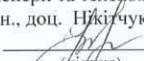


Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Житомирська політехніка»
Факультет інформаційно-комп'ютерних технологій
Кафедра біомедичної інженерії та телекомунікацій

УДК 654.165

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри
біомедичної
інженерії та телекомунікацій
к.т.н., доц. Нікітчук Т.М.


(підпис)

«14» грудня 2021 р.

АТЕСТАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему «Дослідження параметрів мережі стандарту LTE з використанням
технології MIMO»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Виконавець роботи:


(підпис, дата)

Письменник О.В.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник

К.Т.Н., доц.

(науковий ступінь, вчене звання)


(підпис, дата)

Андрєєв О.В.
(ініціали, прізвище)

Житомир
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему « Дослідження параметрів мережі стандарту LTE з використанням
технології MIMO»

Виконав: студента 2 курсу, групи ТРм-20-1
спеціальності 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»

Керівник Андрєєв О.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Коломієць Р.О.
(прізвище та ініціали)

Житомир
2021

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т.М. Нікітчук

«15» січня 2021 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Письменник Олексій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження параметрів мережі стандарту LTE з використання технології MIMO

затверджено наказом по університету від «8» листопада 2021 р. № 546с

2. Мета дослідження: оцінка можливості підвищення пропускну здатності мережі стандарту LTE з використанням технології MIMO

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.) - мережа мобільного зв'язку стандарту LTE з використання технології MIMO.

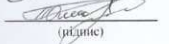
4. Основні задачі дослідження оцінка показників покращення якості роботи мережі стандарту LTE з використання технології MIMO

5. Термін подання роботи до захисту грудень 2021р.

6. Дата видачі завдання «15» січня 2021 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

(підпис)

Андрєв О.В.

(прізвище, ініціали)

Письменник О.В.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

В роботі проведено дослідження мережі мобільного зв'язку стандарту LTE з використанням технології MIMO.

Використання MIMO суттєво збільшує можливість підвищення швидкості передачі даних.

Розроблено математичну та програмну модель мережі мобільного зв'язку з використанням технології передачі даних MIMO.

ANNOTATION

The study of LTE mobile communication network using MIMO technology is carried out in the work.

Using MIMO significantly increases the ability to increase data rates.

A mathematical and software model of a mobile communication network using MIMO data transmission technology has been developed.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота містить 60 сторінок, 23 рисунка, 5 таблиць, 15 джерел посилення.

Ключові слова: технологія MIMO; фазова дисперсія; пропускна спроможність.

В першому розділі проводиться аналіз літературних джерел з метою визначення основних принципів функціонування мережі мобільного зв'язку із використанням технології MIMO.

Другий розділ містить розробку математичного апарату, що дозволяє проводити моделювання та дослідження роботи мережі мобільного зв'язку.

Третій розділ присвячено моделюванню та оцінці результатів моделювання роботи мережі мобільного зв'язку.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено математичний апарат моделювання каналу зв'язку мережі мобільного зв'язку 3G.
2. Розроблено програмну модель на основі математичної моделі каналу зв'язку мережі.
3. Досліджено вплив різних факторів на пропускну здатність каналу зв'язку мережі стандарту LTE з використанням технології MIMO.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Розділ 1 Аналітичний огляд літературних джерел.....	4
1.1 Загальна інформація про LTE та застосування технологій в Україні.....	4
1.2 Основні технічні характеристики та переваги технології.....	13
Розділ 2 Розробка програмної моделі мережі стандарту LTE з використанням технології MIMO.....	21
2.1 Розробка математичної моделі мережі стандарту LTE.....	21
2.2 Модель каналу LTE при рознесеному прийманні.....	29
2.3 Програмна модель LTE каналу.....	36
Розділ 3 Розрахунок параметрів мережі стандарту LTE.....	42
3.1. Дослідження параметрів мережі стандарту LTE з використанням технології MIMO.....	42
3.2. Стійкість до різної якості синхронізації.....	47
3.3 Синхронізація вузлів, у яких відсутній зв'язок.....	50
3.4 Масштабування мережі.....	55
Висновки.....	58
Перелік джерел посилань.....	59

ВСТУП

Сучасний стан розвитку мобільних телекомунікаційних систем вимагає постійного підвищення швидкостей передачі даних. Однією із технологій такого підвищення є технологія передачі та приймання даних через декілька рознесених антен, яка називається МІМО.

З метою покращення якості роботи мережі мобільного зв'язку в роботі проводиться дослідження пропускної здатності каналу мобільного зв'язку стандарту LTE з використанням технології МІМО.

Об'єктом дослідження є мережа мобільного зв'язку .

Предметом дослідження є пропускна здатність каналу зв'язку .

Ціль дослідження – оцінка можливості підвищення пропускної здатності мережі стандарту LTE з використанням технології МІМО.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні роботи:

1. Провести аналіз літературних джерел з метою визначення основних засад технології МІМО;
2. Розробити програмну модель мережі стандарту LTE з використанням технології МІМО;
3. Провести дослідження параметрів мережі мобільного зв'язку стандарту LTE з використанням технології МІМО.

Результати досліджень доповідались на науково-технічній конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2020» 12-13 квітня 2020 року, м. Житомир.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Загальна інформація про LTE та застосування технологій в Україні

Наприкінці 1990-х для розвитку специфікацій для технологій GSM був утворений 3GPP (3rd Generation Partnership Project) – організація, відповідальна за розробку, підтримку та розвиток сімейства стандартів GSM. GSM (від назви групи Groupe Spécial Mobile, пізніше перейменований на Global System for Mobile Communications) — глобальний цифровий стандарт для мобільного стільникового зв'язку, з поділом частотного каналу по принципом TDMA та середнім ступенем безпеки.

