоб визначити графік проходження пакетів даних. Для цих цілей забезпечується зворотний зв'язок, що дає інформацію про поточний якість каналу, виконуються необхідні виміри, що відносяться до обслуговуючої соте, а також

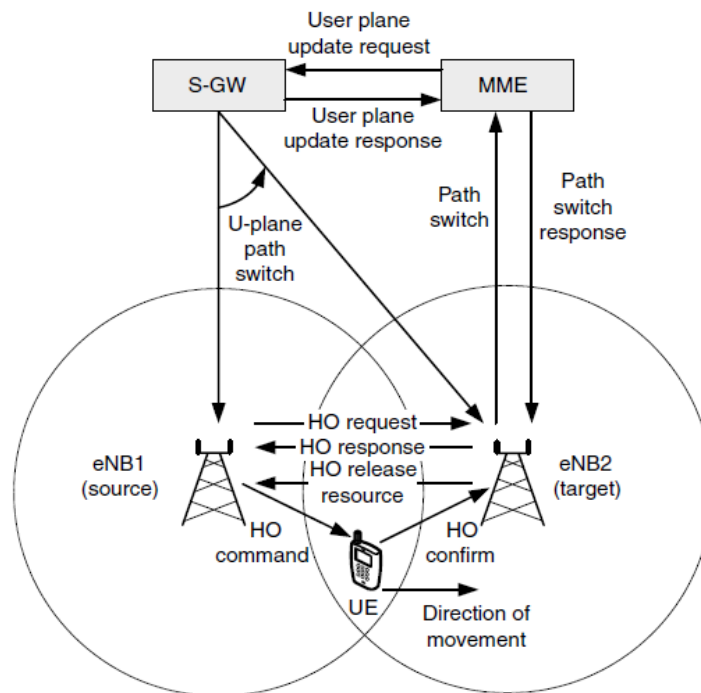
відсилаються в мережу звіти про вимірювання. На відміну від RRC-очікування, в стані RRC-з'єднання управління мобільністю проводиться мережею.

Найважливішою особливістю всіх стільникових мереж мобільного зв'язку, в тому числі, мереж LTE, є підтримка «безшовної» мобільності абонента по відношенню до зміни різних базових станцій, обслуговуючих вузлів та мереж (мережевих шлюзів). Вимоги до ефективності мобільності ще більш підвищуються при використанні таких чутливих до затримок окремих пакетів програм, як VoIP. Як відомо, в основі безшовної мобільності лежать різні процедури хендовера - естафетна передача активного (що знаходиться в режимі сеансу зв'язку або з'єднання) абонента при перетині ним різних географічних зон. Зрозуміло, що для типового користувача зміна сот (БС) відбувається значно частіше, ніж зміна обслуговуючого шлюзу і, тим більше, самої базової мережі. Тому для підготовки до виконання хендовера використовується сигналізація по інтерфейсу X2, чинному між різними БС. [4]

Як відомо, ефективність виконання хендовера є одним з найбільш важливих показників якості роботи мереж; погано відрегульовані хендоверні параметри (рівень прийняття рішення, гістерезис та інші) можуть привести до зайвого завантаження службових каналів і навіть до втрат сеансів зв'язку, обумовлених невдалими хендоверами. Опису алгоритмів хендовера, виконуваних в різних мережах, присвячена велика кількість специфікацій (зокрема, процедура хендовера досить детально прописана в специфікації TS 36.413).

На відміну, наприклад, від мереж GSM, де аналіз навколишнього оточення і вибір соти-кандидата на хендовер здійснюється контролером базових станцій, в мережах LTE подібні дії довірені самому АТ, хоча,

звичайно, остаточне рішення про хендовера приймається мережею. На рисунку 3.9 показаний приклад хендовера активного АТ, що переміщається з соти БС1 в соту БС2.



Рисунку 1.9 - Приклад хендовера в мережі LTE

У міру руху в зазначеному напрямку АТ відправляє звіт про вимірювання обслуговуючої базової станції БС1, з якого випливає, що якість сигналу, що приймається від сусідньої базової станції БС2, стало краще, ніж від БС1. Готуючи хендовер, БС1 по інтерфейсу X2 відправляє в БС2, звану в цьому випадку цільовою, запит на хендовер: «HO REQUEST». При цьому, на остаточне рішення про хендовера може вплинути поточний пріоритет користувача, інформації про який передається по EPS-каналю.

Цільова БС2 конфігурує необхідні ресурси відповідно до прийнятої по EPS-каналю інформації QoS і резервує для абонента стільниковий ідентифікатор C-RNTI (Cell Radio Network Temporary Identifier), а також, можливо, преамбулу каналу випадкового доступу. Зрозуміло,

ідентифікатор C-RNTI є унікальним для кожного АТ в межах соти.

Після того, як цільова БС2 відповідає (все ще) обслуговуючій БС1 про готовність виконати хендовер «HO RESPONSE», БС1 видає команду ПТ «HO COMMAND» про зміну радіоканалу, в якій містяться необхідні параметри: новий тимчасовий ідентифікатор C-RNTI (той, що був зарезервований), преамбула каналу випадкового доступу і час її існування і інші.

Після отримання команди на хендовер АТ синхронізується в новій соті, і здійснює доступ в мережу через канал RACH; мережа, в свою чергу, виділяє АТ необхідні ресурси і встановлює необхідний час попередження. Здійснивши таким чином, доступ до мережі, АТ відсилає своїй новій обслуговуючій БС2 повідомлення, яке підтверджує виконання хендовера «HO CONFIRM», БС2 сповіщає про це ММЕ: «PATH SWITCH», а той - обслуговуючий вузол повідомленням «USER PLANE UPDATE REQUEST», в якому АТ тепер позначається як обслуговується БС2.

Далі обслуговуючий вузол перемикає керування ПТ на БС2, відсилаючи туди через ММЕ відповідні команди «USER PLANE UPDATE RESPONSE» і «PATH SWITCH RESPONSE».

Після отримання команди «PATH SWITCH RESPONSE» БС2 інформує БС1 про успішне виконання хендовера, висилаючи їй повідомлення про вивільнення ресурсів «HO RELEASE RESOURCE», які до цього були зарезервовані для ПВ. На цьому процедура хендовера вважається виконаним.

В ході підготовки і виконання хендовера між базовими станціями БС1 і БС2 можуть бути встановлені тунелі: один - для передачі даних висхідного напрямку, інший - для передачі даних спадного напрямку. Це робиться для того, щоб забезпечити передачу довгих пакетів в разі

переповнення буферів.

При виконанні процедури хендовера абоненту присвоюється тимчасовий ідентифікатор C-RNTI.

Аналогічні ідентифікатори присвоюються абоненту і призначеному для користувача і мережевого обладнання також і під час проведення різних інших процедур, пов'язаних і з мережею радіодоступу, і з базовою мережею. [4]

1.8 Послуги в мережах LTE

Розвиток нових мережевих технологій, що забезпечують надання все більшого числа різноманітних послуг, змушують світове телекомунікаційне співтовариство поглянути на питання якості послуг зв'язку і систему їх управління як на один з найважливіших чинників ефективного розвитку конкуруючого ринку надання послуг зв'язку.

Поняття якості послуг зв'язку (QoS, Quality of Service) було офіційно затверджено Міжнародним союзом електрозв'язку в рекомендації E.800 (стосовно ще телефонних мереж загального користування та цифрових мереж інтегрального обслуговування), і воно розуміється як сумарний ефект від параметрів обслуговування, що визначає ступінь задоволення користувача послугами зв'язку.

Система управління якістю - це сукупність параметрів і механізмів, які забезпечують відповідність якості послуг встановленим вимогам. Метою введення такої системи є максимізація задоволення користувача наданою послугою для підвищення попиту на неї.

Початок розвитку системи управління якістю в мережах мобільного зв'язку, слід датувати 1997 роком, коли був випущений відповідний реліз Rel'97 / 98, призначений для модифікованої мережі GSM / GPRS з

можливістю пакетної передачі даних. В основі забезпечення якості послуги лежить поняття PDP-контексту (PDP, Packet Data Protocol), що представляє собою набір параметрів, що описують поточний стан користувача або терміналу по відношенню до можливих послуг і способів їх надання. При з'єднанні АТ з базовою пакетною мережею, з метою встановлення логічного зв'язку між АТ та різними мережевими вузлами для передачі IP-пакетів в прямому і зворотному напрямках, відбувається так звана активізація PDP-контексту.

Спочатку, згідно Rel'97 / 98, одному терміналу дозволялося мати один PDP-контекст на одну PDP-адресу. Надалі, в ході розробки концепції мобільних мереж третього покоління, була розвинена нова концепція PDP-контексту для підтримки нових вимог, а саме, можливість використання для одної PDP-адреси декількох PDP-контекстів, що мають свої профілі якості обслуговування. При цьому перший PDP-контекст, що відкривається для відповідної PDP адреси, називається первинним контекстом, а наступні PDP-контексти, відкриті для тої ж самої PDP адреси - вторинними контекстами. Однак використання вторинних PDP контекстів вимагає, щоб вони були пов'язані з точкою доступу до мережі APN первинного PDP контексту.

Основна ідея побудови такої структури управління - диференціювання якості обслуговування відповідно до параметрів PDP-контексту. Таким чином, всі додатки абонента, що поєднують використання одного PDP-контексту, мають однаковий профіль якості обслуговування. Кілька потоків з однаковими характеристиками утворюють сукупний профіль якості обслуговування. Для диференційованої обробки переданих пакетів відповідно до вимог QoS, для одного АТ одночасно повинні бути активізовані і первинні, і вторинні контексти. Приклад варіантів створення PDP-контекстів показаний на

рисунку 2.10. [4]

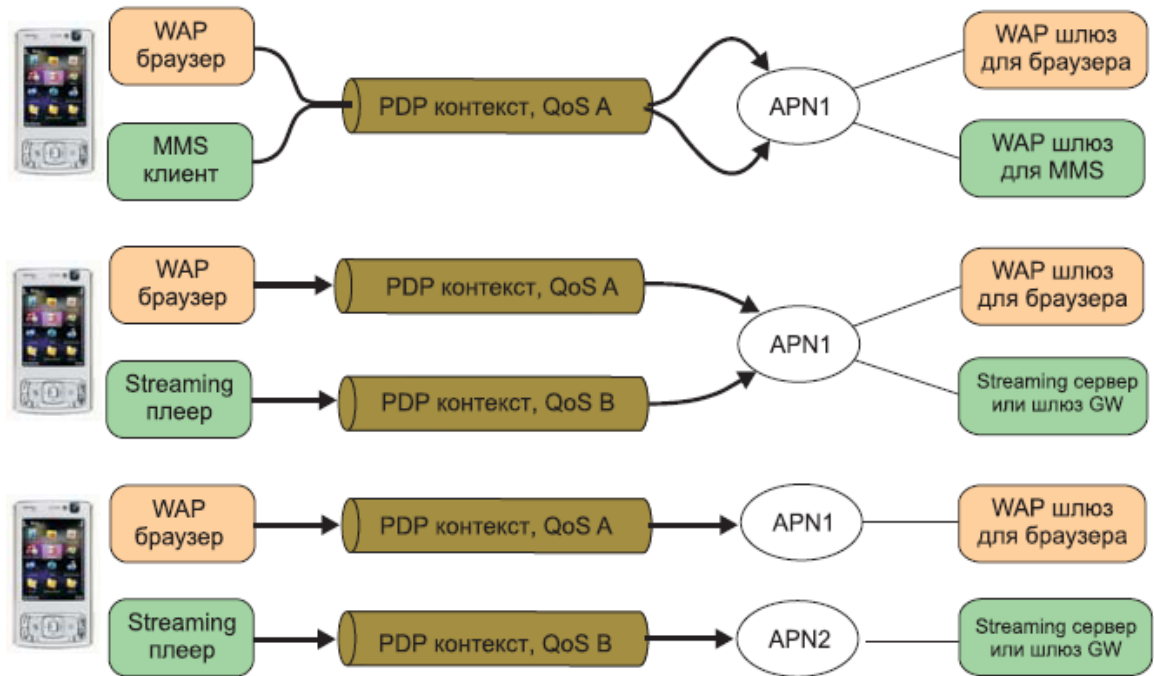


Рисунок 1.10 - Варіанти організації різних PDP-контекстів

Розвиток ринку користувальницьких послуг пов'язаний, перш за все, зі збільшенням послуг, що надаються в пакетному режимі. Більш того, як уже говорилося, в мобільних мережах третього і четвертого поколінь передача послуг, в тому числі, мовного спілкування, на основі каналної комутації фактично відсутня; реалізація пакетної передачі мови базується на технологіях VoIP (Voice over IP) або PoC (Push-to-talk over Cellular).

Поряд з пакетною передачею голосу основними послугами є такі:

- передача інтернет файлів (web-browsing);
- доставка електронної пошти;
- мультимедійні повідомлення (MMS, Multimedia Messaging Service),

в тому числі, мультимедійне мовлення;

- потокове відео (streaming);
- інтерактивні ігри в реальному часі. [4]

1.9 Частотний план роботи мереж LTE

У таблиці 1.1 представлений частотний план роботи мереж LTE: номери частотних діапазонів, відповідні смуги частот у висхідному і низхідному напрямках і вид дуплексного рознесення в кожному з діапазонів. [4]

Таблиця 1.1 - частотний план роботи мереж LTE

№ частотного діапазону	Смуга частот в висхідному каналі, МГц	Смуга частот в низхідному каналі, МГц	Вид дуплексного рознесення
1	1920-1980	2110-2170	FDD
2	1850-1910	1930-1990	FDD
3	1710-1785	1805-1880	FDD
4	1710-1755	2110-2155	FDD
5	824-849	869-894	FDD
6	830-840	875-885	FDD
7	2500-2570	2620-2690	FDD
8	880-915	925-960	FDD
9	1749,9-1784,9	1844,9-1879,9	FDD
10	1710-1770	2110-2170	FDD

11	1427,9-1447,9	1475,9-1495,9	FDD
12	698-716	728-746	FDD
13	777-787	746-756	FDD
14	788-798	758-768	FDD
15	зарезервовано	зарезервовано	FDD
16	зарезервовано	зарезервовано	FDD
17	704-716	734-746	FDD
18	815-830	860-875	FDD
19	830-845	875-890	FDD
20	832-862	791-821	FDD
21	1447,9-1462,9	1495,9-1510,9	FDD
33	1900-1920	1900-1920	TDD
34	2010-2025	2010-2025	TDD
35	1850-1910	1850-1910	TDD
36	1930-1990	1930-1990	TDD
37	1910-1930	1910-1930	TDD
38	2570-2620	2570-2620	TDD
39	1880-1920	1880-1920	TDD
40	2300-2400	2300-2400	TDD

Висновок до розділу 1

В даному розділі було розглянуто структуру мережі LTE, основні фактори, що впливають на продуктивність в мережах LTE, частотний план та технологію MIMO

2. Вибір середовища моделювання

2.1. Вибір системи імітаційного моделювання

Традиційно математичні моделі поділяють на аналітичні і імітаційні моделі. Аналітичні моделі є рівняння або системи рівнянь, записані у вигляді алгебраїчних, інтегральних, диференціальних, звичайно-різницевих і інших співвідношень і логічних умов. Вони записані і вирішені в буквенному вигляді. Даний тип моделей зазвичай застосовують для опису фундаментальних властивостей об'єктів, так як фундамент простий за своєю суттю. Складні об'єкти рідко вдається описати аналітично.

Альтернативою аналітичним моделям є імітаційні моделі (динамічні). Основна відмінність імітаційних моделей від аналітичних полягає в тому, що замість аналітичного опису взаємозв'язків між входами і виходами досліджуваної системи будують алгоритм, що відображає послідовність розвитку процесів усередині досліджуваного об'єкта, а потім відтворюють поведінку об'єкта на комп'ютері. До імітаційним моделям вдаються тоді, коли об'єкт моделювання настільки складний, що адекватно описати його поведінку математичними рівняннями неможливо або важко. Імітаційне моделювання дозволяє розкласти більшу модель на частини (об'єкти), якими можна оперувати окремо, створюючи інші, більш прості або, навпаки, більш складні моделі. Таким чином, основною перевагою імітаційного моделювання в порівнянні з аналітичним є можливість вирішення більш складних завдань, так як імітаційну модель можна поступово ускладнювати, при цьому результативність моделі не падає. При імітаційному моделюванні відтворюється алгоритм функціонування системи в часі - поведінка системи, причому імітуються елементарні явища, що становлять процес, зі збереженням їх логічної структури і послідовності протікання, що дозволяє за вихідними даними отримати відомості про стани процесу в певні моменти часу, що дають

можливість оцінити характеристики системи. Імітаційне моделювання тяжіє до об'єктно-орієнтованого поданням, яке природним чином описує об'єкти, їх стан, поведінку, а також взаємодія між ними.

Імітаційна модель, на відміну від аналітичної, являє собою не закінчену систему рівнянь, а розгорнуту схему з детально описаної структурою і поведінкою досліджуваного об'єкта. Для імітаційного моделювання характерно відтворення явищ, описуваних моделлю, із збереженням їх логічної структури, послідовності чергування в часі, взаємозв'язків між параметрами і змінними досліджуваної системи.

В аналітичних моделях можна використовувати широкий арсенал математичних методів, що часто дозволяє знайти оптимальне рішення і іноді провести аналіз чутливості. Однак, на жаль, аналітичні рішення не завжди існують, а існуючі не завжди просто знайти. Що стосується імітаційних моделей, то оптимальність рішення не гарантована, і навіть більше того - часто важко отримати рішення, хоча б в якійсь мірі близький до оптимального. Іноді потрібно провести багато випробувань імітаційної моделі, щоб отримати прийнятну достовірність «добротності» будь-якого рішення. Однак за допомогою імітаційного моделювання можна отримати такі дані, які за допомогою аналітичних моделей отримати дуже складно або зовсім неможливо, наприклад, визначити вплив мінливості параметрів моделі,

У таблиці 2.1 наведено порівняльну характеристику аналітичного і імітаційного моделювання.