Розроблений під егідою Європейського інституту стандартизації електрозв'язку (ETSI) наприкінці 80-х років. З того часу всі стандарти, пов'язані з технологією GSM розробляються та обслуговуються 3GPP. 3GPP, як передбачає його ім'я, складається з низки партнерів. Ці партнери являють собою організації по стандартизації, розташовані по всьому світу і відповідають за: схвалення та обслуговування кордонів дії 3GPP, виділення ресурсів, та роботу в якості апеляційного органу з процедурних питань [13].

Спочатку, GSM розроблялася як мережа з комутацією каналів, що чудово підходить для передачі голосу, але зовсім не підходить передачі даних. Все змінилося з ухваленням General Packet Radio Service (GPRS) стандарту. GPRS надав спосіб пересилання пакетів по мережі GSM, та його часто описують як 2,5G стандарт.

Можливості передачі даних по мережах GSM просунулися ще далі прийняттям стандарту Enhanced Data Rates для GSM Evolution, також відомого як EDGE. Представлена у 2003 технологія EDGE забезпечує втричі більше високу продуктивність у порівнянні з GPRS і сама по собі є 3G технологією, що базується на ITU специфікаціях для 3G. Можливості передачі даних були

ще більш покращені з випуском чергового 3G стандарту від 3GPP під назвою High Speed Packet Access (HSPA).

HSPA мережі теоретично могли забезпечувати низхідній передачі даних до 14 МБ/с. Тому HSPA мережі мали забезпечувати значний приріст низхідної швидкості передачі; проте на практиці це не підтвердилося.

Наприклад, на початку 2009 року компанія Vodafone провела тест HSPA+ мережі, що обіцяла низхідну швидкість обміну даними до 16 МБ/с, проте вони визнали, що більшість користувачів отримає швидкість завантаження, що не перевищує 4 МБ/с. HSPA+, також відома під назвою Evolved HSPA, є розширенням базового стандарту HSPA та забезпечує теоретично можливу швидкість завантаження даних до 56 МБ/с.

Додатковим аспектом технології HSPA+ стала обов'язковою архітектурою all-IP. Архітектура all-IP є основною інновацією у галузі бездротових телекомунікацій, а також необхідним елементом для LTE. HSPA+ також використовує антенну технологію під назвою MultipleInput/MultipleOutput (MIMO) [1].

Як і all-IP архітектура, MIMO є технологією, яка також використовується в LTE.

MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output) - метод просторового кодування сигналу, що дозволяє збільшити смугу пропускання каналу, при якому передача даних здійснюється за допомогою N антен і їх прийому M антенами. Передаючі і приймаючі антени рознесені настільки між собою, аби досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами. У різних реалізаціях MIMO мається на увазі одночасна передача в одному фізичному каналі кількох незалежних повідомлень. З метою реалізації дії MIMO застосовують багатоантенні системи: на передавальній стороні є N_t передавальних антен, а на приймальній стороні N_r приймальних. Дана структура приведена на рисунку 1.1.

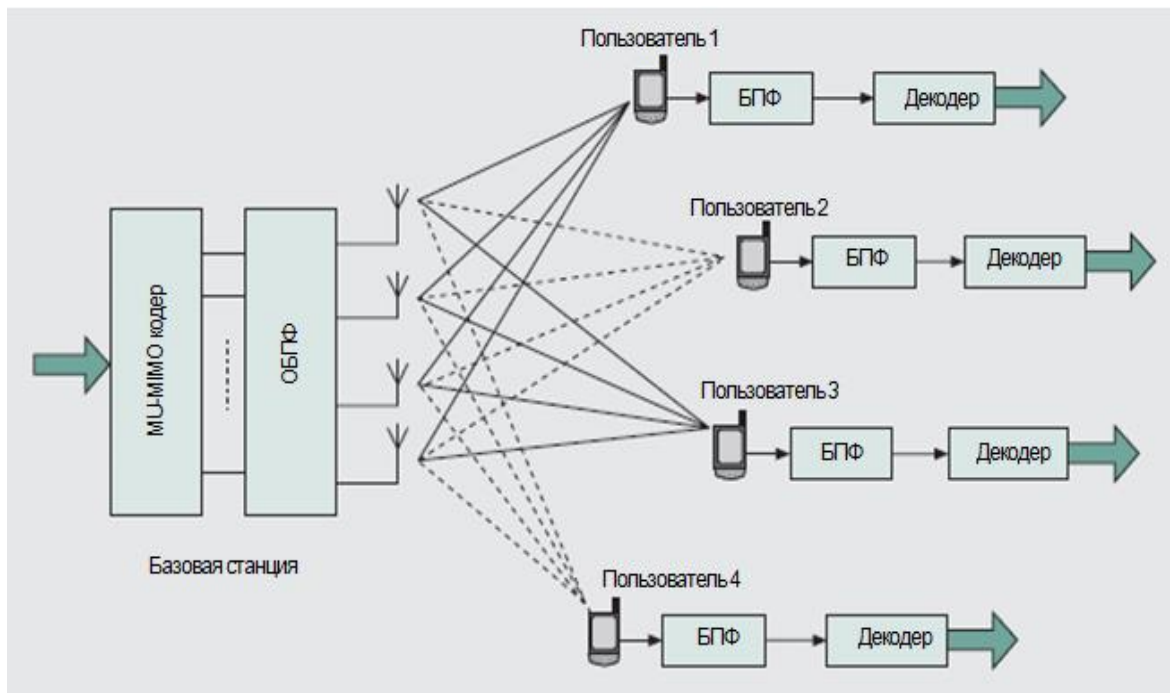


Рисунок 1.1 – Структура MIMO

Існують кілька варіантів застосування MIMO - для збільшення абонентської ємності, при цьому з різних антен передається різна інформація, і для поліпшення покриття. В останньому випадку з декількох антен передається одна і та ж інформація, що дозволяє абонентському пристрою комбінувати сигнал з різних антен, покращуючи його якість.