Таблиця 2.1 - Порівняльна характеристика аналітичного і
імітаційного моделювання

	аналітичні	імітаційні
Види моделей по відношенню до часу	динамічні і статичні	динамічні
Форма запису моделі	рівняння або система рівнянь	алгоритм / процедура
Формалізація і побудова моделі	часто важкі	простіші
значення змінних	вихід системи	вхід системи
Спосіб вирішення моделі	алгоритм оптимізації	евристичний або експериментальний
Кількість випробувань для вирішення	одне	безліч
рішення	точні значення	імовірнісні
Знаходження оптимального рішення в разі побудови моделі	гарантовано	не гарантоване
Рішення складних систем	важко	можливо
Застосування на практиці	обмежена	не обмежена
Ступінь близькості моделі до досліджуваного об'єкта	сильно спрощена	максимально наближена
Клас досліджуваних об'єктів	звужений	розширений

Для вирішення поставленого завдання вирішено застосувати імітаційне моделювання, так як воно більш застосовно до таких складних систем, як мережа зв'язку стандарту LTE, і вимагає менших витрат на побудову моделі. При цьому побудована модель може бути використана і в подальшому при вирішенні дослідницьких або оптимізаційних задач.

В даний час існує велика кількість програм і програмних комплексів для імітаційного моделювання. Частина з них поширюється платно, частина є Open Source продуктами.

Для вибору системи моделювання необхідно провести їх порівняння і визначення найбільш придатної для поставленого завдання. Один з найбільш визначальних параметрів - функціональність і можливості. Крім того, важливим є ліцензія і вартість, так як вони можуть бути неприйнятними. Для розробника також необхідно, щоб розробка моделі була для нього зручною. Крім того, важливим фактором може стати наявність власної реалізації систем зв'язку LTE, що дозволяє користуватися перевіреними модулями і зосередитися на вирішенні поставленого завдання.

Таблиця 2.2 - Порівняння систем імітаційного моделювання

продукт	Ліцензія / вартість	Функціональніс ть	Взаємодія	Реалізація LTE
Matlab / Simulink	Пропріетарна / від \$ 89	Математичні і інженерні розрахунки, ЦГЗ, проектування	MATLAB	присутній
COMNE Т III	Пропріетарна / 3450039500	Моделювання мереж ATM, FR, X.25, Ethernet,	Графічний інтерфейс	відсутній

NetMaker XA	Пропрієтарна / 699514995	Моделювання мереж різних топологій, інформація про	Графічний інтерфейс / Об'єктна база даних	відсутній
OPNET	Пропрієтарна / 1600040000	моделювання мереж з графічної візуалізацією,	графічний інтерфейс	присутній
ns2	GNU GPL v2	моделювання мереж різних топологій, аналіз втрат пакетів, черг, затримок	OTcl	присутній, малофункціональний
ns3	GNUGPLv 2	Моделювання мереж і систем різних конфігурацій, візуалізація	C ++	присутній

У таблиці 2.2 наведено порівняльну характеристику систем моделювання. В якості системи моделювання була обрано середовище MatLab.

2.2. Matlab Simulink

MatLab - це високорівнева мова і інтерактивне середовище для програмування, чисельних розрахунків і візуалізації результатів. За допомогою MatLab можна аналізувати дані, розробляти алгоритми, створювати моделі і додатки.

Мова, інструментарій та вбудовані математичні функції дозволяють досліджувати різні підходи і отримувати рішення швидше, ніж з використанням електронних таблиць або традиційних мов програмування, таких як C / C ++ або Java. MatLab широко використовується в таких областях, як:

- Обробка сигналів і зв'язок,
- Обробка зображень і відео, Системи управління,
- Автоматизація тестування і вимірювань,
- Фінансовий інжиніринг,
- Обчислювальна біологія і т.п.

Понад мільйон інженерів і вчених по всьому світу використовують MatLab як мову технічних обчислень. MatLab наряду з традиційними мовами програмування (C / C ++, Java, Pascal, FORTRAN) , що дозволяє на порядок скоротити час вирішення типових завдань і значно спрощує розробку нових алгоритмів.

MatLab є основою всього сімейства продуктів MathWorks і є головним інструментом для вирішення широкого спектра наукових і прикладних задач, в таких областях як: моделювання об'єктів і розробка систем управління, проектування комунікаційних систем, обробка сигналів і зображень, вимірювання сигналів і тестування, фінансове моделювання, обчислювальна біологія та ін. Ядро MatLab дозволяє максимально просто працювати з матрицями реальних, комплексних і аналітичних типів даних і зі структурами даних і таблицями пошуку. MatLab містить вбудовані функції лінійної алгебри (LAPACK, BLAS), швидкого перетворення Фур'є (FFTW), функції для роботи з поліномами, функції базової статистики та чисельного рішення диференціальних рівнянь; розширені математичні бібліотеки для Intel MKL.

Всі вбудовані функції ядра MatLab розроблені й оптимізовані фахівцями і працюють швидше або так само, як їх еквівалент на C / C ++ [6].

MatLab надає безліч методів для аналізу даних, розробки алгоритмів і створення моделей. Мова MatLab включає в себе математичні функції для інженерних і наукових операцій. Вбудовані математичні функції використовують процесор-оптимізовані бібліотеки, призначені для прискорення векторних і матричних обчислень.

Доступні наступні операції:

- Інтерполяція і регресія;
- Диференціювання та інтегрування;
- Системи лінійних рівнянь;
- Фур'є аналіз;
- Власні значення і сингулярні числа матриць;
- Звичайні диференціальні рівняння;
- Розріджені матриці.

Розширення MatLab надають спеціалізований функціонал в таких областях як статистика, оптимізація, обробка сигналів, машинне навчання.

MatLab надає інструменти для отримання, аналізу та візуалізації даних, що дозволяють досліджувати проблему швидше, ніж це можливо за допомогою електронних таблиць або традиційних мов програмування. Також можна документувати результати у вигляді графіків, звітів або публікації коду MatLab.

MatLab дозволяє отримувати доступ до даних з файлів, інших додатків, баз даних, зовнішніх пристроїв. Ви можете читати дані з файлів таких популярних форматів як Microsoft Excel, текстових або довічних файлів, зображень, аудіо та відео файлів, наукових форматів (netCDF і HDF). Функції вводу-виводу дозволяють працювати з файлами даних будь-яких форматів.

Використовуючи розширення MatLab можна отримувати дані з різних пристроїв, таких як послідовний порт комп'ютера або звукова карта, а також потокові дані в реальному часі з вимірювальних пристроїв безпосередньо в MatLab для аналізу і візуалізації.

MatLab дозволяє управляти, фільтрувати і здійснювати попередню обробку даних. Можна досліджувати дані для знаходження трендів, перевірки гіпотез, побудови описових моделей. У MatLab включені функції для фільтрації, згладжування, згортки і швидкого перетворення Фур'є (FFT). Продукти-розширення включають можливості підбору кривих і поверхонь, багатовимірної статистики, спектрального аналізу, аналізу зображень, ідентифікації систем та інші інструменти аналізу.

MatLab надає набір вбудованих функцій побудови 2D і 3D графіків, а також функції об'ємної візуалізації. Ви можете використовувати ці функції для візуалізації і як засіб представлення оброблюваної інформації. Графіки можуть бути створені як інтерактивно, так і програмно.

У галереї графіків MatLab є приклади безлічі способів подання даних графічно. Для кожного прикладу можна подивитися і скачати вихідний код для використання в додатках MatLab.

Мова MatLab має підтримку векторних і матричних операцій, яка необхідна для вирішення інженерних і наукових завдань, і призначена для швидкої розробки та запуску.

За допомогою мови MatLab можна писати програми і алгоритми швидше, ніж на традиційних мовах програмування, тому що немає необхідності таких низькорівневих організаційних операцій як оголошення змінних, визначення типів і виділення пам'яті. У багатьох випадках перехід на векторні і матричні операції позбавляє від необхідності використання циклів for. В результаті один рядок MatLab коду часто може замінити кілька рядків C / C ++ коду.

MatLab має властивості традиційних мов програмування, включаючи управління потоками даних, обробку помилок і об'єктно програмування (ООП). Можна використовувати основні типи даних, складні структури даних або визначати призначені для користувача типи.

Можна отримувати результати негайно, виконуючи команди інтерактивно по одній за раз. Такий підхід дозволяє швидко досліджувати

різні варіанти для отримання кращого рішення. Об'єднавши ці інтерактивні команди в скрипт або функцію можна автоматизувати їх виконання.

Розширення MatLab мають вбудовані алгоритми для обробки сигналів і зв'язку, обробки зображень і відео даних, систем управління і багатьох інших областей. Комбінуючи ці алгоритми можна реалізувати складні програми і додатки [6].

Simulink - це графічне середовище імітаційного моделювання, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів, будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні і гібридні, нелінійні і розривні системи.

Інтерактивне середовище Simulink, дозволяє використовувати вже готові бібліотеки блоків для моделювання електросилових, механічних і гідравлічних систем, а також застосовувати розвинений модельноорієнтований підхід при розробці систем управління, засобів цифрового зв'язку і пристроїв реального часу.

Додаткові пакети розширення Simulink дозволяють вирішувати весь спектр завдань від розробки концепції моделі до тестування, перевірки, генерації коду і апаратної реалізації. Simulink інтегрований в середу MatLab, що дозволяють використовувати вбудовані математичні алгоритми, потужні засоби обробки даних і наукову графіком.

Simulink Library Browser (засіб перегляду Бібліотеки Simulink) містить в собі бібліотеку блоків найбільш часто використовуваних для моделювання систем.

В цю бібліотеку входять:

- Блоки безперервної і дискретної динаміки, такі як Integrator (Інтегратор) і Unit Delay (Ланка Затримки);
- Алгоритмічні блоки, такі як Sum (Суматор), Product (Твір), Lookup Table (Довідкова Таблиця);
- Структурні блоки, такі як Mux (Мультиплексор), Switch (Перемикач), Bus Selector (Селектор Шини).

Середовище моделювання Simulink має наступні ключові особливості:

- Інтерактивна графічне середовище для побудови блок-діаграм;
- Розширювана бібліотека готових блоків;
- Зручні засоби побудова багаторівневих ієрархічних багатокomпонентних моделей;
- Засіб навігації і налаштування параметрів складних моделей - Model Explorer;
- Засоби інтеграції готових C / C ++, FORTRAN, ADA і MatLab - алгоритмів в модель, взаємодія із зовнішніми програмами для моделювання;
- Сучасні засоби розв'язання диференціальних рівнянь для безперервних, дискретних, лінійних і нелінійних об'єктів (в т.ч. з гістерезисом і розривами);
- Імітаційне моделювання нестационарних систем за допомогою решателів зі змінним і постійним кроком або методом керованого з MatLab пакетного моделювання;
- Зручна інтерактивна візуалізація вихідних сигналів, засоби настройки і завдання вхідних впливів;
- Засоби налагодження і аналізу моделей;
- Повна інтеграція з MatLab, включаючи чисельні методи, візуалізацію, аналіз даних і графічні інтерфейси [7].

LTE Toolbox

LTE Toolbox надає функції і інструменти для проектування, симуляції і верифікації систем зв'язку, які відповідають стандартам LTE і LTE-Advanced.

Даний набір інструментів прискорює розробку алгоритмів і пристроїв фізичного рівня стандарту LTE, надає еталонне середовище для верифікації проектів та їх перевірки на відповідність стандарту, а також функції для генерації тестових сигналів.

Він дозволяє налаштовувати, моделювати, вимірювати і аналізувати повністю закінчені лінії зв'язку. Крім того, за допомогою цих інструментів можна створити і багаторазово використовувати випробувальне середовище для перевірки проектів, прототипів і реалізацій на відповідність стандарту LTE.

Набір компонентів включає:

- Канальне кодування з узгодженням швидкості передачі, скремблювання і модуляцію;

- Операції MIMO, в тому числі компоновку потоків і попереднє кодування;

- Компоновання ресурсних елементів і генерація сигналів OFDM і SC-FDM;

- Синхронізація фреймів, зсув частоти і її відновлення;

- Оцінка ідеального радіоканалу, а також тих, які сходять і висхідних каналів зв'язку;

- Вирівнювання: алгоритми звернення в нуль і мінімізації середньоквадратичної помилки;

- Демодуляція, де-скремблювання і канальне декодування;

- Гібридний автоматичний запит повторної передачі (HARQ).

LTE Toolbox надає велику специфікацію матриці частотно-часових ресурсів. Дана матриця являє структуру, яку стандарт LTE використовує для організації даних і мультиплексування різних каналів і сигналів перед передачею символів OFDM по кожній антені.

Використовуючи функції для генерації і заповнення різних елементів матриці, можна перевірити правильність проекту і знайти помилки розміщення і відображення в його реалізації.

LTE Toolbox дозволяє моделювати і виконувати симуляцію роботи пристроїв фізичного рівня стандарту LTE.

Симуляції на каналному рівні (link-level) дають можливість отримати

очікувані показники ефективності, включаючи пропускну здатність і коефіцієнт блокових помилок, і оцінити справжні реалізації на основі результатів симуляції.

Системний набір інструментів також дозволяє краще спланувати систему, наприклад, за рахунок моделювання на каналному рівні, яке дає деякі параметри, необхідні для розробки вежі стільникового зв'язку з певною геометрією і профілем поширення сигналу.

У набір підтримуваних функцій для операцій передавача, приймача і моделей каналу входять:

Структура фреймів і несучі частоти для дуплексної передачі з тимчасовим (TDD) і частотним (FDD) поділом.

Всі діапазони частот передачі, включаючи LTE від 1.4 до 20 МГц і LTE-A до 100 МГц з агрегацією несучих частот. Фізичні сигнали LTE, включаючи низхідні і висхідні опорні сигнали і сигнали синхронізації. Фізичні канали LTE, в тому числі загальні канали та канали управління. Повний тракт обробки спадного потоку, включаючи обробку загальних і керуючих каналів, всі схеми MIMO і генерацію OFDM сигналу. Повний тракт обробки висхідного потоку, включаючи обробку загальних і керуючих каналів, конфігурації з декількома антенами SU-MIMO і MU-MIMO і генерацію сигналів SC-FDMA. Моделі каналів поширення, певні для LTE, в тому числі розширену пішохідну модель (EPA), розширену автомобільну модель (EVA), розширену типову міську модель (ETU), моделі поширення при русі і моделі каналів MIMO для високошвидкісних поїздів.

Ключові особливості LTE Toolbox

- Містить моделі, що відповідають стандартам LTE і LTE-Advanced (Версії 8,9 і 10)

- Реалізовано повний функціонал приймача на фізичному рівні, включаючи OFDM (спадний канал) і SC-FDMA (висхідний канал)

- Підтримується передача сигналу декількома антенами (технологія

MIMO) і функції формування діаграми спрямованості відповідно до ідентифікаторами мобільної станції (UE)

- Оцінка каналу зв'язку, синхронізація і функції прийому за технологією MIMO

- Є відповідні стандарту моделі каналів поширення сигналу

- Включені тестові моделі та генератори сигналів для еталонного вимірювання характеристик радіоканалу

- Інтерактивні інструменти для перевірки відповідності стандарту і вимірювання числа бітових помилок

- Відновлення низькорівневих параметрів, таких як ідентифікатор стільники [8].

Висновки до розділу 2

В цьому розділі було порівняно середовища моделювання та вибрано середовище Matlab, як найбільш відповідну до завдання роботи.

3. Моделювання та оцінка результатів

3.1. Створення моделі

Структура моделі:

Модель складається з чотирьох основних частин:

Аналіз пропускної здатності: розрахунок характеристик пропускної здатності з декодуванням результату блоку CRC.

Структура моделі

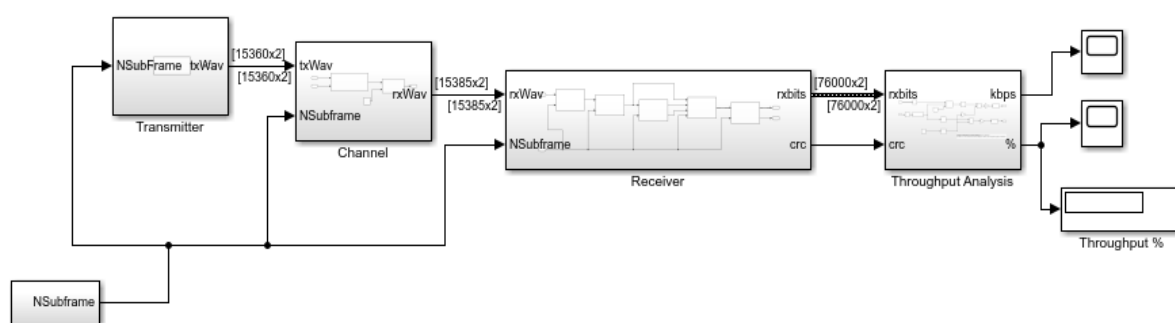


Рисунок 3.1. Структура каналу DLSCN з просторовим мультиплексуванням

Модель складається з чотирьох основних частин:

- Аналіз пропускної здатності: розрахунок характеристик пропускної здатності з декодуванням результату блоку CRC.

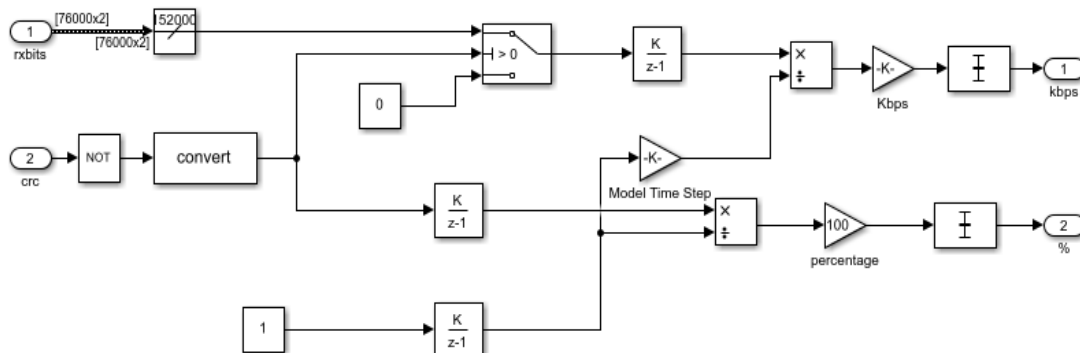


Рисунок 3.2. Схема оцінки пропускної здатності каналу

- Трансмітер



Рисунок 3.3. Схема трансмітеру

Блок передавача створює один або два випадкові кодові слова з інформаційними бітами, в залежності від режиму передачі (TM – transmission mode). Потім виклик функції `lteRMCDLTool` створює OFDM-модульований сигнал з інформаційних бітів. Ця форма хвилі містить фізичні канали і сигнали. Так як модель не визначає RMC, всі підкадри низхідної лінії розплановані.

- Канал

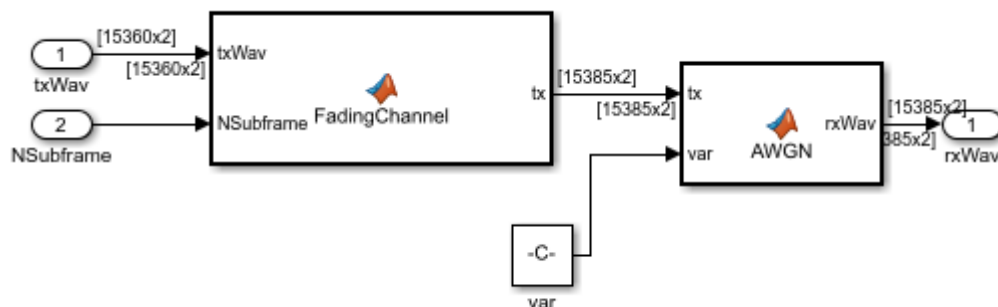


Рисунок 3.4. Схема каналу з завмираннями з АБГШ

У підсистемі каналу, сигнал пропускається через багатопроменевий канал з завмираннями із додаванням білого гаусівського шуму. Потужність шуму регулюється шляхом зміни параметра сигнал-шум (SNR).

- Приймач



Рисунок 3.5. Схема приймача

Приймач відновлює дані PDSCH з каналу і обчислює блок CRC. Цей процес складається з наступних етапів:

Синхронізація: Прийняті символи зміщені, для урахування затримки реалізації та розкиду затримки каналу.

OFDM демодуляція: Прийняті символи OFDM демодулюються.

Оцінка каналу : оцінка відклику каналу і рівнів шуму. Ці оцінки використовуються для декодування PDSCH.

PDSCH Декодування:

Відновлені символи PDSCH для кожної передавальної антени з прийнятої сітки разом з оцінкою каналу демодулюються і дескремблюються для отримання оцінки прийнятих кодових слів.

Декодується транспортний канал з розподілом користувачів (DL-SCH) і обчислення блоку CRC помилки : Вектор декодованих софт бітів передається lteDLSCHDecode. Ця функція декодує кодове слово і повертає блоку CRC помилок, що використовується для визначення пропускну здатності системи.

Модель використовує закритий цикл кодової книги на основі просторового мультиплексування (TM-4). Ця модель може

використовувати і інші режими передачі, що використовують кодову книгу (TM 1-4, TM 6)

Ця модель вимірює пропускну здатність для ряду точок SNR.

Матриці попереднього кодера Індикація (PMI) зворотний зв'язок здійснюється для режимів передачі, що вимагають зворотного зв'язку матриці попереднього кодування (TM4 і TM6).

$N_{Frames} = 20$; - кількість кадрів

$SNR_{In} = [20 \ 30 \ 40]$; Діапазон SNR в дБ

Конфігурація ENodeB

Цей розділ де вибирається TM (режим передачі) і встановлюються параметри ENodeB. TM вибирається за допомогою змінної | TXMODE |, яка може приймати значення TM1, TM2, TM3, TM4 і TM6.

$TXMODE = 'TM4'$; TM1, TM2, TM3, TM4, TM6

Не вказавши номер RMC гарантує, що всі RMC низхідних підкадрів заплановано. Якщо RMC вказано (наприклад, «R.0»), планування підрамник

як визначено в TS 36.101, де пікадр 5 не запланований в більшості випадків.

Змінна | TXMODE | вибирає TM за допомогою перемикача switch. Для кожного TMA, необхідні параметри вказані. Ця модель не виконує DCI декодування формату, тому | DCIFormat | поле не є строго необхідним. Однак, так як формат DCI тісно пов'язаний з TM, це для повноти викладу.

Очищення функції simulationParameters

```
simulationParameters = [];
```

Кількість ресурсних блоків (смуга в 20 МГц)

```
simulationParameters.NDLRB = 100;
```

Швидкість коду

```
simulationParameters.PDSCH.TargetCodeRate = 1;
```

PRB індекси (0-99 – означає, що кожен ресурсний блок має свій індекс)

```
simulationParameters.PDSCH.PRBSet = (0:99) ';
```

switch TXMODE

Одноантенний режим (port0) (TM1)

```
case 'TM1'
```

```
fprintf ('\ nTM1 - одна антена (порт 0) \ п');
```

```
simulationParameters.PDSCH.TxScheme = 'Port0';
```

```
simulationParameters.PDSCH.DCIFFormat = «Format1»;
```

```
simulationParameters.CellRefP = 1;
```

```
simulationParameters.PDSCH.Modulation = {'16QAM'};
```

режим рознесення передачі (TM2)

```
case «TM2»
```

```
fprintf ('\ NTM2 - рознесення передачі \ п');
```

```
simulationParameters.PDSCH.TxScheme = 'TxDiversity';
```

```
simulationParameters.PDSCH.DCIFFormat = «Format1»;
```

```
simulationParameters.CellRefP = 2;
```



```
simulationParameters.PDSCH.Modulation = {'16QAM'};
simulationParameters.PDSCH.NLayers = 2;
```

Режим БДЗ (ТМ3)

```
case «ТМ3»
```

```
fprintf ('\ nТМ3 - CDD \ п');
```

```
simulationParameters.PDSCH.TxScheme = «CDD»;
```

```
simulationParameters.PDSCH.DCIFormat = 'Format2A';
```

```
simulationParameters.CellRefP = 2;
```

```
simulationParameters.PDSCH.Modulation = {'16QAM', '16QAM'};
```

```
simulationParameters.PDSCH.NLayers = 2;
```

Режим просторового мультиплексування (ТМ 4)

```
case 'ТМ4'
```

```
fprintf («\ NTМ4 - на основі кодів просторове мультиплексування \ п»);
```

```
simulationParameters.CellRefP = 2;
```

```
simulationParameters.PDSCH.Modulation = {'16QAM', '16QAM'};
```

```
simulationParameters.PDSCH.DCIFormat = «Format2»;
```

```
simulationParameters.PDSCH.TxScheme = 'SpatialMux';
```

```
simulationParameters.PDSCH.NLayers = 2;
```

Немає обмежень кодової книги

```
simulationParameters.PDSCH.CodebookSubset = «»;
```

Одношаровий режим просторового мультиплексування (ТМ6)

випадок 'TM6'

```
fprintf (...
```

```
«\ nTM6 – просторове мультиплексування на основі кодової книги з одним  
рівнем \ п»);
```

```
simulationParameters.CellRefP = 4;
```

```
simulationParameters.PDSCH.Modulation = {'QPSK'};
```

```
simulationParameters.PDSCH.DCIFormat = «Format2»;
```

```
simulationParameters.PDSCH.TxScheme = 'SpatialMux';
```

```
simulationParameters.PDSCH.NLayers = 1;
```

Немає обмежень кодової книги

```
simulationParameters.PDSCH.CodebookSubset = «»;
```

```
otherwise
```

```
error ("Режим передачі повинен бути один з TM1, TM2, TM3, TM4 або  
TM6.)
```

```
end
```

Ці поля `simulationParameters`, застосовуються для всіх режимів передачі

Створюється один підкадр за раз,

```
simulationParameters.TotSubframes = 1;
```

М'які біти утяжчаються по CSI

```
simulationParameters.PDSCH.CSI = 'On';
```

Виклик `<MATLAB:doc ('lteRMCDL') lteRMCDL>` відповідає за створення `ENodeB` за параметрів за замовчуванням, що не зазначені в

simulationParameters . Це буде потрібно пізніше, щоб сформувати форму хвилі за допомогою <MATLAB: doc («lteRMCDLTool»)lteRMCDLTool>.

```
enb = lteRMCDL (simulationParameters);
```

Вихідна | enb | структура містить, серед інших полів, розміри транспортних блоків і версія надмірності послідовності для кожного підкадру кодового слова в межах кадру. Вони будуть використовуватися в подальшому при моделюванні.

```
rvSequence = enb.PDSCH.RVSeq;
```

```
trBlkSizes = enb.PDSCH.TrBlkSizes;
```

Число кодових слів, | N |, це число записів в файлі | Enb.PDSCH.Modulation | поле.

```
N = length (string (enb.PDSCH.Modulation));
```

Встановіть затримку PMI для режимів із замкнутим контуром (TM4 і TM6). Це

затримка між PMI, що передається від UE до ENodeB, як визначено в TS36.101.

```
pmiDelay = 8;
```

Далі ми виводимо суму деяких найбільш важливих параметрів моделювання.

Відображення кодової швидкості може бути корисним для виявлення проблем, якщо вручну зазначений розмір транспортного блоку. Типові значення $1/3$, $1/2$ і $3/4$. В даному випадку задається 1, задля досягнення найбільшої швидкості.

`hDisplayENBParameterSummary (enb, TXMODE);`

Розмноження Конфігурація моделі каналу

Структура `|channel|` містить конфігурацію моделі каналу параметри.

Seed (зерно) каналу

`channel.Seed = 6;`

Кількість прийомних антен

`channel.NRxAnts = 4;`

Профіль затримки

`channel.DelayProfile = 'EPA';`

Частота доплерівського ефекту

`channel.DopplerFreq = 5;`

Рівень кореляції антен

`channel.MIMOCorrelation = 'Low';`

Осцилятори, використовувані в моделі завмирання

`channel.NTerms = 16;`

Тип моделі завмирання Релея

`channel.ModelType = 'GMEDS';`

Випадкові початкові фази

```
channel.InitPhase = 'Random';
```

Нормалізація затримки профіля потужності

```
channel.NormalizePathGains = 'On';
```

Нормалізація передавальних антен

```
channel.NormalizeTxAnts = 'On';
```

Частота дискретизації для моделі каналу встановлюється з використанням значення, що береться з `<matLab:doc ('lteOFDMInfo') lteOFDMInfo>`.

```
ofdmInfo = lteOFDMInfo (ENB);
```

```
channel.SamplingRate = ofdmInfo.SamplingRate;
```

Конфігурація оцінювача каналу

Змінна | `perfectChanEstimator` | контролює поведінку оцінювання каналу.

Допустимі значення | `true` | або | `false` |. Якщо встановлено значення | `true` | ідеальний канал відповідь використовується в якості оцінки, інакше недосконала оцінка заснована на отриманих значеннях прийнятих пілотних сигналів

.

Флаг оцінювача ідеального каналу

```
perfectChanEstimator = FALSE;
```

Якщо | `perfectChanEstimator` | встановлений в `false`, то необхідна структура конфігурації | CEC | для параметризації оцінки каналу. Канал змінюється повільно по часу і частоті, тому використовується велике вікно усереднення щоб усереднити шум.

Налаштування оцінювача каналу

Тип усереднення пілотного символу

```
sec.PilotAverage = 'UserDefined';
```

Розмір вікна частоти

```
sec.FreqWindow = 41;
```

розмір вікна часу

```
sec.TimeWindow = 27;
```

2D тип інтерполяції

```
sec.InterpType = «Cubic»;
```

Інтерполяція тип вікна

```
sec.InterpWindow = «Centered»;
```

розмір вікна Інтерполяція

```
sec.InterpWinSize = 1;
```

Відображення інформації симуляції

Змінна | `displaySimulationInformation` | управляє відображенням інформацію моделювання, такі як ідентифікатор процесу HARQ, який використовується для кожного підкадру. У разі CRC помилки значення індексу послідовності RV також відображається.

```
displaySimulationInformation = true;
```

Цикл обробки

Для визначення пропускнуої здатності в кожній точці SNR, дані PDSCH аналізується підкадр за підкадром, використовуючи наступні кроки:

Оновлення поточного HARQ процесу. HARQ-процес або несе в собі нові транспортні дані або повторну передачу раніше надісланих транспортних даних в залежності від підтвердження прийому (ACK) або не підтвердження (NACK) на основі результатів CRC. Все це здійснюється за допомогою планувальника HARQ, <MATLAB:edit ('hHARQScheduling.m') hHARQScheduling.m>. Дані PDSCH оновлюється на основі стану HARQ.

Установка PMI. Цей крок застосовується лише до TM4 і TM6 (замкнутий цикл із просторовим мультиплексуванням і однорівневий замкнутий цикл із просторовим мультиплексуванням).

Значення PMI береться послідовно з набору значень PMI, | txPMIs |, кожного пікадру і використовується ENodeB для вибору матриці попереднього кодування. PMI, що рекомендується UE використовується ENodeB для передачі даних. Існує затримка | pmiDelay | в субкадрі, між тим як UE рекомендує PMI і тим як

ENodeB використовує його, щоб вибрати матрицю попереднього кодування. Спочатку для набору значень | PmiDelay | використовується випадковий PMI.

Створення форми хвилі передачі. Дані, отримані в процесі HARQ передаються <matLab:doc ('lteRMCDLTool') lteRMCDLTool>, який виробляє OFDM-модульовану форму хвилі, що містить фізичні канали і сигнали.

Моделювання шуму в каналі. Сигнал проходить через канал з завмираннями і додається шум (АБГШ) .

Синхронізація і OFDM демодуляція. Отримані символи зміщуються на рахунок для поєднання затримки реалізації та розкиду затримки каналу. Потім символи OFDM демодулюються.

Виконується оцінка каналу. Рівні відгуку каналу і шуму оцінюються. Ці оцінки використовуються для декодування PDSCH.

Декодування PDSCH. Відновлені PDSCH символи для всіх передавальних і

приймальних антенних пар, разом з оцінкою шуму, демодулюються і дескремблюються в `<MatLab:doc ('ltePDSCHDecode') ltePDSCHDecode>`, щоб отримати оцінку отриманих кодових слів.

Декодування нисхідного транспортного каналу з розподілом користувачів (DL-SCH), і збереження блоку CRC Error для HARQ процесу. Вектор декодованих м'яких бітів передається до `<MATLAB:doc ('lteDLSCHDecode') lteDLSCHDecode>`; це декодує кодове слово і повертає блоку CRC Error, де використовується для визначення пропускну здатності системи. Зміст нового софт буфера, `|harqProc(harqID).decState |`, можна отримати на виході цієї функції для використання під час декодування наступного підкадру.

Оновлення PMI. PMI вибирається і подається назад в ENodeB для майбутнього використання. Цей крок застосовується лише до TM4 і TM6.

Кількість передавальних антен P виходить з розмірів сітки ресурсів. «dims» це M -на- N -на- P , де M позначає кількість піднесучих, N

це кількість символів і P - кількість передавальних антен.

```
dims = lteDLResourceGridSize (enb);
```

```
P = dims (3);
```

Ініціанування змінних,що використовуються в процесі моделювання і аналізу

Масив для зберігання максимальних пропускної здатності для всіх точок SNR

```
maxThroughput = zeros (length (SNRIn), 1);
```

Масив для зберігання пропускної здатності для моделювання всіх точок SNR

```
simThroughput = zeros (length (SNRIn), 1);
```

Тимчасові змінні 'enb_init' і 'channel_init' використовуються для створення

тимчасових змінних «ENB» і «канал» в межах циклу SNR для створення незалежні цикли моделювання для циклу 'for'

```
enb_init = ENB;
```

```
channel_init = channel;
```

```
legendString = [«Пропускна здатність:» символ (enb.PDSCH.TxScheme)];
```

```
allRvSeqPtrHistory = cell (1, numel (SNRIn));
```

```
NFFT = ofdmInfo.Nfft;
```

```
for snrIdx = 1: numel (SNRIn)
```

Встановіть випадкове число зерен(seed) генератора в залежності від змінної циклу, щоб забезпечити незалежні випадкові потоки.

```
rgn (snrIdx,'CombRecursive');
```

```
SNRdB = SNRIn (snrIdx);
```

```
fprintf ('\ nSimulating at g dB SNR for d Frame(s)\ n' , SNRdB, NFrames);
```

Ініціалізувати змінні, використовувані в процесі моделювання і аналізу

Ініціалізувати значення зміщення кадру

```
offsets = 0;
```

Ініціалізувати значення зміщення для кадру радіозв'язку

```
offset = 0;
```

Блок CRC для всіх розглянутих підкадрів

```
blkCRC = [];
```

Кількість успішно прийнятих бітів в підкадрі

```
bitTput = [];
```

Кількість переданих бітів в підкадрі

```
txedTrBlkSizes = [];
```

Ініціалізація конфігурації RMC

```
ENB = enb_init;
```

Ініціалізація конфігурації каналу

```
channel = channel_init;
```

Індекс РМІ у черзі затримки

```
rmiIdx = 0;
```

Змінна `harqPtrTable` зберігає історію значень показника у послідовність `RV` для всіх процесів HARQ.