На даний момент за пріоритетне право називатися ведучою технологією 4G борються: технологія Wimax (заснована на стандарті IEEE 802.16e) та мобільний протокол передачі даних 3GPP Long Term Evolution (LTE) Основна технологія 4G - OFDM (ортогональне частотне ущільнення). Існує багато різних думок про майбутнє мереж 4 покоління: вибір стоїть між мобільним WiMAX та LTE, хоча останнім часом усі більше компаній мобільного сектора віддають перевагу саме останньому. Long Term Evolution (LTE) також є 3G-стандартом бездротового широкосмугового доступу, LTE – останній стандарт сімейства GSM, розвинений на основі GSM на базі архітектур від комутації каналів до All-IP [5].

LTE включає до себе мережу радіодоступу (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) і вдосконалене пакетне ядро (Evolved Packet

Core, EPC). Мережа LTE побудована як сукупність нових базових станцій eNB (Evolved NodeB або eNodeB), де сусідні eNB з'єднані між собою інтерфейсом X2. eNB підключені до EPC за допомогою інтерфейсу S1.

На рисунку 1.2 показано взаємодію нових елементів в архітектурі мережі: S-GW (Serving Gateway) - обслуговують шлюзів, що містять ПО управління по протоколу MM (MME - Mobility Management Entity).

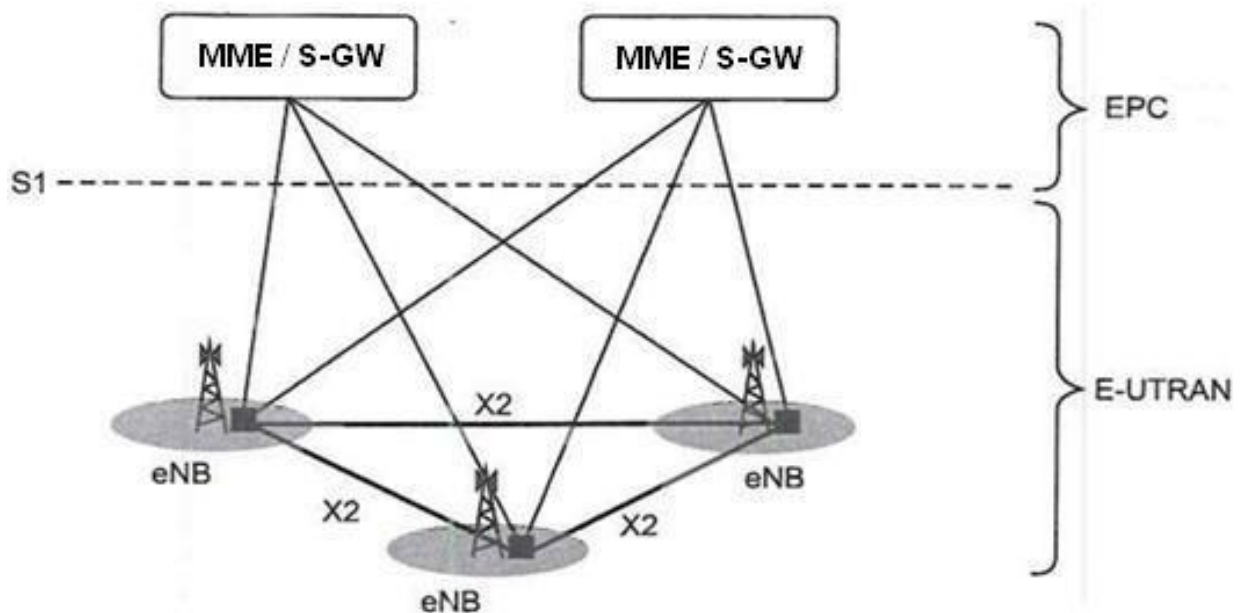


Рисунок 1.2 – Спрощена архітектура мережі LTE

У мережі радіодоступу радіо-інтерфейс між UE і eNB здійснений на основі технології ортогонального частотного рознесення (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDMA). Робота EPC заснована на технології IP. Таку структуру відносять до All-IP Network (AIPN). Структура мережі LTE приведена на рисунку 1.3.