Попередньо наділяють `NaN`, так як деякі підкадри не мають даних

```
rvSeqPtrHistory = NaN (HCB, NFrames * 10);
```

Ініціалізувати стан всіх процесів HARQ

```
harqProcesses = hNewHARQProcess (ENB);
```

Використовуються випадковий PMI для першого 'pmiDelay' підкадру до тих пір, поки зворотний зв'язок доступний від UE; зверніть увагу, що зворотній зв'язок PMI застосовується тільки для TM4 і TM6, але цей код потрібен для повної ініціалізації змінних в циклі SNR при використанні `Parallel Computing Toolbox`.

```
pmidims = ltePMIInfo (ENB, enb.PDSCH);
```

```
txPMIs = RANDI ([0] pmidims.MaxPMI, pmidims.NSubbands, pmiDelay);
```

Ініціалізація HARQ ідентифікаторів процесу в 1, так що і перший ненульовий транспортний блок завжди буде передаватися з використанням першого процесу HARQ. Це буде оновлюватися при повній вихідній послідовності по `lteRMCDLTool` після

першого виклику функції

```
harqProcessSequence = 1;
```

```
for subframeNo = 0: (NFrames * 10-1)
```

Оновлення номеру підкадру

```
enb.NSubframe = subframeNo;
```

Отримання ідентифікатор процесу HARQ для підкадру з послідовності процесу HARQ

```
harqID = harqProcessSequence (мод (subframeNo, довжина
(harqProcessSequence)) + 1);
```

Якщо транспортний блок запланований в поточному підкадрі (позначений ненульовим «harqID»), виконують передачу та прийом. В іншому випадку цикл переходить до наступного підкадру.

```
if harqID == 0
continue;
end
```

Оновлення поточного процесу HARQ

```
harqProcesses (harqID) = hHARQScheduling ( ...
harqProcesses (harqID), subframeNo, rvSequence);
```

Витяг розміру транспортного блоку поточного підкадру (s)

```
TrBlk = trBlkSizes (:, мод (subframeNo, 10) + 1). ';
```

Відображення інформації часу виконання

```
if displaySimulationInformation
disp ( ' ');
disp ([ 'Subframe: ' num2str (subframeNo)...
'. HARQ process ID: ' num2str (harqID)]);
end
```

Оновлення RV таблиця покажчик послідовності

```
rvSeqPtrHistory (:, subframeNo + 1) = ...
```

```
harqProcesses (harqID) .txConfig.RVIdx '.
```

Оновлення конфігурації передачі PDSCH зі станом процесу HARQ,

```
enb.PDSCH = harqProcesses (harqID) .txConfig;
```

```
data = harqProcesses (harqID) .data;
```

Встановлення PMI відповідного значення в черзі затримки

```
if strcmpi (enb.PDSCH.TxScheme, 'SpatialMux')
```

Індекс PMI у черзі затримки

```
pmiIdx = mod (subframeNo, pmiDelay);
```

Набір PMI

```
enb.PDSCH.PMISet = txPMIs (:, pmiIdx + 1);
```

```
end
```

Створюється форма сигналу передачі і отримується послідовність ідентифікаторів планування HARQ з вихідних даних структури 'enbOut', яка також містить конфігурацію форми сигналу і параметри модуляції OFDM

```
[TxWaveform, ~, enbOut] = lteRMCDLTool (ENB, дані);
```

Додати 25 міжблокового простору. Це дозволяє охопити весь діапазон затримок що очікується від моделювання каналу (комбінація затримки реалізації і затримки в каналі поширення)

```
txWaveform = [txWaveform; нулі (25, P)];#OK <AGROW>
```

Отримується послідовність HARQ ID від «enbOut» для обробки HARQ

```
harqProcessSequence = enbOut.PDSCH.HARQProcessSequence;
```

Ініціалізується час каналу для кожного підкадру

```
channel.InitTime = subframeNo / 1000;
```

Дані проходять через модель каналу

```
rxWaveform = lteFadingChannel (channel, txWaveform);
```

Розрахунок посилення шуму, включаючи компенсацію для розподілу потужності низхідної лінії

```
SNR = 10 ^ ((SNRdB-enb.PDSCH.Rho) / 20);
```

Нормалізація потужності шуму, щоб врахувати частоту дискретизації, яка є функцією розміру IFFT, використовуваного в модуляції OFDM, і кількості антен

```
N0 = 1 / (SQRT (2.0 * enb.CellRefP * подвійний (NFFT)) * SNR);
```

Створення адитивного білого гауссова шуму

```
шум = N0 * комплекс (randn (розмір (rxWaveform)), ...
randn (розмір (rxWaveform)));
```

Додати AWGN до отриманого сигналу в тимчасовій області

```
rxWaveform = rxWaveform + шум;
```

Коли кадр, на підкадрі 0, розрахувати нову синхронізацію
зміщення

```
if (mod(subframeNo, 10) == 0)
    offset = lteDLFrameOffset (ENB, rxWaveform);
    if (offset > 25)
        offset = offsets (end);
    end
    offsets = [offsets offset]; #ok
end
```

Синхронізація сигналу

```
rxWaveform = rxWaveform (1 + offset: end, :);
```

Виконання OFDM демодуляції прийнятих даних, щоб відтворити
сітку ресурсів

```
rxSubframe = lteOFDMDemodulate (ENB, rxWaveform);
```

Оцінка каналу

```

if(PerfectChanEstimator)
    estChannelGrid = lteDLPerfectChannelEstimate (enb, channel, offset); #ok
    noiseGrid = lteOFDMDemodulate (enb, noise(1 + offset:end, :));
    noiseEst = Var (noiseGrid (:));
else
    [EstChannelGrid, noiseEst] = lteDLChannelEstimate ( ...
enb, enb.PDSCH, CEC, rxSubframe);
end

```

Отримуються індекси PDSCH

```
pdschIndices = ltePDSCHIndices (enb, enb.PDSCH, enb.PDSCH.PRBSets);
```

Отримати ресурсні елементи PDSCH з прийнятого підкадру.

Масштабувати отриманий підкадр за коефіцієнтом потужності PDSCH

ρ . PDSCH масштабується на цю величину, в той час як еталонні сотові символи, що використовуються для

оцінки каналу (використовується на етапі декодування PDSCH)- ні .

```

[PdschRx, pdschHest] = lteExtractResources (pdschIndices, ...
rxSubframe * (10 ^ (- enb.PDSCH.Rho / 20)), estChannelGrid);

```

Декодування PDSCH

```
dlschBits = ltePDSCHDecode (...
```

```
ENB, enb.PDSCH, pdschRx, pdschHest, noiseEst);
```

Декодування DL-SCH


```
[Decbits, harqProcesses (harqID) .blkerr, harqProcesses (harqID) .decState] =
...
```

```
lteDLSCHDecode (ENB, enb.PDSCH, TrBlk, dlschBits, ...
harqProcesses (harqID) .decState);
```

Помилки відображення блоку

```
if displaySimulationInformation
    if any(harqProcesses (harqID) .blkerr)
        disp(['Block error. RV index: '
num2str (harqProcesses (harqID).txConfig.RVIdx)...
            ', CPR:' num2str (harqProcesses (harqID) .blkerr)])
    else
        disp(['No error.RV index: ' num2str (harqProcesses (harqID)
.txConfig.RVIdx)...
            ', CRC: ' num2str (harqProcesses (harqID) .blkerr)])
    end
end
```

Значення для розрахунку пропускної здатності

Тільки для підкадрів з даними

```
if any(TrBlk)
    blkCRC = [blkCRC harqProcesses (harqID) .blkerr]; #OK <AGROW>
    bitTput = [bitTput TrBlk. * (1 ...
harqProcesses (harqID) .blkerr)]; #OK <AGROW>
    txedTrBlkSizes = [txedTrBlkSizes TrBlk]; #OK <AGROW>
```

end

Забезпечити зворотний зв'язок PMI з eNodeB

if strcmpi (enb.PDSCH.TxScheme,'SpatialMux')

 PMI = ltePMISelect (ENB, enb.PDSCH, estChannelGrid, noiseEst);

 txPMIs (:, pmiIdx + 1) = PMI;

end

end

Розрахунок максимальної і змодельованої пропускної здатності

maxThroughput (snrIdx) = sum (txedTrBlkSizes); Максимальна пропускна здатність

simThroughput (snrIdx) = sum (bitTput, 2); Модельована пропускна здатність

Відображення результатів динамічно в вікні командного рядка

fprintf (['\ NThroughput (Mbps) for ', Num2str (NFrames) 'Frame(s) '],...

'= .4f \ п', 1e-6 * simThroughput (snrIdx) / (NFrames * 10e-3));

fprintf (['«Пропускна спроможність () для", Num2str (NFrames) 'Рама (и) = .4f \ п'],...

simThroughput (snrIdx) * 100 / maxThroughput (snrIdx));

allRvSeqPtrHistory {snrIdx} = rvSeqPtrHistory;

end

Побудова послідовності RV для всіх процесів HARQ

hPlotRVSequence (SNRIn, allRvSeqPtrHistory, NFrames);

Результати моделювання : початкові параметри

```

-- Parameter summary: -----
                Duplexing mode: FDD
                Transmission mode: TM4
                Transmission scheme: SpatialMux
Number of downlink resource blocks: 100
Number of allocated resource blocks: 100
Cell-specific reference signal ports: 4
                Number of transmit antennas: 4
                Transmission layers: 4
                Number of codewords: 2
                Modulation codeword 1: 64QAM
Transport block sizes codeword 1:  124464  128496  128496  128496  128496  124464  128496  128496  128496  128496
Code rate codeword 1:    0.9287  0.9269  0.9269  0.9269  0.9269  0.9092  0.9269  0.9269  0.9269  0.9269
                Modulation codeword 2: 64QAM
Transport block sizes codeword 2:  124464  128496  128496  128496  128496  124464  128496  128496  128496  128496
Code rate codeword 2:    0.9287  0.9269  0.9269  0.9269  0.9269  0.9092  0.9269  0.9269  0.9269  0.9269
-----

```

Чисельні значення:

0 dB: Throughput(Mbps) for 20 Frame(s) = 0.0000

Throughput(%) for 20 Frame(s) = 0.0000

10 dB: Throughput(Mbps) for 20 Frame(s) = 0.0000

Throughput(%) for 20 Frame(s) = 0.0000

20 dB: Throughput(Mbps) for 20 Frame(s) = 72.1567

Throughput(%) for 20 Frame(s) = 28.2547

30 dB: Throughput(Mbps) for 20 Frame(s) = 97.0522

Throughput(%) for 20 Frame(s) = 38.0032

40 dB: Throughput(Mbps) for 20 Frame(s) = 181.9174

Throughput(%) for 20 Frame(s) = 71.2342

Рисунок 3.6. Параметри модулювання з 64QAM

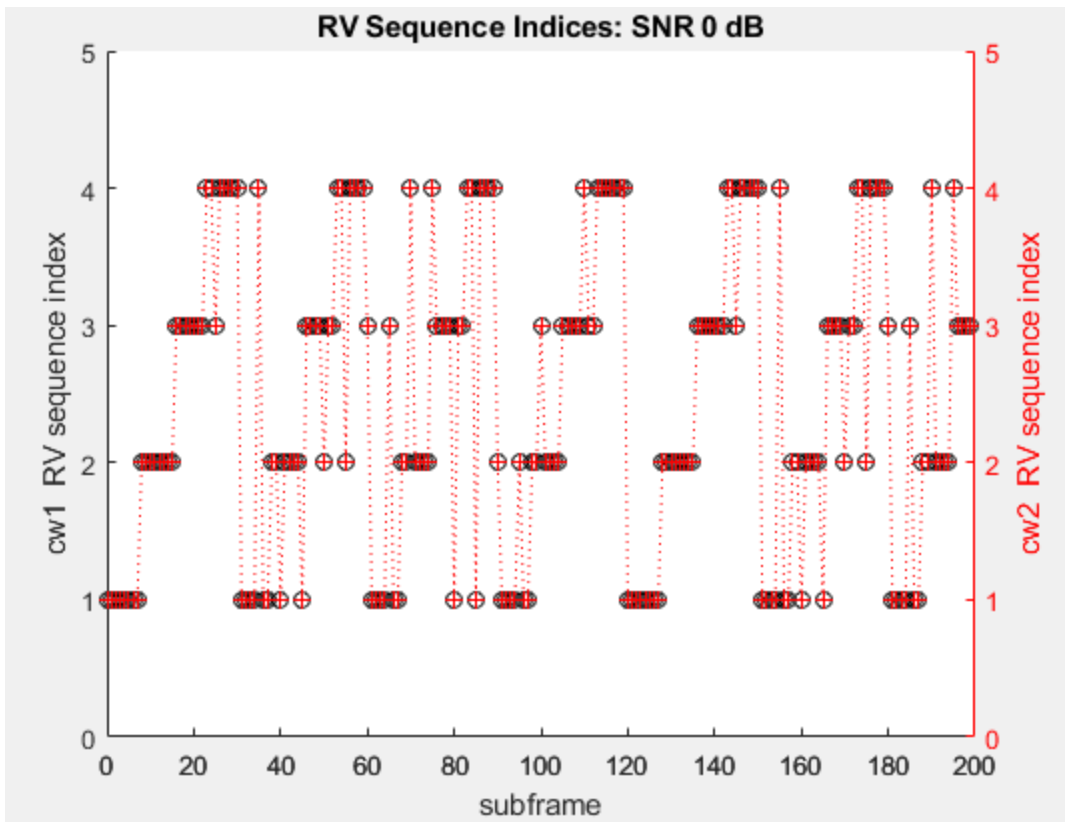


Рисунок 3.7. Прийом 20 фреймів з рівнем SNR 0 dB

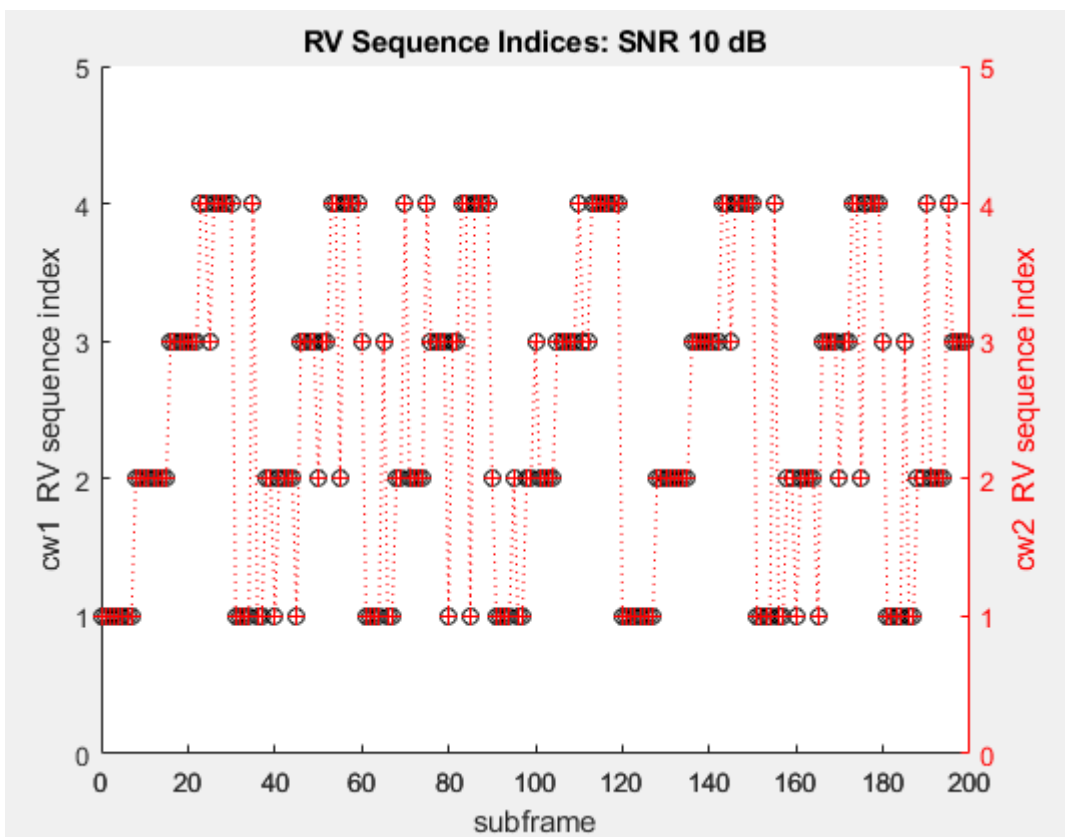


Рисунок 3.8. Прийом 20 фреймів з рівнем SNR 10 dB

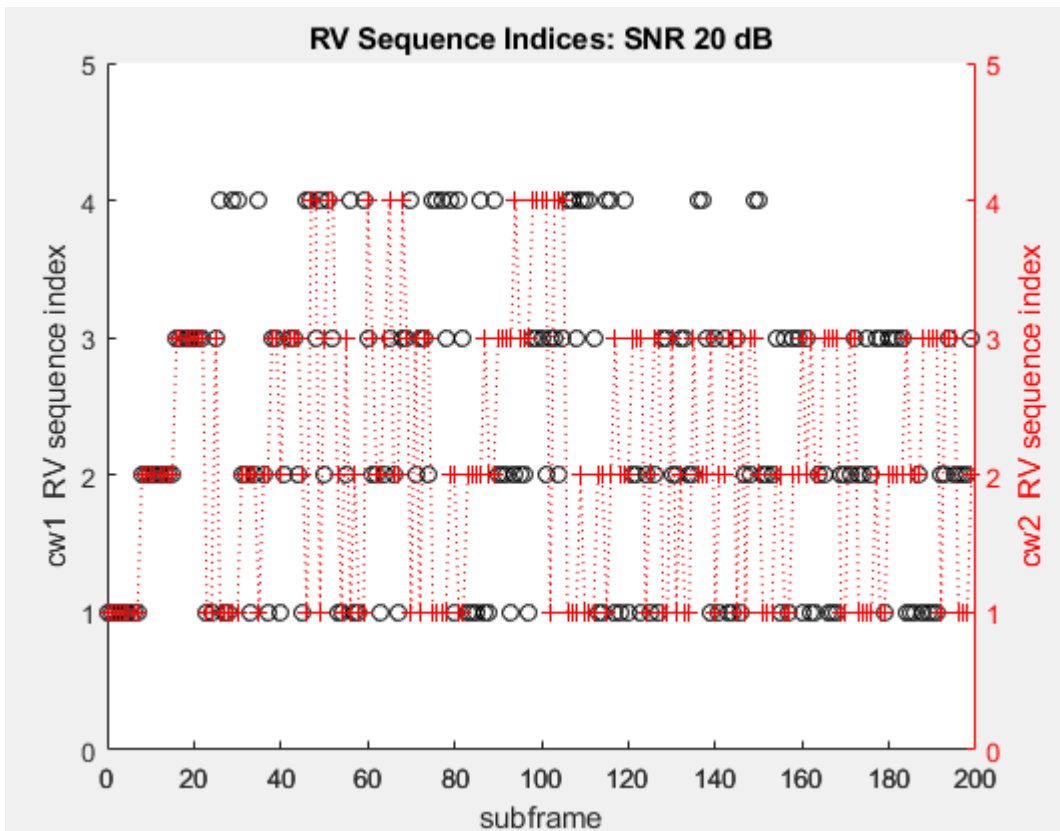


Рисунок 3.10 Прийом 20 фреймів з рівнем SNR 20 dB

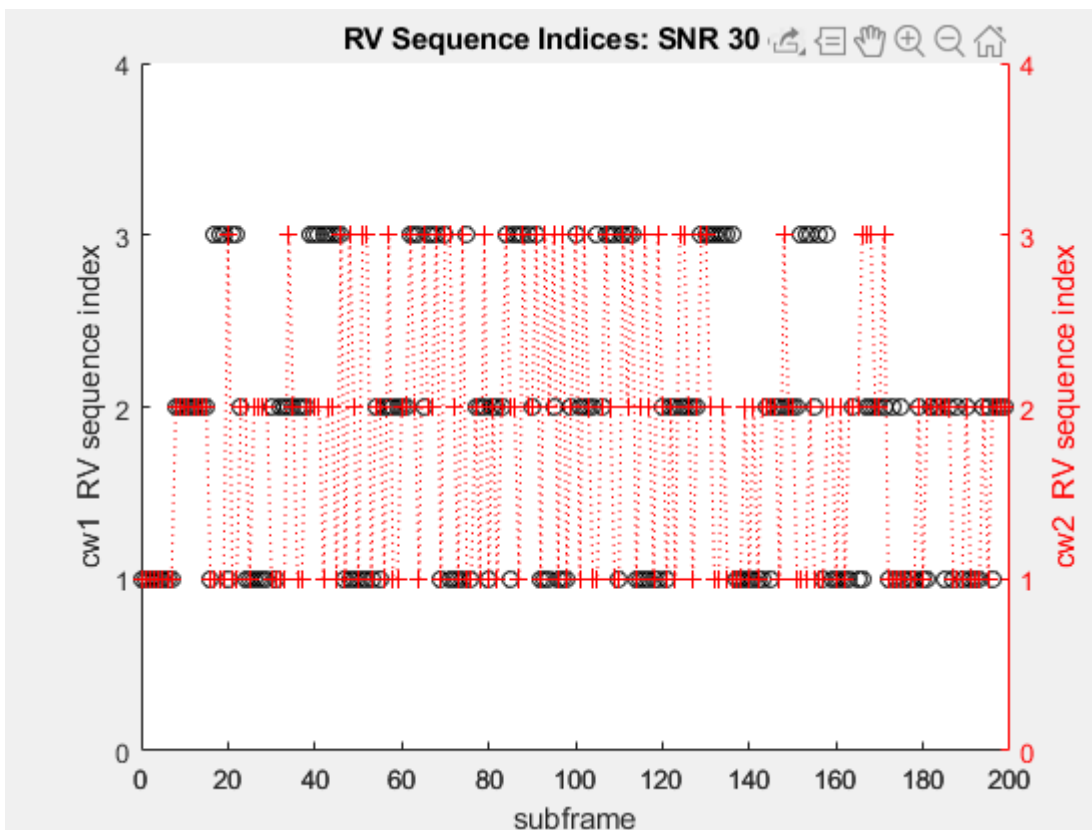


Рисунок 3.11. Прийом 20 фреймів з рівнем SNR 30 dB

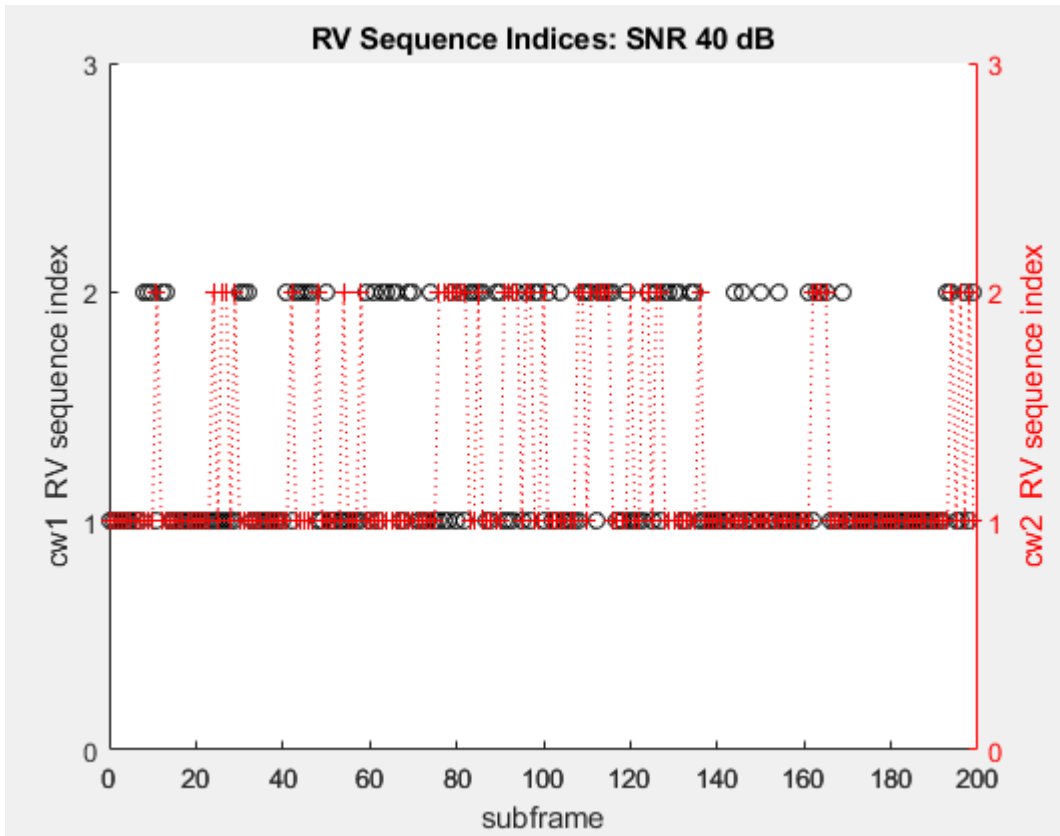


Рисунок 3.12. Прийом 20 фреймів з рівнем SNR 40 dB

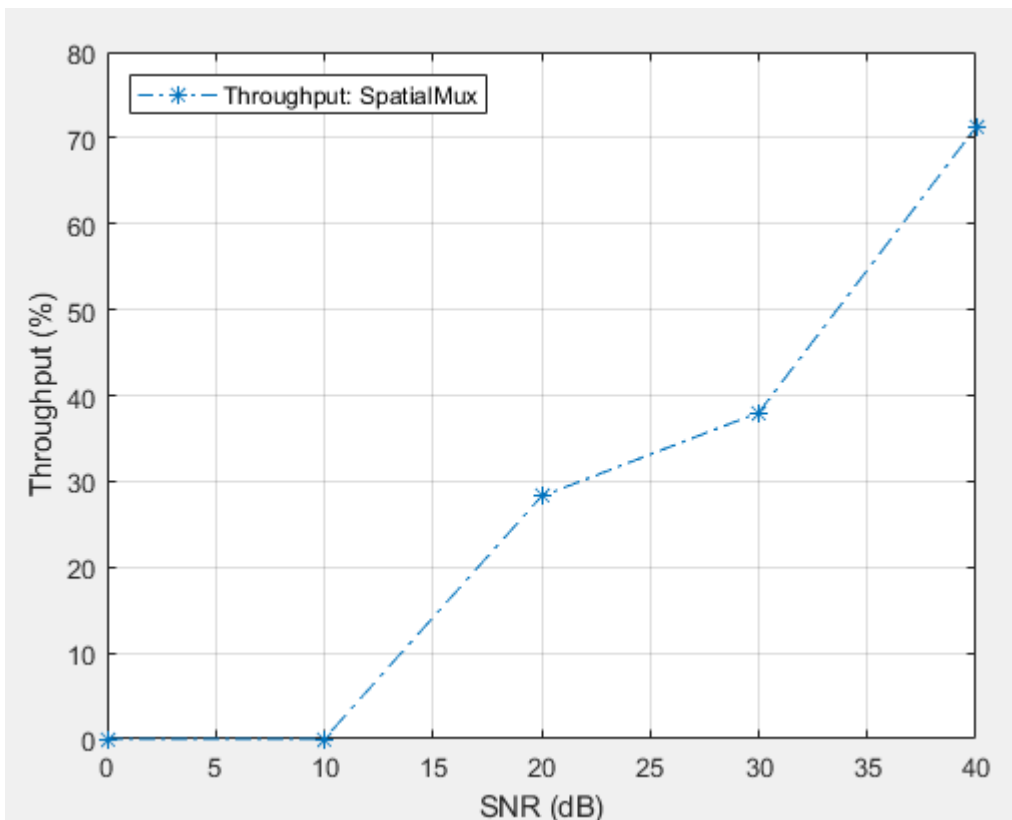


Рисунок 3.13. Залежність пропускної здатності (%) від SNR dB

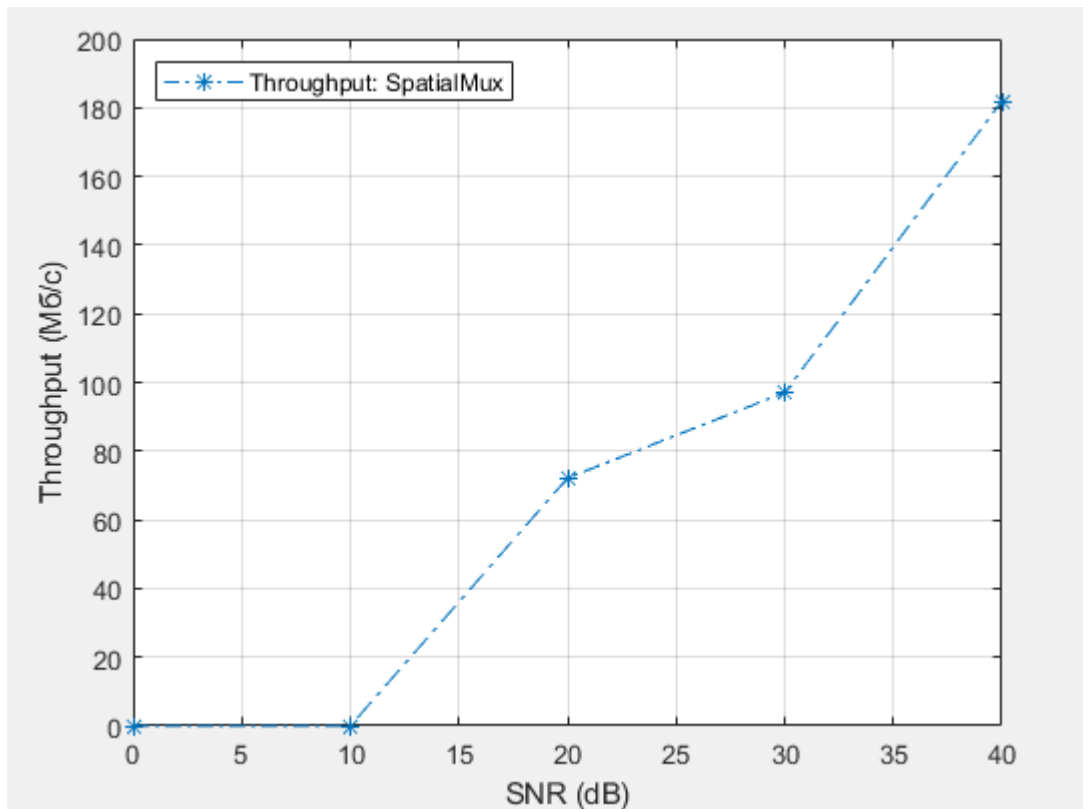


Рисунок 3.14. Залежність пропускної здатності (Мбіт/с) від SNR dB

```

-- Parameter summary: -----
      Duplexing mode: FDD
      Transmission mode: TM4
      Transmission scheme: SpatialMux
Number of downlink resource blocks: 100
Number of allocated resource blocks: 100
Cell-specific reference signal ports: 4
  Number of transmit antennas: 4
    Transmission layers: 4
      Number of codewords: 2
        Modulation codeword 1: 16QAM
Transport block sizes codeword 1:  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664
Code rate codeword 1:  0.6904  0.6676  0.6676  0.6676  0.6676  0.676  0.6676  0.6676  0.6676  0.6676
Modulation codeword 2: 16QAM
Transport block sizes codeword 2:  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664  61664
Code rate codeword 2:  0.6904  0.6676  0.6676  0.6676  0.6676  0.676  0.6676  0.6676  0.6676  0.6676