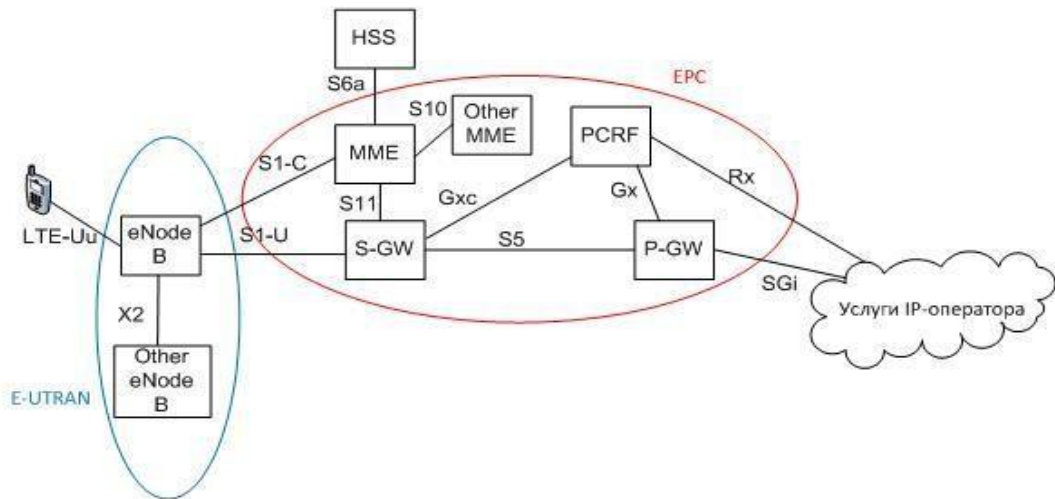


Рисунок 1.3 – Структура мережі LTE

Ядро мережі EPC (Evolved Packet Core) складається з обслуговуючого шлюзу S-GW (Serving Gateway), шлюзу для виходу на пакетні мережі P-GW (Packet Data Network Gateway), структури управління по протоколу Mobility Management MME (Mobility Management Entity), пов'язаної з S-GW і eNodeB сигнальними інтерфейсами.

Частоти LTE На відміну від інших стандартів мобільного зв'язку LTE не прив'язаний до якогось конкретного діапазону частот. В цьому його сила. Розробники (3GPP) визначили понад 30 діапазонів, для яких виробники можуть випускати стандартне радіоустаткування LTE.

Сюди потрапили як частоти, використовувані зараз під інші стандарти (наприклад, 900, 1800 (GSM), 2100 (UMTS), 2500 (WiMAX), так і "нові", наприклад 700-800 МГц (так званий "цифровий дивіденд"). зрозуміло, що далеко не всі з можливих діапазонів знайдуть широке поширення в світі. Швидше за все, в результаті "виживе" не більш 4-5 діапазонів.

Базові станції LTE містять радіомодулі (вони ж приймачі, TRXи), блок цифрової обробки сигналу (BBU), інтерфейсні плати (FE / GE порти, електричні, оптичні). Радіомодулі бувають виносні - RRU. Монтуються поблизу антени (для зменшення втрат в ВЧ-фідері), до BBU підключаються по оптиці (стандарт CPRI). Все як в БС 3G, але називаються красиво - evolved NodeB (дослівно - продукт еволюції «вузла Б», тобто власне БС 3G).



Рисунок 1.4 – Базові станції мереж 4G

А оскільки БС різних стандартів більше схожі, чим відрізняються, виробники швидко здогадалися робити все «в одному флаконі». Рішення називається SingleRAN. Одна БС на 3 стандарти: GSM, 3G і LTE.

Для LTE в якості антен цілком підійдуть звичайні панельні антени з крос-поляризацією. Вони, наприклад, використовуються в мережах GSM і в 3G. Але тут є різниця, - якщо в GSM і 3G дві поляризації зазвичай використовуються на прийом, а на передачу тільки одна (схема 2Rx / 1Tx), то в LTE обидві поляризації задіяні по повній, і на прийом, і на передачу (схема 2Rx / 2Tx). Це необхідно для реалізації технології MIMO2x2. На першому етапі впровадження LTE цього буде достатньо. Далі пропускну здатність сектора можна буде збільшити, додавши ще по одній крос-пол антені. Вийде схема 4Rx / 4Tx і MIMO4x4. Головне рознести антени в просторі на достатню відстань (близько 10 довжин хвиль).

Зона покриття однієї БС в LTE може бути абсолютно різною. Перш за все це залежить від використовуваного діапазону частот. Якщо порівняти крайні варіанти, то площа покриття однієї eNodeB, що працює в самому нижньому LTE-діапазоні (700 МГц) виявляється, при інших рівних, в 5-6 разів

більше, ніж для бази, яка працює в 2.5 ГГц. В умовах міської забудови радіус стільники, таким чином, може бути від кількох сотень метрів до декількох кілометрів. Що стосується рекорду по дальності дії БС LTE, він був встановлений в ході Трайл грецького оператора Cosmote на обладнанні Huawei на початку цього року - на відстані 102 км від БС була отримана швидкість передачі 135 Мбіт / с. Звичайно, це була пряма видимість і один абонент в соті. Але з точки зору граничних можливостей стандарту - досить переконливо.

З приходом на територію України нового покоління зв'язку 4G LTE карта покриття сильно не зміниться, проте поліпшення в якості зв'язку та Інтернет з'єднанні будуть помітні. Це обумовлено багатьма факторами, більшість яких полягають у виділеній смузі частот і операторів зв'язку.

Відомо, що три найпопулярніші GSM оператора вже викупили частоти в діапазоні 2600 МГц - спеціально виділеному діапазоні частот для 4G мереж, але вона вже буде використовуватися для місцевості з щільною міською забудовою. І обійдеться оператору вже дорожче, так як потребують монтажу основного обладнання практично заново. Однак в цьому є і переваги, і недоліки, з якими варто розібратися [1].

Переваги впровадження 4G LTE мереж в Україні незаперечні і очевидні. У той час, коли більшість країн вже починають період тестування мереж покоління 5G, у нас тільки починають модернізувати і переробляти Інтернет пристрою і базові станції так, щоб вони відповідали вимогам мереж 4G LTE.

CDMA оператор Інтертелеком займає смугу 800 МГц., а 900 МГц і 1800 МГц належать GSM операторам, таким як Київстар, Vodafone і lifecell. На смузі 2100 МГц працюють оператори UMTS / WSDMA.

Різні діапазони варто розглядати як окремі групи товарів, оскільки вони мають різні характеристики і цінність. Це пов'язано із особливістю поширення хвиль на різних частотах: нижчі частоти забезпечують більшу дальність покриття, вищі частоти краще підходять для передачі великих об'ємів інформації.

Через це для сільської місцевості, доріг, великих відкритих просторів використовують, як правило, частоти в діапазонах 800-900 МГц, а в районах із насиченою міською забудовою — 2100-2600 МГц (рисунок 1.5).

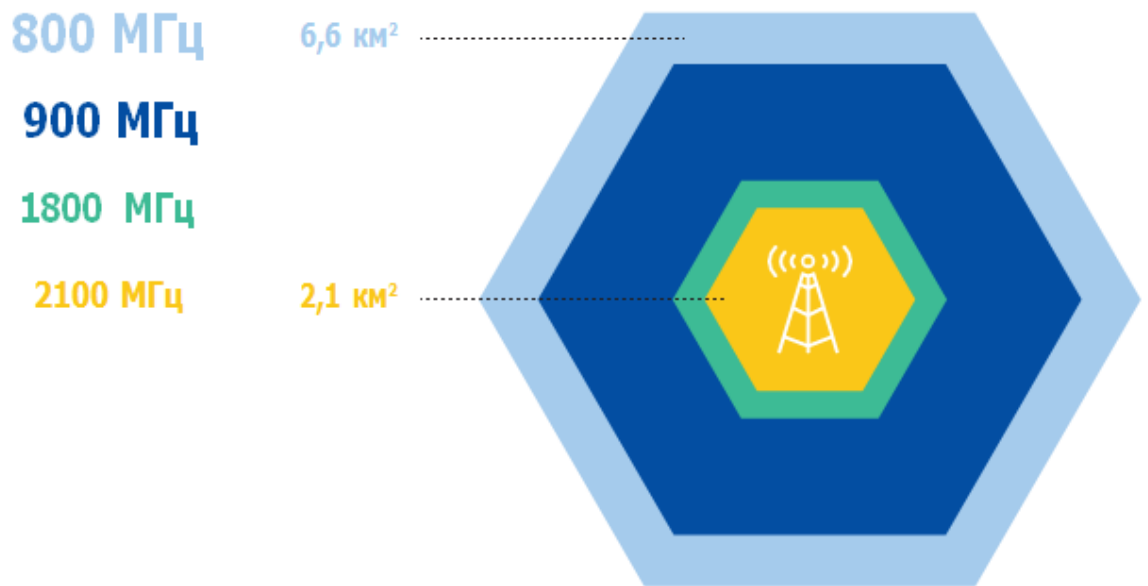


Рисунок 1.5 – Площа розповсюдження сигналу в залежності від частоти в Україні

Оскільки радіочастоти — це обмежений спільний ресурс, ефективність його використання і справедливість розподілу вкрай важливі. Обмеженість ресурсу та потреба значних інвестицій в інфраструктуру для надання телекомпослуг призводить до розподілу ринку між 3-7 гравцями, при чому у переважній більшості країн працює 3-4 оператори [2].

В Україні діють 3 загальнонаціональні мобільні оператори, що використовують різні технології для надання послуг зв'язку і у яких зосереджена більшість частот, а також 2, які спеціалізуються на 1 технології. Окрім того, 1 оператор надає локальні послуги у 2 областях (табл. 1.1)

Таблиця 1.1 – Розподіл частот між операторами телекомунікацій і технологіями

Технологія (частота, МГц)	Київстар	Водафон	Лайфселл	Інтертелеком	Тримоб	Всього, МГц
GSM (900)	533.4	269	200			1 002.4
E – GSM (900)	100.8					100.8
UMTS (2000)	810	810	810		810	3 240
LTE (2600)	810	540	810			2 160
LTE/GSM (1800)	1 890	1 350	810			4 050
CDMA2 (800-900)			135.0	740.3		885.3
Всього	4 144.2	2 969	2 626.6	740.3	810	11 300.1

Частоти у діапазонах 1800-2600 МГц розподілені таким чином, що дозволяють надавати повний спектр послуг за наявними технологіями всім операторам.

У діапазоні 2600 МГц, який використовується для LTE, Водафон має дещо менший діапазон у користуванні (20 МГц по всій території України порівняно з 30 МГц), однак усі мобільні оператори мають достатні смуги для використання наявних технологій.

Діапазон 2100 МГц використовується для технологій UMTS і рівномірно розподілений між 4 користувачами (смуги шириною 30 МГц). У діапазоні 1800 МГц спостерігається концентрація спектру у користуванні Київстар (47%), тоді як Лайфселл має меншу частку (20%), однак цієї смуги (30 МГц) все одно достатньо для надання послуг LTE. Однак частоти у діапазоні 900 МГц мають вкрай нерівномірний розподіл між користувачами.

Ліцензії у цьому діапазоні видані переважно для застосування 2 технологій: GSM-900 та E-GSM. Також незначну смугу у діапазоні 880-890 МГц займають компанії з ліцензіями на технологію CDMA. Визначити їхню частку, на жаль, за доступними джерелами неможливо.