```

Рисунок 3.15. Параметри модулювання з 16QAM

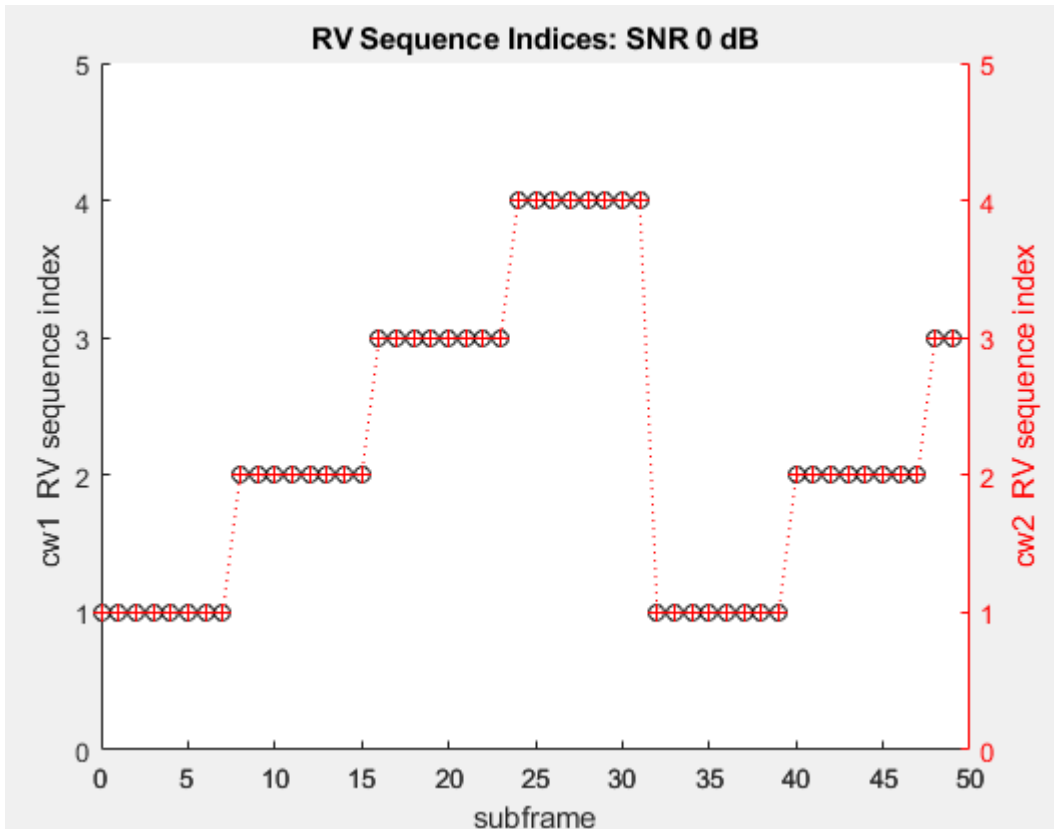


Рисунок 3.16. Прийом 5 фреймів з рівнем SNR 0 dB

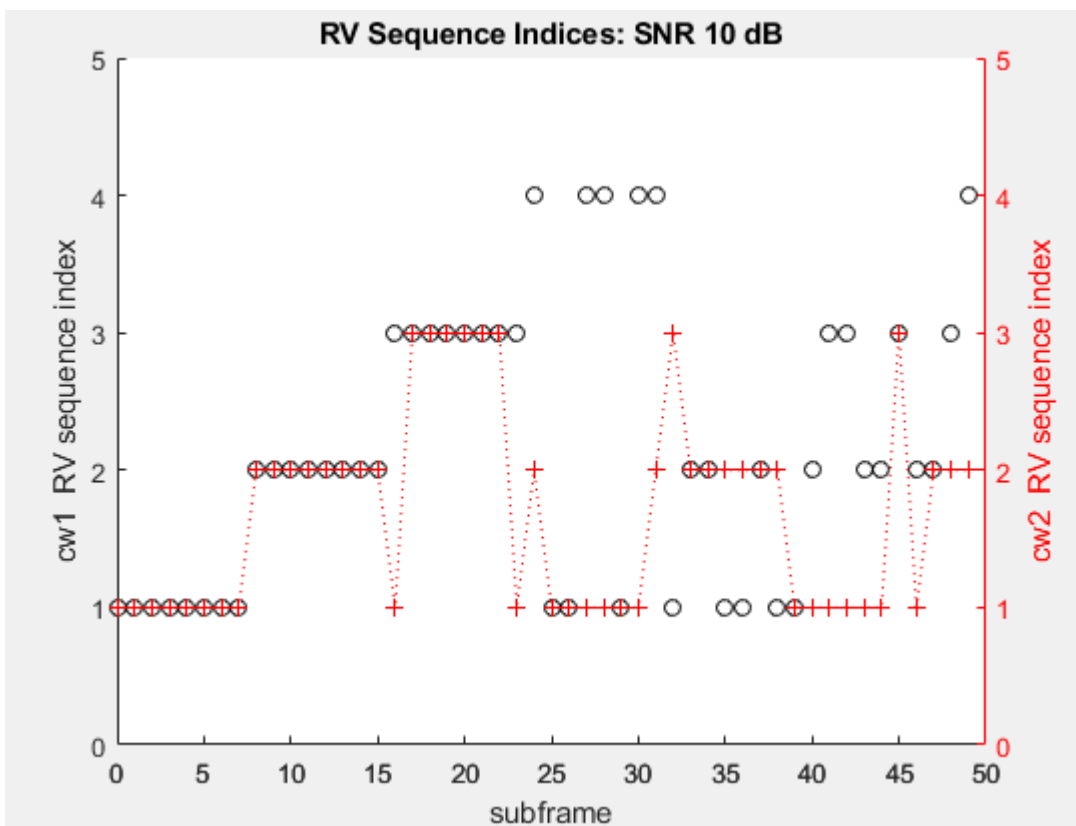


Рисунок 3.17. Прийом 5 фреймів з рівнем SNR 10 dB

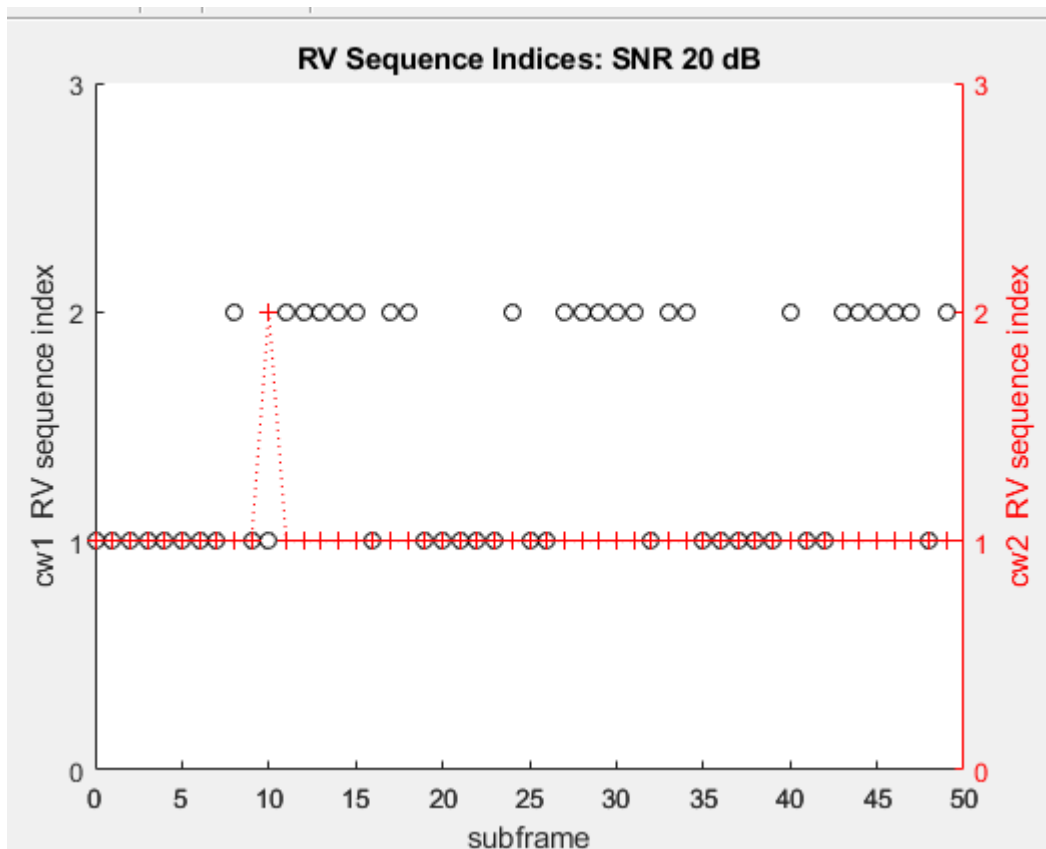


Рисунок 3.18. Прийом 5 фреймів з рівнем SNR 20 dB

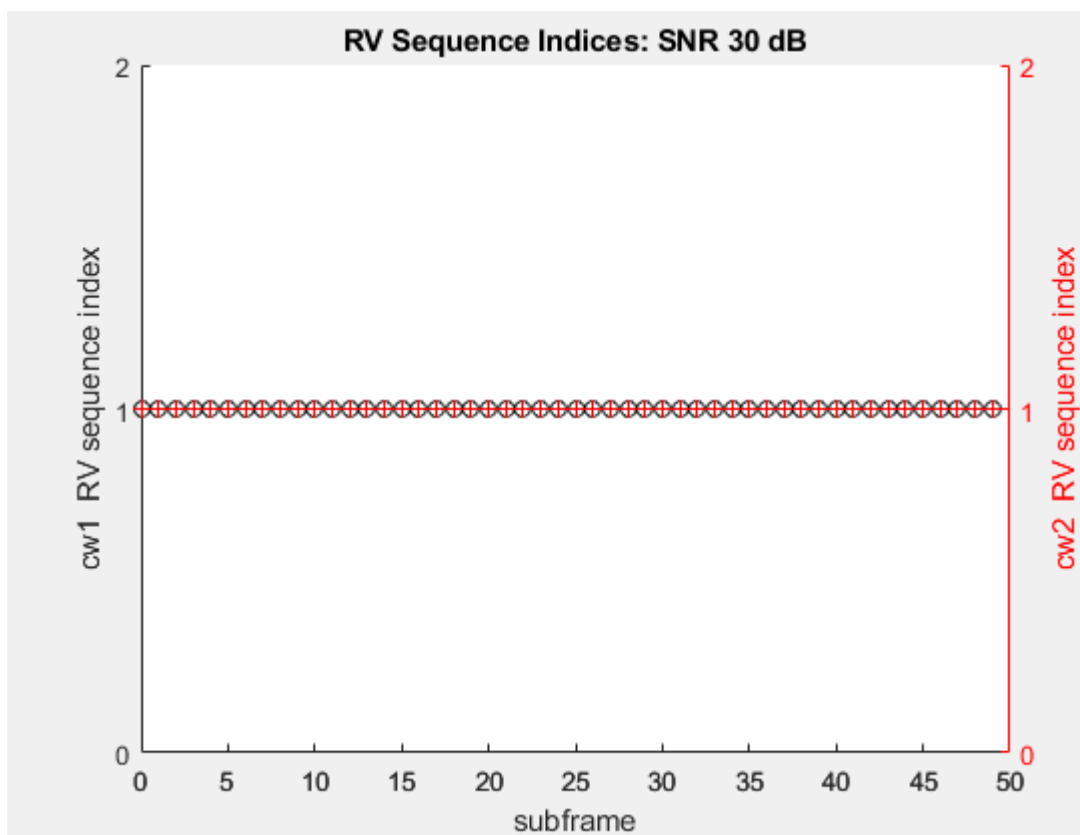


Рисунок 3.19. Прийом 5 фреймів з рівнем SNR 30 dB

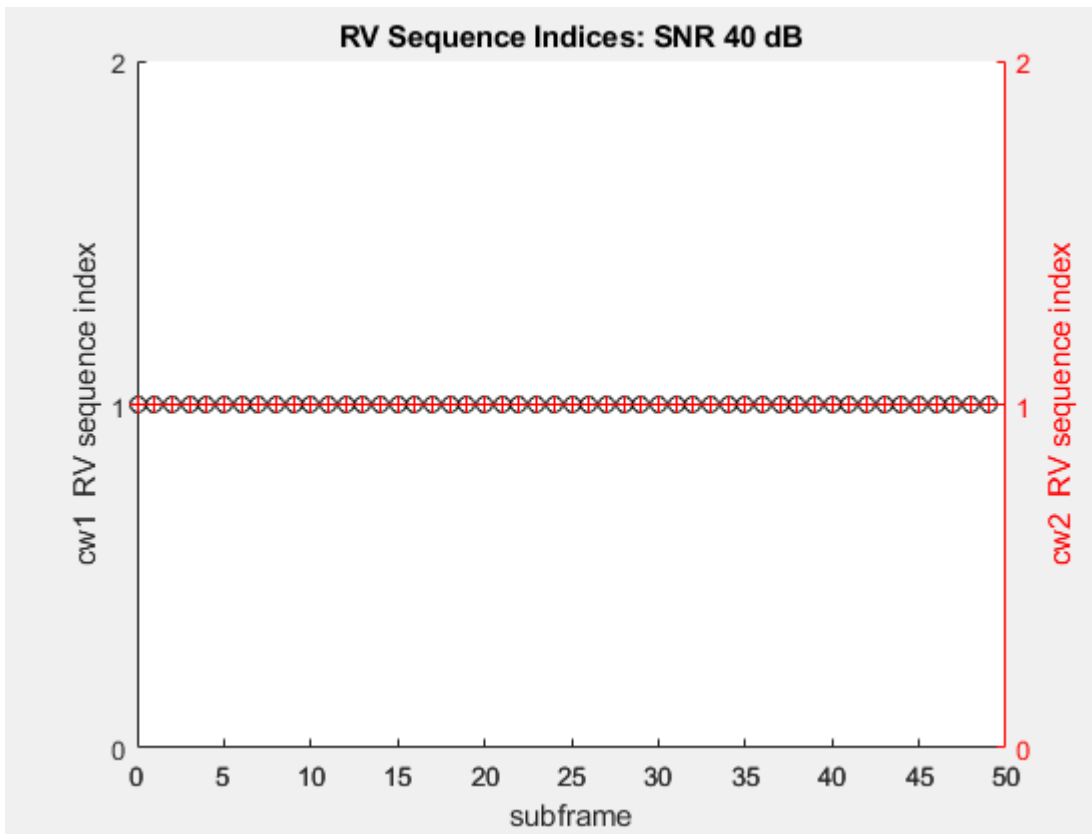


Рисунок 3.20. Прийом 5 фреймів з рівнем SNR 40 dB

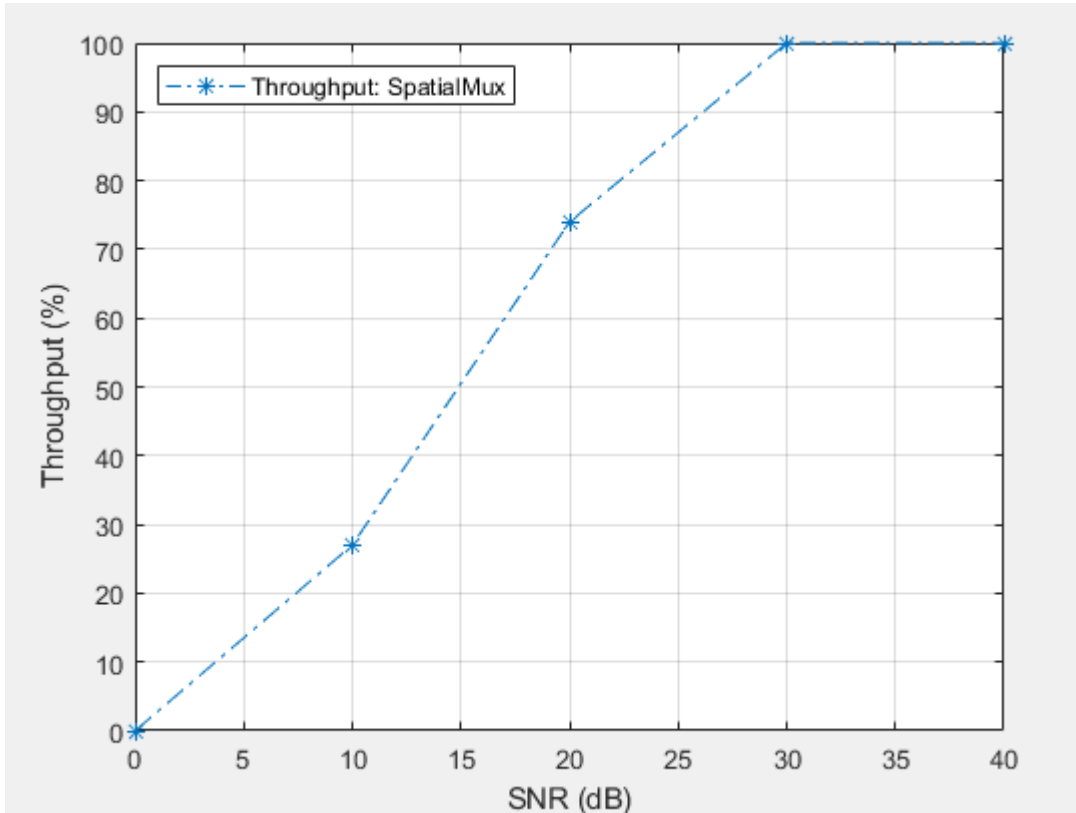


Рисунок 3.21. Залежність пропускної здатності (%) від SNR dB

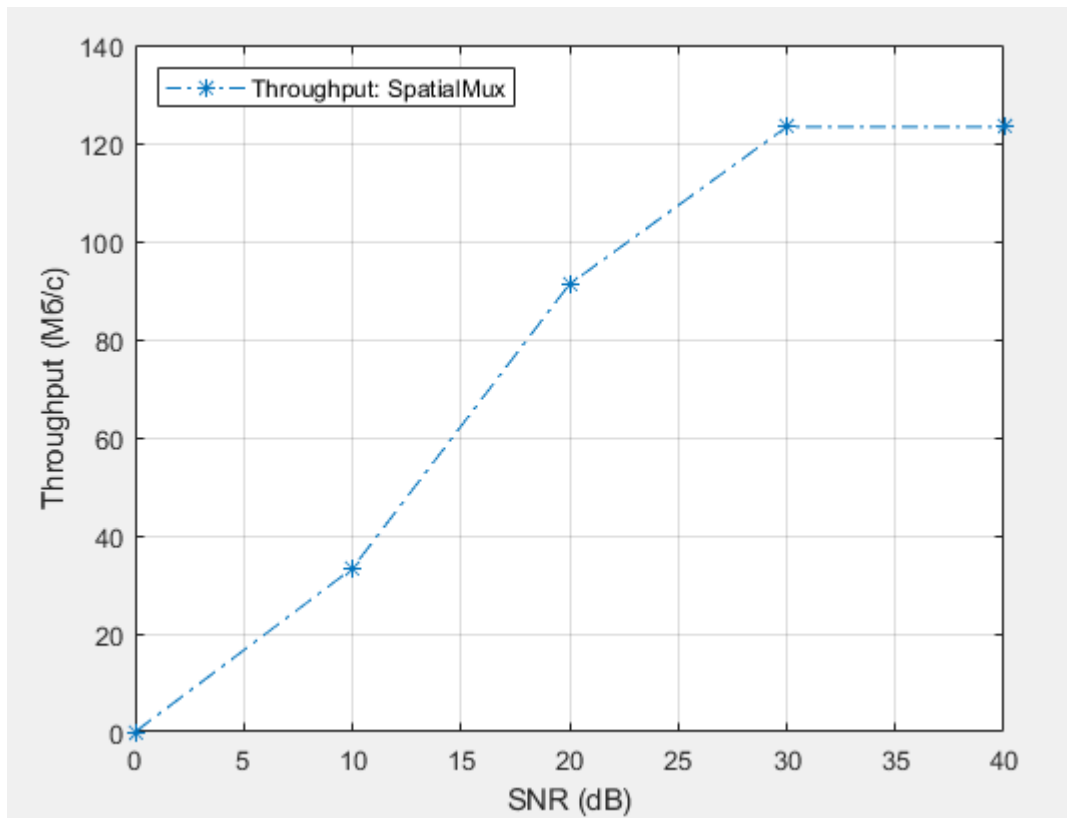


Рисунок 3.22 Залежність пропускної здатності (Мбіт/с) від SNR dB

0 dB: Throughput(Mbps) for 5 Frame(s) = 0.0000

Throughput(%) for 5 Frame(s) = 0.0000

10 dB: Throughput(Mbps) for 5 Frame(s) = 33.2986

Throughput(%) for 5 Frame(s) = 27.0000

20 dB: Throughput(Mbps) for 5 Frame(s) = 91.2627

Throughput(%) for 5 Frame(s) = 74.0000

30 dB: Throughput(Mbps) for 5 Frame(s) = 123.3280

Throughput(%) for 5 Frame(s) = 100.0000

40 dB: Throughput(Mbps) for 5 Frame(s) = 123.3280

Throughput(%) for 5 Frame(s) = 100.0000

3.2 Параметри для оцінки моделювання

3.2.1. Теоретичні результати

Швидкість передачі, спектри сигналу та інші параметри залежать від початкових даних, які задаються в залежності від якості каналу. Це такі параметри як: модуляція, надлишкове кодування, виділена полоса пропускання. Також вони залежать і від використання технологій SISO або MIMO. Так, при використанні MIMO 2x2 швидкість збільшується вдвічі.

Розглянемо найкращий можливий варіант для абонентського обладнання типу LTE Cat 6.

В полосі пропускання LTE 20 МГц є 100 ресурсних блоків. Кожен ресурсний блок містить в собі $12 \times 7 \times 2 = 168$ символів на мілісекунду (12 піднесучих, 7 OFDM символів, 2 тайм-слоти). Отже отримуємо 16800 символів/мс або 16800000 символів/с. При використанні модуляції 64 Qam (6 біт на символ) пропускна здатність каналу $16.8 \times 6 = 100.8$ Мбіт/с з системою SISO (Single Input Single Output).

При використанні максимально можливого методу рознесення MIMO 4x4 швидкість збільшується в 4 рази. 25% всіх OFDM символів використовуються для службових повідомлень. Тобто пропускна здатність нисхідного каналу близька 300 Мбіт/с. Така швидкість у реальних умовах майже неможлива, оскільки не повинно використовуватись надлишкове кодування, а навіть у найкращій із нині існуючих категорій якості передачі (26 категорія) швидкість коду – 0.87-0.9 (тобто на 9 інформаційних символів 1 надлишковий символ).

В технології LTE-A можлива агрегація до 5 несучих, тобто максимальна смуга пропускання – 100 МГц (500 ресурсних блоків), модуляція КАМ-256, та схема передачі MIMO 8x8, що дозволяє передавати дані із максимальною швидкістю 3 Гбіт/с, а приймати із швидкістю 1.5 Гбіт/с.

3.2.2. Практичні результати

В реальних умовах якість передачі та прийому інформації набагато менша. Компанія Opensignal проводить збір даних про швидкість передачі даних в технології LTE в різних країнах. Найкраща середня швидкість зареєстрована у Південній Кореї 52.4 Мбіт/с в якій вперше масово почала впроваджуватись технологія LTE-A. В Україні середня зареєстрована швидкість 11.2 Мбіт/с.