Серед мобільних же операторів 58% спектру зосереджено у Київстар, 24% знаходиться у користуванні Водафон, і лише 18% — у Лайфселл. Такий

розподіл дозволяє всім компаніям надавати якісні послуги за технологіями GSM [11].

Однак можливість теоретично застосовувати сучасні технології, які потребують ширшої смуги частот, є лише у компанії Київстар. Діапазон 800 МГц є надважливим для забезпечення 4G в регіонах і не має альтернативи. Понад 80% діапазону використовується компанією Інтертелеком, водночас існує парадоксальна ситуація, коли CDMA-оператор використовує для низхідного трафіку діапазон, призначений для висхідного трафіку GSM операторів (частина ліцензій Інтертелеком знаходиться у діапазоні 900 МГц, а саме 880-890 МГц).

Україна не використовує для сучасного мобільного зв'язку діапазони 800 МГц та 2300-2400 МГц. Останній діапазон не забезпечує широкого покриття і призначений для передачі значної кількості даних, його альтернатива 2600 МГц забезпечує поточні потреби у передачі трафіку. Однак постійне зростання обсягів трафіку може викликати потребу в цьому діапазоні, який перебуває у користуванні компаній «Інтелектуальні Комунікації» (88% спектру, використовує технологію широкосмугового доступу практично в усіх регіонах), «Краєвид» (6% спектру, використовує технологію мультисервісного доступу в Миколаївській області) та «Фарлеп-інвест» (6% спектру, використовує технологію мультисервісного доступу у 6 регіонах).

1.2 Основні технічні характеристики та переваги технології

Сьогодні прийнято вважати, що взаємне розташування вузлів інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі в значній мірі визначає її загальну ефективність [2].

Провівши огляд робіт по даній тематиці, встановлено, що розміщення базових станцій з більш високою щільністю для збільшення ємності мережі неминуче веде до зростання складності управління інтерференцією, збільшення вартості розгортання мережі, додаткових енергетичних та економічних витрат на підтримку її працездатності. Важливу роль для

оператора має енергоефективність мережі, оскільки в гетерогенних 50 мережах у порівнянні з однорівневими з'являється велика кількість малих комірок [3].

Хоча вони є малопотужними, але в сукупності рівень малих комірок використовує багато електроенергії. При цьому слід врахувати, що абонентське навантаження розподілене нерівномірно по території. Велику частину малі комірки не обслуговують абонентів взагалі.

Саме тому доцільним є зменшення енергоспоживання мережі, внаслідок застосування нового методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу, за допомогою якого малі комірки, які не обслуговують абонентського навантаження будуть переходити в енергозберігаючий режим, з можливістю швидкого переходу в звичайний режим в разі потреби.

Також встановлюючи критерії обслуговування абонентів базовими станціями певного рівня можна досягти оптимальної конфігурації роботи мережі залежно від цілей, серед яких може бути досягнення максимальної якості обслуговування та ємності мережі та ін.

Всесвітня глобалізація та інформатизація впливає на всі сфери життя людства. Мобільний зв'язок та Інтернет міцно увійшли до списку звичних речей, необхідних сучасній людині. Розвиток технологій допомагає використовувати всі переваги мобільного інтернету практично в будь-якій точці земної кулі.

Швидкість та якість мобільного інтернету зростають з кожним роком, а його вартість регулярно стає дешевшою. Все більшої популярності набирають бездротові мережі.

Спостерігається колосальне збільшення кількості мобільних пристроїв – абонентська мережа налічує вже понад 231 мільйон активних користувачів, і це число продовжує швидко зростати. Щодо світових показників, то за прогнозами експертів, до 7 трильйонів бездротових пристроїв буде використовуватись у світі до 2017-2020 років.

Як вже зазначалося, стандарт LTE (Long Term Evolution) був розроблений для подолання комплексу проблем, який було виявлено і не до кінця вирішено у ході розвитку проекту мобільного зв'язку 3-го покоління (3G). Найбільші виробники споживчої електроніки - Apple, Samsung, Sony, LG, Lenovo та інші, роблять ставку на LTE, виробляючи пристрої, які підтримують саме цей стандарт передачі.

Сучасні мережі LTE підтримують швидкість передачі даних до 100 Мбіт/с (при цьому максимальна швидкість 3G – 20 Мбіт/с). Однак цей показник може змінюватись в залежності від місцезнаходження користувача та поточного мережного навантаження. Технологія передбачає швидкості більше 300 Мбіт/с, з теоретично можливою піковою пропускну здатністю до 1,2 Гбіт/с.

У жовтні 2013 року група німецьких інженерів з Технологічного інституту Карлсруе продемонструвала швидкість 100 Гбіт/с частоті 237,5 ГГц. LTE надає користувачам рішення, що перевершують можливості конкуруючих технологій з погляду стійкості, пропускну здібності та запобігання затримкам. Збільшена пропускна здатність дає можливість запропонувати користувачам нові та більше якісні послуги.

У існуючого LTE використовується рознесення каналів на 100 кГц [2, с. 38]. Однак це є серйозною проблемою, оскільки простір пошуку дуже великий. Доцільно змінити рознесення каналу LTE-U з каналом Wi-Fi на 20 МГц.

На додаток до цих несучих частот необхідно представити додаткове рознесення каналів несучих частот приблизно на 20 МГц, що дозволить вирівнювати піднесучі, де рознесення несучих частот має бути кратним 300 кГц згідно з поточною специфікацією (рисунок 1.6)

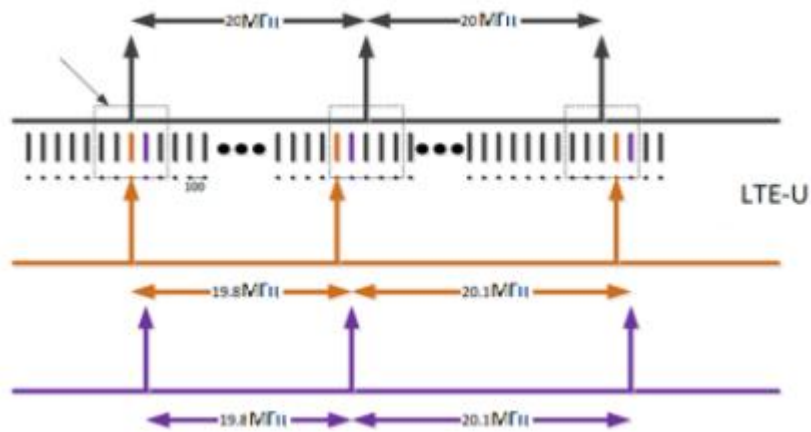


Рисунок 1.6 – Роздільна здатність частот каналами

Повні переваги системи LTE-U загалом складаються із двох внутрішніх конструктивних особливостей системи. По-перше, канали управління LTE розроблені для широкого покриття та високої надійності у середовищі роботи, обмеженою інтерференцією.

Покриття та надійність досягнуті мінімізацією та стисненням бітів керуючої інформації та нижчих рівнів кодування.

Таким чином, надійність та ширше покриття каналів управління дозволяють системі LTE-U функціонувати з великою кількістю мобільних користувачів та досягати більшого розвантаження трафіку. По-друге, фізичні канали LTE передачі даних і протоколи розроблені так, щоб можна було обробити дані в невідомому радіо середовищі і відновити інформацію коректно навіть в умовах несприятливої інтерференції.

Потік даних LTE може бути закодований з високим рівнем коду каналу (наприклад, $1/3$), тоді як найнижчий рівень кодування для Wi-Fi трафіку становить $1/2$. Крім того, коли декодування даних LTE некоректно, тоді отримані сигнали буферизуються в LTE UE і об'єднуються з пізнішою повторною передачею, щоб використовувати поліпшену продуктивність декодування. Цей автоматичний гібридний запит повторної передачі (HARQ) покращує продуктивність повторної передачі на кілька дБ, порівняно з простим автоматичним запитом повторної передачі (ARQ) – протокол у системі Wi-Fi [3].

Як і будь-яка технологія, LTE має свої переваги та недоліки. До переваг технології LTE відноситься висока швидкість передачі та спектральна ефективність, низька затримка у мережі, підтримка технології MIMO, збільшення радіусу дії базової станції. До недоліків технології LTE відноситься відсутність наступності до технології UMTS/HSPA, необхідність модернізації транспортної мережі оператора зв'язку для якісного надання послуг.

Таким чином, технологія LTE є сучасною бездротовою технологією передачі. Великі оператори стільникового зв'язку поступово впроваджують цю технологію у свої мережі. Однак цей перехід від UMTS/HSPA до LTE непростий з низки причин і потребує значних капіталовкладень.

Однією з таких причин, як було описано вище, відсутність наступності по відношенню до стільникових мереж третього покоління. В результаті операторам стільникового зв'язку доводиться експлуатувати як стільникові зв'язки третього покоління, так і мережі зв'язку засновані на технології LTE. Це вимагає додаткового частотного ресурсу та апаратних розширень у кожній базовій станції.

Також суттєвою проблемою для розвитку мереж зв'язку на основі LTE є відсутність необхідних роботи частот. Технологія LTE працює на тих ж частотах, як і технологія Wi-Max, проте технологія Wi-Max запустилася в комерційну експлуатацію значно раніше за технологію LTE. В результаті необхідні частоти для роботи LTE виявляються зайнятими технологією Wi-Max.

Незважаючи на всі викладені вище труднощі, технологія LTE активно розвивається та успішно впроваджується на території Росії та всього світу. Еволюцією LTE має стати технологія LTE-Advanced, в якій необхідно врахувати досвід розгортання мереж попередніх поколінь, а також удосконалити існуючі характеристики (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Відмінності в плануванні мереж мобільного зв'язку різних поколінь

Найменування	LTE	GSM	WCDMA
Планування частотного ресурсу	Розподіл фрагментів смуги системи між користувачами базових станцій	Розподіл частотних каналів між базовими станціями	Не потрібно
Наявність регулярної методики планування	Немає	Є	Є
Комутація	Пакетів (все через IP)	Каналів, пакетів	Каналів, пакетів
Передача інформації	OFDM	Вузькосмуговий сигнал	Широкосмуговий сигнал
Профіль трафіку	VoIP, потокове відео, мобільний інтернет, фоновий трафік	Мова, мобільний інтернет, фоновий трафік	Мова, потокове відео, мобільний інтернет, фоновий трафік
Дисципліна обслуговування	VoIP - система масового обслуговування (СМО) з відмовами. Мобільний інтернет - СМО з чергами і пріоритетами. Потокове відео - СМО без затримок	Мова - СМО з відмовами. Мобільний інтернет - СМО з чергами і пріоритетами.	Мова - СМО з відмовами. Мобільний інтернет - СМО з чергами і пріоритетами. Потокове відео - СМО без затримок

Переваги технології LTE для споживачів очевидні: у мобільних телефонах це відеодзвінки та мобільне телебачення, у смартфонах та планшетах – використання інтерактивних програм, геолокація, перегляд відеоконтенту, у ноутбуках та нетбуках – швидкісний доступ в інтернет для завантаження медіаконтенту, проведення відеоконференцій.