Download Speed Experience

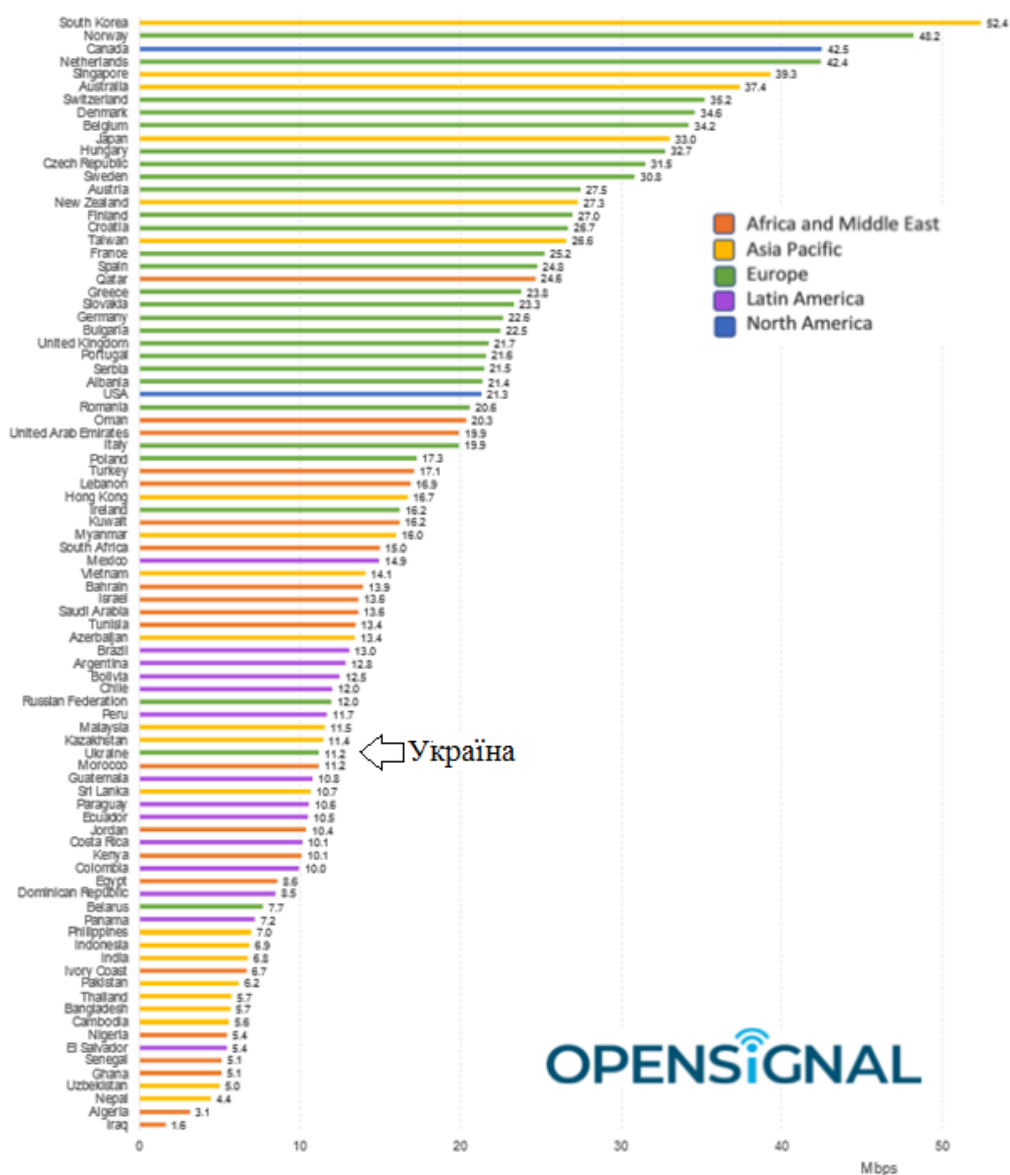


Рисунок 3.23. Швидкість нисхідного каналу в різних країнах

Треба зважати, що швидкість передачі та прийому також залежить від категорії абонентського обладнання (LTE Cat).

Downlink			Uplink			
DL UE Category	Max data rate in Mbps	DL MIMO Layers	UL UE Category	Max data rate in Mbps	64QAM Support	256QAM Support
M1	~ 1 Mbps	1	M1	~ 3 Mbps	No	No
M2	~ 4 Mbps		M2	~ 7 Mbps		
0	~ 1 Mbps		0	~ 1 Mbps		
1bis	~ 10 Mbps		1bis	~ 5 Mbps		
4	~ 150 Mbps	2	3	~ 50 Mbps	Yes	
6	~ 300 Mbps	2 or 4	5	~ 75 Mbps	No	
7	~ 300 Mbps		7	~ 100 Mbps	Yes	
9	~ 450 Mbps		8	~ 1500 Mbps		
10	~ 450 Mbps		13	~ 150 Mbps		
11	~ 600 Mbps		14	~ 9500 Mbps		
12	~ 600 Mbps		15	~ 220 Mbps		
13	~ 390 Mbps	8	16	~ 100 Mbps		Yes
14	~ 3900 Mbps		17	~ 2100 Mbps		
15	~ 800 Mbps		18	~ 210 Mbps		
16	~ 1050 Mbps	2 or 4	19	~ 13500 Mbps	Yes	
17	~ 25000 Mbps	8	20	~ 315 Mbps		
18	~ 1200 Mbps	2, 4 or 8	21	~ 300 Mbps	No	
19	~ 1600 Mbps					
20	~ 2000 Mbps					
21	~ 1400 Mbps	2 or 4				

Таблиця 3.1 – Параметри різних категорій абонентського обладнання LTE



Рисунок 3.24 Найбільша досягнута швидкість при вимірюванні



Рисунок 3.25 Швидкість передачі при SNR 40 dB

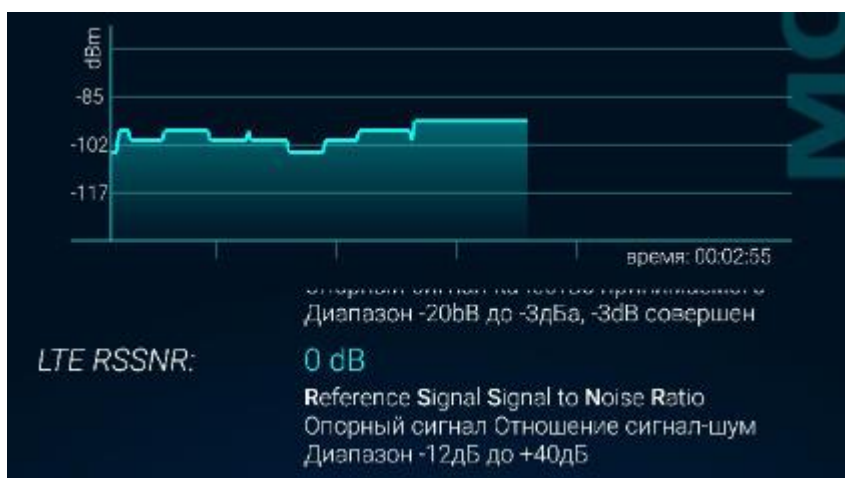


Рисунок 3.26.Швидкість передачі при SNR 0 dB

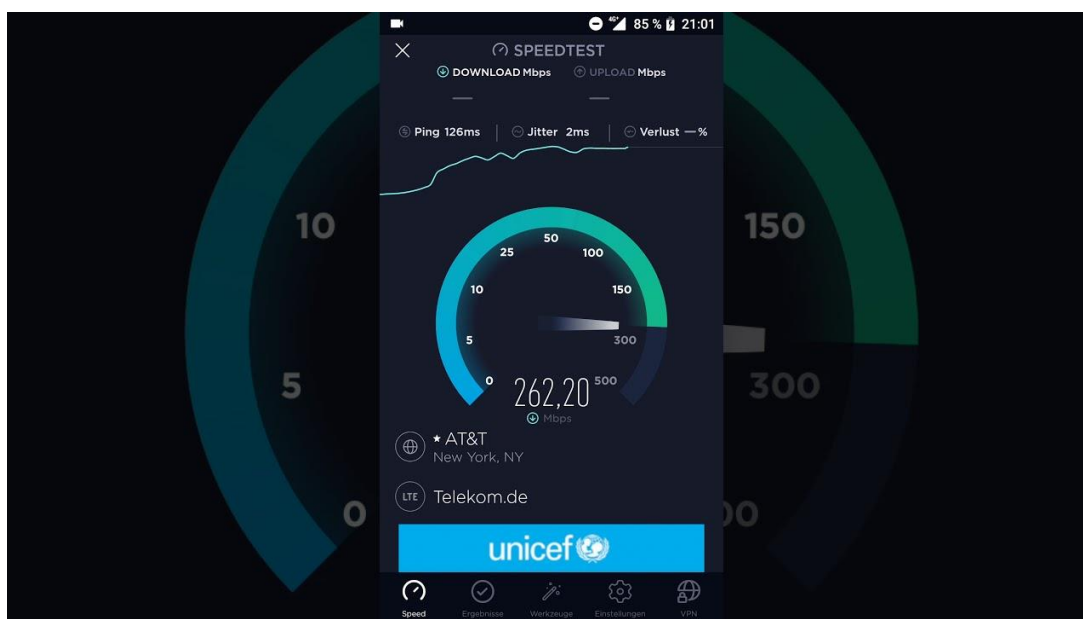


Рисунок 3.27 . Швидкість, що була досягнена на UE LTE Cat 6

Мала швидкість на практиці може пояснюватись багатьма факторами : малий рівень сигнал/шум, замирання в каналі, загруженість каналу, неідеальність розробленої мережі LTE, а також тим що оператори встановлюють ліміт на використання трафіком, після проходження певного показника використання трафіку. Для Vodafone та Київстар це 3 Гбіт на день , після використання яких встановлюється ліміт на швидкість передачі 0.8 Мбіт/с. Така необхідність виникла через збільшення трафіку після впровадження технології LTE.

Висновки до розділу 3

В даному розділі було створено модель нисхідного каналу LTE DL-SCH , проведено моделювання, а отримані результати було порівняно з реальними. Максимальна зареєстрована швидкість прийому при моделюванні та при реальних замірах майже ідентичні.

Висновок

В даній роботі була представлена та програмно описана модель DLSCN каналу LTE. Результати моделювання представлені для абонента, який обслуговується без черги, з максимально можливою смугою пропускання. На практиці такий випадок буває рідко. Проте для ідеалізованих умов ця модель показує реальні вихідні параметри. Плюсом цієї моделі є можливість змінювати велику кількість вхідних даних, тобто є високоманіпульованою моделлю.

При порівнянні модельованих результатів з практичними, необхідно враховувати всю можливу неідеальність фізичного каналу на практиці, а саме: завантаженість каналу, малий показник сигнал/шум, застарілість абонентського обладнання та ін, - необхідно врахувати ще й те, що оператори ставлять обмеження на величину використаного трафіку для одного абонента 3Гбіт/день, після використання якого швидкість в нисхідному каналі падає до 0.8 Мбіт/с.

Як видно з результатів моделювання : 300 Мбіт/с – величина швидкості нисхідного каналу, яку неможливо досягнути, оскільки ,навіть при ідеальних умовах передачі, при передачі завжди буде використовуватись надлишкове кодування. При SNR 40 dB (ідеальні умови прийому) не всі фрейми передаються в першому процесі HARQ. Тобто швидкість, що заявлена виробниками не відповідає дійсності.

Список використаної літератури

1. Гольдштейн, Б.С. Мережі зв'язку: підручник для ВНЗ / Б.С. Гольдштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновський. - СПб .: БХВ-Петербург, 2010. - 400с., Мул. 120
2. Шнепс-Шнепп, М.А. Система сигналізації SS7 і її уразливості // International Journal of Open Information Technologies. - 2015. - vol. 3, no. 5. - С.1-13. - ISSN: 2307-8162
3. Закіров, З.Г. Надеев А.Ф., Файзулін Р.Р. Стільниковий зв'язок стандарту GSM / З.Г. Закіров, А.Ф. Наді, Р.Р. Файзулін. - М .: Еко-Трендз, 2004. - 264с.
4. Ратинський М.В. Основи стільникового зв'язку / Под ред. Д. Б. Зіміна - М .: Радио и связь, 1998. - 248 с.
5. Кааранен, Х. Мережі UMTS. Архітектура, мобільність, сервіси / Х. Кааранен, А. Ахтіайнен [и др.]. - М .: Техносфера, 2007. - 464 с.
6. Оліфер, В.Г. Комп'ютерні мережі. Принципи, технології, протоколи / В.Г. Оліфер, Н.А. Оліфер. - 3-е изд. - СПб .: Пітер, 2009. - 960 с.
7. Громаков, Ю.А. Стандарти і системи рухомого радіозв'язку. - М .: Еко-Трендз, 1997. - 240 с.
8. Іглін С.П. Теорія ймовірностей і математична статистика на базі MATLAB. Видавництво НТУ "ХПІ", 2006, Харків, Україна, 612 с.
9. Сайт ТОВ «Ксітал» [Електронний ресурс] - URL: <http://www.ksytal.ru/public.htm>. (Дата звернення: 21.11.2012 р).
10. Невдяев, Л.М. Мобільний зв'язок 3-го покоління // Серія видань «Зв'язок і бізнес». - М .: ТОВ «Мобільні комунікації», 2000. - 208 с.
11. Биховський, М.А. Принципи, алгоритм і методика частотно-територіального планування регіональних мереж транкінгового радіотелефонного зв'язку в діапазоні 800 МГц / М.А. Биховський, С.Н. Дудукін, Н.В. Смирнов, В.О. Тихвинський // Мобільні телесистеми. - 1998. - №5. - С.33-40.

12. Захист інформації в системах мобільного зв'язку: Навчальний посібник для вузів / А.А. Чекалін, А.В. Зоря, С.В. Скриль і ін., Під загальною науковою редакцією доктора техн. наук А.В. Заряєва і доктора техн. наук С.В. Приховав. - 2-е вид. испр. і доп. - М.: Горяча лінія-Телеком, 2005. - 171 с.
13. Варакин, Л.Є. Теорія систем сигналів. - М.: Сов. Радіо, 1978. - 304 с.
14. Росляков, А.В. ОКС №7: архітектура, протоколи, застосування. - М.: Еко-Трендз, 2008. - 320 с.
15. Бакланов, І.Г. NGN: принципи побудови та організації / під ред. Ю.Н. Чернишова. - М.: Еко-Трендз, 2008. - 400 с.
16. Вишневський, В.М. Широкопasmові бездротові мережі передачі інформації. / В.М. Вишневський, А.І. Ляхов, С.Л. Кравець, І.В. Шахновіч. - М.: Техносфера, 2005. - 592 с.
17. IEEE 802.11 Standard Group Web Site. (назва специфікацій, рік). Available from: <http://www.ieee802.org/11/>.
18. IEEE 802.16 Standard Group Web Site. (назва специфікацій, рік). Available from: <http://www.ieee802.org/16/>.
19. Шварц, М. Мережі зв'язку: протоколи, моделювання та аналіз: [В 2 ч.] Ч. II / М. Шварц; пер. з англ. В. І. Неймана. - М.: Наука, 1992. - 272 с. (91)
20. Соловйов, Ю.А. Системи супутникової навігації. - М.: Еко-Трендз, 2000. - 270с.
21. FCC. Technology Transitions, Order, Report & Order and Further Notice of Proposed Rulemaking, Report Order, Order and Further Notice of Proposed Rulemaking, Proposal for Ongoing Data Initiative, GN Docket No. 13-5, FCC 14-5 (rel. Jan. 31, 2014 року).
22. Шварц, М. Мережі зв'язку: протоколи, моделювання та аналіз: [В 2 ч.] Ч. I / М. Шварц; пер. з англ. В. І. Неймана. - М.: Наука, 1992. - 336 с.
23. Гольдштейн, Б.С. IP-телефонія / Б.С. Гольдштейн, А.В. Пінчук, А.Л. Суховицького. - М.: Радио и связь, 2001. - 336 с.

24. Система Гонець [Електронний ресурс] - URL:<http://www.gonets.ru/news.php> (Дата звернення: 11.10.2013 г.)
25. Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Еддінс Цифрова обробка зображень в середовищі MATLAB. Москва: Техносфера, 2006. - 616 с., Кол. іл., ISBN 5-94836-092-X, формат 70x100 / 16, обкладинка. Серія "Світ цифрової обробки".
26. Сайт Альфа Телеком [Електронний ресурс] - URL: <http://www.iridium.ru/> (Дата звернення: 18.09.2014 г.)
27. Сайт ГлобалТел [Електронний ресурс] - URL:<http://www.globaltel.ru/> (Дата звернення: 11.10.2013 г.)
28. Шварц, М. Мережі ЕОМ: Аналіз і проектування / М. Шварц: пров. з англ. В. М. Вишневського, А. С. Твердохлебова під ред. В. А. Жожикашвили. - М.: Радио и связь, 1981. - 336 с.
29. Шнепс-Шнепп, М. А. Про створення єдиного інформаційного простору суспільства / М. А. Шнепс-Шнепп, Д. Є. Наміот, В. А. Сухомлин // International Journal of Open Information Technologies. - 2015. - vol. 3, no. 2. - С. 1-10.
30. Лазарев, В.Г. Динамічне управління потоками інформації в мережах зв'язку / В.Г. Лазарев, Ю.В. Лазарев. - М.: Радио и связь, 1983. - 235 с.
31. Назаров, А.Н. АТМ: Технічні рішення створення мереж \ А.Н. Назаров, І. А. Разживин, М.В. Симонов. - М.: Горяча лінія-Телеком, 2001. - 376 с.
32. Григор'єва, Н. Високонадійні мобільні мережі 3G для систем відеоспостереження // Бездротові технології. - 2006. - № 6. - С. 51-53.
33. Акімов, В.Н. Особливості побудови систем моніторингу об'єктів ЖКГ на основі пакетних радіомереж / В.Н. Акімов, А.О. Шорін // Спецтехніка і зв'язок. - 2008. - № 2. - С. 49-59.
34. Ширина, Е. Нова лінія GSM - модулів // Бездротові технології. - 2009. - № 9. - С. 18-20.

35. Янкевич, А. HSDPA - все більше даних, все вище швидкості [Електронний ресурс]. URL: <http://www.citforum.ru/nets/wireless/hsdpa/> (Дата звернення: 21.11.2015 р).
36. Буфаліно, А. UMTS, HSDPA і супутні технології / А. Буфаліно, П. Гюнтцер // Бездротові технології. - 2008. - №4. -З. 8-10.
37. Алексєєв, В. Нові модулі та модеми GSM / GPRS / EDGE фірми Enfora / В. Алексєєв, Т. Торстен // Бездротові технології. - 2008. - №1. - С. 9-16.
38. Дианов, І. M2M - системи віддаленого управління і моніторингу / І. Дианов, В. Серганов, А. Упоров // Бездротові технології. - 2007. - №2. - С. 31-33
39. Архипкин, А. Порівняльний аналіз перспективних систем абонентського радіодоступу / А. Архипкин, А. Кириленко // Бездротові технології. - 2007. - №3. - С. 35-38
40. Перекрестов, І.С. Організація мобільного доступу до мультимедійних даними // І.С. Перекрестов, О.А. Решетняк, Є.Г. Тихий // Цифрові технології. - 2008. - №4. - С. 86-92
41. Пушкарьов, О. GSM - продукти компанії Wevecom // Бездротові технології. - 2009. - №1. - С. 22-24
42. Дианов, І. Підвищення надійності передачі технологічної інформації в стільникових мережах. Рішення на базі спеціалізованих терміналів GSM / GPRS / І. Дианов, В. Серганов, А. Упоров, А. Пукса // Бездротові технології. - 2007. - №4. - С. 30-33
43. Капустін, Р.А. Особливості радіоінтерфейсу системи IMT-MS-450 1XEV-DO // Мобільні системи. - 2004. - №5. - С. 96-100
44. Єрохіна, І. МТС проникла в лічильники // Коммерсант. - 2009. - № 204 / П (4259). - С. 4-6
45. Stasiak, M. Modeling and Dimensioning of mobile networks from GSM to LTE / MaciejStasiak, MariuszGłabowski, Arkadiusz Wisniewski, Piotr Zwierzykowski. - John Wiley & Sons Ltd. - 2011. - P. 136

46. Фіногенов, А.Г. Бездротові технології передачі даних для створення систем управління і несе персональну інформаційної підтримки [Електронний ресурс] // Портал інформаційно-комунікаційні технології в освіті. - URL: <http://www.ict.edu.ru/> (Дата звернення: 16.04.2015).
47. Нейман, В.І. Новий напрямок в теорії телетрафіка // Електрозв'язок. - 1998. - № 7. - С. 27-30.
48. Antonova, VM Analytical Modeling and simulation of admission control scheme for non-real time services in LTE networks / VM Antonova, IA Gudkova, EV Markova, PO Abaev // Proceedings - 29th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS. - 2015. - P. 689-695.
49. Антонова, В.М. Аналіз моделі поділу ресурсів в соте мережі LTE / В.М. Антонова, А.С. Козлова // Конференція «Інфоком 2016») Північно-Кавказький філія Московського технічного університету Зв'язки та Інформатики - Ростов н / Д. - 2016. - С.24-27.
50. Антонова, В.М. Вивчення основних особливостей сигналів мереж LTE / В.М. Антонова, С.В. Малигіна, К.А. Шпагіна // Інноваційний розвиток. - Перм. - 2017. - №10 (15). - С. 24-26.
51. Antonova, VM Automatic scheduling of monorail transport system / VM Antonova, DO Volkov, NA Kuznetsov, AM Starostenko // International conference Engineering & Telecommunications - En & T. - M. - 2016. - P.18-22.
52. Антонова, В.М. Аналіз основних вразливостей мереж стандарту LTE / В.М. Антонова, Н.Є. Богомолова // Фундаментальні проблеми радіоелектронного приладобудування INTERMATIC-2016: Праці міжнародної наук.-техніч. конф. - М. : MIPEA. - 2016. - С. 146-150.
53. Antonova, VM Math modeling of passenger traffic in the monorail transport system / VM Antonova, DO Volkov, NA Kuznetsov, AM Starostenko // IEEE Proceedings - 2016 10th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. - M. - 2016. - P. 90-94.

54. Кучерявий, А.Е. Мережі зв'язку наступного покоління / А.Є. Кучерявий, А.Л. Цупрікова - М.: ФГУП ЦНИИС, 2006. - 280 с.
55. Цитович, І.І. Стійкі моделі трафіку мультисервісних мереж. - (Праці Російського науково-технічного товариства радіотехніки, електроніки і зв'язку імені О. С. Попова. Серія: наукова сесія, присвячена Дню радіо. Випуск LX-2). - М, 2005. - Т.2. - С. 271-273.
56. Степанов, С.Н. Теорія телетрафіка: концепції, моделі, програми. - М.: Гаряча лінія-Телеком, 2015. - 886 с.
57. Корнишев, Ю.Н. Теорія телетрафіка: Підручник для вузів / Ю.М. Корнишев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. - М.: Радио и связь, 1996. - 272 с.
58. Назаров, А.Н. Моделі трафіку служб з бітовою швидкістю передачі інформації в широкосмугових цифрових мережах інтегрального обслуговування // Автоматика і телемеханіка. - 1998. - № 8. - С.14-26.
59. Звіт про прикладних наукових дослідженнях і експериментальних розробках по темі «Розробка проекту, створення і випробування експериментального транспортного ділянки і системи автоматичного управління рухом надземної транспортної системи типу Н-Ваhm». Етап 4, Проведення дослідних випробувань (проміжний). Шифр «2014-14-582-0002-015».
60. Кшиштоф, В. Системи рухомого радіозв'язку / пер. з польського І.Д. рудинського; під ред. А.І. Ледовських. - М.: Гаряча лінія-Телеком, 2006. - 536 с.
61. Willinger, W. Self-similar traffic modeling for high-speed network / W. Willinger, D. Wilson, M. Taqqu // ConneXions. - November, 1984. - P. 203-213
62. Невдяев, Л.М. Персональна супутниковий зв'язок / Л.М. Невдяев, А.А. Смирнов. - М.: Еко-Трендз, 1998. - 216 с.

63. IEEE Std 802.15.1-2005 - Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)
64. Elster, Itron, Landis + Gyr, NICT and Silver Spring Networks Drive Adoption of IEEE 802.15.4g
65. Юдінцев, В. Система відеоспостереження з бездротовим WiMAX - з'єднанням // Системи безпеки. - 2008. - №1. - С. 201
66. Джамаліпур. А. Бездротовий мобільний Інтернет: архітектура, протоколи і сервіси. - М.: Техносфера, 2009. - 496 с.
67. Intel Mesh Networks Demonstrations. - URL: http://www.intel.com/idf/us/fall2003/presentations/F03USWNTS116_OS.pdf (Дата звернення: 14.07.2016)
68. Akyildiz, IF Wireless sensor and actor network: research challenges, Ad Hoc Networks 2 / IF Akyildiz, IH Kasimoglu. - 2004. P. 351-367.
69. Bhatia, R. On power efficient communication over multi-hop wireless networks: joint routing, scheduling, and power control / R. Bhatia, M. Kodialam // IEEE Annual Conference on Computer Communications (INFOCOM). - 2004. - P.1457-1466.
70. Травнева, В. Бездротові сенсорні мережі. // Електроніка: Наука, Технологія, Бізнес. - 2005. - №2. - С. 18 - 22.
71. Кучерявий, А.Е. Від е- Росії до u- Росії. Тенденції розвитку електрозв'язку / А.Є. Кучерявий, Е.А. Кучерявий // Електрозв'язок. - 2005. - № 5. - С. 10-11.
72. Сергієвський, М. Бездротові сенсорні мережі [Електронний ресурс] // Комп'ютер прес. - 2007. - №8. - URL: <http://www.compress.ru/article.aspx?id=17950&iid=831#begin> (Дата звернення: 14.07.2016).
73. Вишневський, В. Бездротові сенсорні мережі в системах промислової автоматики / В. Вишневський, Г. Гайкович // Електроніка: Наука, технологія і бізнес. - 2008. - №1. - С. 106-110.

74. Bleicher, A. LTE-Advanced Is the Real 4G [Електронний ресурс]. - 2013. - URL: <https://spectrum.ieee.org/telecom/standards/lte-advanced-is-the-real-4g> (Дата звернення: 23.01.2015).
75. Сайт Інституту точної механіки та обчислювальної техніки ім. С.А. Лебедева РАН [Електронний ресурс] - URL: http://www.ipmce.ru/img/release/is_sensor.pdf (Дата звернення: 05.07.2012)
76. Пехтерев, С. Мобільний VSAT // Технології і засоби зв'язку. (Спеціальний випуск. Супутниковий зв'язок і мовлення). - 2009. - С. 77-79.
77. Шахновіч, І. Персональні бездротові мережі стандартів IEEE 802.15.3 і 802.15.4 // Електроніка: Наука, Технологія, Бізнес. - 2004. - №6. - С. 32-36.
78. AN INTRODUCTION TO LTE. LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS. // Christopher Cox. - UK .: John Wiley & Sons Ltd, 2012. - P. 486
79. Алексеев С.Р., Чеснокова О.В. MATLAB 7. Самовчитель. ISBN: 5-477-00283-2. Видавництво "НТ Пресс" 2006р. 464 стр.
80. Couet, J. Satellites and Multimedia / J. Couet, D. Maugars, D. Rouffet // Alcatel Telecommunication Review. - Fourth Quarter 1999. - P. 250-257.
81. Звіт про прикладних наукових дослідженнях і експериментальних розробках по темі «Розробка проекту, створення і випробування експериментального транспортного ділянки і системи автоматичного управління рухом надземної транспортної системи типу Н-Вагн». Етап 5, Проведення проведення натурних випробувань, узагальнення результатів ПНІЕР (заключний). Шифр «2014-14-582-0002-015».
82. Поршнеv С.В. MATLAB 7. Основи роботи і програмування. Підручник. ISBN: 5-9518-0137-0. Видавництво "Біном. Лабораторія знань" 2006р. 320 стр.

83. Teledesic. Technology Overview [Електронний ресурс]. - URL: <http://www.teledesic.com/tech/tech.htm> (Дата звернення: 17.08.2014).
84. Akyidiz, IF Wireless mesh networks: a survey / IF Akyidiz, X. Wang, W. Wang // Computer Networks. - 2005. - Jan, 1. - P. 445-487.
85. Антонова, В.М. Переваги використання пікосоти в мережах LTE / В.М. Антонова, Т.В. Овинникова // Конференція «Інфоком 2016» Північно-Кавказький філія Московського технічного університету Зв'язки та Інформатики - Ростов-на-Дону. - 2016. - С.27-29.
86. Erramilli, A. Modeling and Management of Self-Similar Traffic Flows in High-Speed Networks / A. Erramilli, W. Willinger, JL Wang // Network Systems Design. - Gordon and Breach Science Publishers, 1999. - P. 153
87. Perkins, C. Mobile IP // IEEE Communications Magazine. - 1997. - 35 (5). - P. 84-99.
88. Пшеничников, А.П. Теорія телетрафіка - М .: Гаряча лінія - Телеком 2017, 212 стор.
89. Гандер В., Гржебічек І. Рішення задач в наукових обчисленнях із застосуванням Maple і MATLAB. ISBN: 985-6642-06-X. Видавництво "Вассамедіна" 2005р. 520 стр.
90. Макграт, М. Створення додатків на Android для початківців. // ISBN: 978-5-699-81145-8 М .: Ексмо. 2015. С. 452
91. М.Л. Подкур, П.Н. Подкур, Н.К. Смоленцев. Програмування в середовищі Borland C ++ Builder з математичними бібліотеками MATLAB. М .: ДМК Пресс, 2006 - 496 с .: іл., CD.
92. Кривільєн, А. Основи комп'ютерної математики з використанням системи MATLAB. Лекс-Книга, 2005
93. Клейнрок, Л. Обчислювальні системи з чергами: пров. з англ. - М .: Світ, 1979. - 600 с.
94. Ляхов, А.І. Оцінка взаємозалежності поведінки станцій в локальних бездротових мережах з протоколом IEEE802.11 // А.І. Ляхов, А.В. Баранов, А.В. Вінель. - (VIII міжнародний семінар

- «Розподілені комп'ютерні та телекомунікаційні мережі» - DCCN 05, Софія, Болгарія: Зб. Тр.). - М.: Техносфера, 2005. - С.95-104.
95. Takagi, H. Analysis of polling systems. - MIT Press, 1986. - 175 p.
96. Вишневський, В.М. Математичні методи дослідження системполінга / В.М. Вишневський, О.В. Семенова // Автоматика і телемеханіка. - 2006. - № 2. - С. 3-56.
97. Levy, H. Dominance relations in polling systems / H. Levy, M. Sidi, OJ Vohma // Queueing Systems. - 1990. - vol. 6. - P. 155-172.
98. Altman, E. Queueing in space / E. Altman, H. Levy // Advances in Applied Probability. - 1995. - vol. 26, no. 4. - P. 1095-1116.
99. Kroese, DP Heavy traffic analysis for continuous polling models // Journal of Probability. - 1997. - vol. 34, no. 3. - P. 720-732.
100. Клейнрок, Л. Теорія масового обслуговування: пров. з англ. - М.: Машинобудування, 1979. - 432 с.
101. Степанов, С.Н. Чисельні методи розрахунку систем з повторними викликами. - М.: Наука, 1983. - 230 с.
102. Fricker, C. Monotonicity and stability of periodic polling models / C. Fricker, R. Jaibi // Queueing Systems. - 1994. - vol. 15. - P. 211-238.
103. Nassehi, MM CRMA: an access scheme for high-speed LANs and MANs // IEEE International conference on communications, SUPERCOMM / ICC'90. - 1990. - vol. 4. - P. 1697-1702.
104. Antonova, VM Analytical Modeling and simulation of admission control scheme for non-real time services in LTE networks / VM Antonova, IA Gudkova, EV Markova, PO Abaev // Proceedings - 29th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS. - 2015. - P. 689-695.
105. Антонова, В.М. Імітаційна модель передачі різношвидкісної трафіку в соте мережі LTE / В.М. Антонова, І.А. Цірик // Інформаційно-телекомунікаційні технології та математичне моделювання високотехнологічних систем: Матеріали Всеросійської конф. - М.: РУДН, 2015 - С. 73-75.

106. Антонова, В.М. Управління доступом нових вимог на фрагменті мережі LTE / В.М. Антонова, І.А. Цірик // Фундаментальні проблеми радіоелектронного приладобудування «INTERMATIC--2015»: Тр. Міжнар. наук.-техн. конф. - М.: МІРЕА, 2015. - С.226-228.
107. Антонова, В.М. Метод адаптивної диспетчеризації навантаження на фрагменті мережі LTE / В.М. Антонова, Е.Е. Малікова // Радіоелектронні пристрої та системи для інфокомунікаційних технологій - REC-2013: Матеріали Міжнар. конф. серія: наукові конференції, присвячені дню радіо (випуск LXVIII) РНТОРЕіС ім. Попова. - М., 2013. - С. 33-36.
108. Башарин, Г.П. Лекції з математичної теорії телетрафіка: Учеб. посіб. - М.: РУДН, 2009. - 342с.
109. Антонова, В.М. Дослідження ефективності спільної передачі різнорідного трафіку в соте мережі LTE / В.М. Антонова, Е.Е. Малікова // Т-Comm: Телекомунікації та транспорт. - 2017. - №9. - С. 22-26.
110. Клімов, Г.П. Пріоритетні системи обслуговування з орієнтацією / Г.П. Клімов, Г.К. Мишком. - М.: МГУ, 1979. - 220 с.
111. Буделл, П. Бездротові технології: пров. з англ. - М.: НТ Пресс, 2008. - 441 с.
112. Konheim, AG Waiting Lines and Times in a System with Pollings / AG Konheim, V. Meister // J. ACM. - 1974. - vol. 21, № 3. - P. 470-490.
113. Нейман, В.І. Вирішальний етап інформаційної революції // Електрозв'язок. - 2010. - № 1. - С. 27-32.
114. Степанов, С.Н. Основи теорії телетрафіка мультисервісних мереж. - М.: Еко-Трендз, 2010. - 392 с.
115. Антонова, В.М. Оцінка ресурсапередачі інформації при обслуговуванні різнорідного трафіку в мережах LTE / В.М. Антонова, Д.О. Волков, М.С. Степанов // Природничі та технічні науки. - 2016. - № 11. - С. 183-189.

116. Тихвинський, В.О. Мережі мобільного зв'язку LTE: технологія і архітектура. // В.О. Тихвинський, С.В. Терентьєв, А.Б. Юрчук - М.: Еко-Трендз, 2010. - 284 с.
117. Звіт про прикладних наукових дослідженнях і експериментальних розробках по темі «Розробка проекту, створення і випробування експериментального транспортної ділянки і системи автоматичного управління рухом надземної транспортної системи типу H-Bahn». Етап 3, Розробка технічних рішень системи автоматичного управління рухом (проміжний). Шифр «2014-14-582-0002-015».
118. Акімов, В.Н. Радіомодеми діапазонів VHF / UHF в задачах охорони і моніторингу об'єктів / В.М. Акімов, А.І. Бабин, А.О. Шорін // Спецтехніка і зв'язок. - 2009. - № 1. - С. 50-58.
119. ITU-T Q.764 Signalling System No. 7 - ISDN User Part Signalling Procedures тисяча дев'ятсот дев'яносто дев'ять.
120. Антонова, В.М. Навчально-методичний посібник «Моделювання радіорелейного траси з використанням програмного комплексу« Онега »по курсу« Технології та архітектура мобільних мереж », Антонова В.М., Малікова Е.Е., Шевельов С. В. М.: МТУСИ, 2016 р 56с.
121. Скринніков, В.Г. Радіопідсистеми UMTS / LTE. Теорія та практика. / В.Г. Скринніков // М.: Культура і спорт -2000, 2012. - 864 с.
122. Вишневський, В.М. Енциклопедія WiMAX. Шлях до 4G / В.М. Вишневський, С.Л. Кравець, І.В. Шахновіч. - М.: Техносфера, 2009. - 472 с.
123. ITU-T E.800 Quality of services; concepts, models, objectives, dependability planning. Terms and definitions related to the quality of telecommunication services
124. Антонова, В.М. Особливості застосування методів соціальної інженерії в мобільних мережах стандарту LTE / В.М. Антонова, С.В. Скриль, І.М. Шайков // Телекомунікації: Изд-во «Наука і технології». - 2016. - № 12. - С. 42-46.

125. Антонова, В.М. Оцінка каналного ресурсу для різношвидкісних з'єднань на фрагменті мережі LTE // Природничі та технічні науки. - 2014. - № 10. - С. 277-279.
126. Антонова, В.М. Дослідження взаємного впливу корисного і службового трафіку в мережах LTE / В.М. Антонова, Е.Е. Малікова // Т-Comm: Телекомунікації та транспорт. - 2014. - №7. - С.17-21.