LTE надає операторам мережеві технології, перспективні з точки зору потужності, пропускної спроможності та взаємодії з користувачем. Незалежно від того, чи є оператор уже досвідченим гравцем ринку або тільки починає свою діяльність, LTE створює для нього нові комерційні можливості та джерела доходу. LTE допомагає знизити довгострокові капітальні та

експлуатаційні витрати, оскільки сучасні мережі можна використовувати для технологій зв'язку будь-якого покоління: 2G, 3G та 4G.

Інтерес операторів зв'язку до технології LTE пов'язаний, зокрема, з тим, що розгортання LTE-мереж — значно вигідніший проект, ніж мережі третього покоління. LTE краще використовує частотний спектр та відрізняється підвищеною ємністю та меншою затримкою сигналу — для невеликих пакетів цей показник може становити практично непомітні 5 мс.

Прямий зв'язок із подальшим поширенням LTE має впровадження абонентських пристроїв із цією технологією на користувальницький ринок. Асортимент LTE-пристроїв зріс на 148% за період із січня 2020 р. січень 2021 р., за даними GSA (The Global Mobile Suppliers Association) [1].

До тепер, практично всі провідні виробники абонентського обладнання випускають моделі 4G, причому загальна кількість вендорів, що підтримують LTE у своїх пристроях, збільшилося за рік на 52%. Експерти дослідницької компанії Informa Telecoms & Media припускають, що до кінця 2018 року кількість абонентів мереж LTE у світі становитиме 1,36 мільярда. А за даними аналітиків The Global Mobile Suppliers Association на середину жовтня 2013 року, у 83 країнах світу запущено 222 комерційні мережі LTE, причому майже половина — останній рік [2, 1].

Найбільш масштабні за кількістю абонентів мережі зараз розгорнуті в США, Японії, Південній Кореї та Австралії

Отже, Технологія LTE - це прогресивний і зручний стандарт, який дозволяє мешканцям приватних будинків легко отримувати бездротовий інтернет в своє житло.

Однак бувають випадки, коли сигнал LTE працює не в повну силу - користувачеві не вистачає швидкості. Для рішення цієї проблеми необхідно отримати для мереж LTE додатковий радіочастотний ресурс до того ж з вільним доступом до нього.

Підвищення пропускної здатності мереж LTE можливе шляхом використання неліцензійного радіочастотного спектра в діапазоні 5 ГГц як

один із способів вирішення проблеми перевантаження базових станцій, зниження швидкості передачі даних і брак ресурсів гетерогенних мереж стандарту LTE.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ МОДЕЛІ МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ LTE З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО

2.1 Розробка математичної моделі мережі стандарту LTE

Розглянемо модель мережі, яка складається із ряду вузлів N , що беруть участь у мережі. На початку кожної можливості RACH кожен вузол починає працювати в одному з двох режимів: І-режим (Idle), де вузли передають нове повідомлення з ймовірністю p_N або В-режим (Backlogged), де вузли повторно передають старе повідомлення з ймовірністю p_R .

Усі передавальні вузли з І- і В-режимів вибирають одну з K доступних преамбул.

Деяка кількість вузлів зіткнеться (тобто вибере ту саму преамбулу, що й інший вузол), і, якщо дозвіл зіткнень на eNodeB вимкнено, повернеться до В-режиму. У разі ввімкненого розв'язання колізій, один вузол для кожної зіткненої преамбули буде успішно отримано eNodeB разом з тими вузлами, які вибрали унікальну преамбулу.

Після отримання eNodeB може успішно декодувати лише обмежену кількість L повідомлень на тій самій можливості RACH (через апаратні та часові обмеження). Це можна представити як набір L паралельних серверів, які обслуговують отримані вузли без черги. Усі повідомлення (не більше L), які обслуговуються eNodeB на цьому вторинному етапі вибору, вважаються успішними, тобто були успішно заплановані для передачі на eNodeB, і відповідні вузли повертаються в І-режим. Решта повідомлень відхиляються, а відповідні вузли повертаються в В-режим.

Важливо відзначити, що модель розглядається з точки зору мережі, тобто можна розрахувати ймовірність того, що конкретна кількість користувачів перебуває в певному стані, але неможливо відстежувати вузли окремо (для цього потрібна модель на основі вузлів, див. [14]).

З наступних властивостей моделі можна вивести математичні співвідношення. Між І- і В-режимами циркулює статична кількість вузлів, тобто загальна кількість вузлів не змінюється. Тому справедливим є наступний вираз:

$$N = N_k^{(I)} + N_k^{(B)} \quad (2.1)$$

де N - загальна кількість вузлів у мережі,

$N_k^{(I)}$ - Кількість вузлів в І-режимі ,

$N_k^{(B)}$ - Кількість вузлів в В-режимі.

Крім того, через ймовірності передачі та повторної передачі:

$$N_k^{(N)} = N_k^{(I)} \cdot p_N$$

$$N_k^{(R)} = N_k^{(B)} \cdot p_R.$$

де $N_k^{(R)}$ - кількість вузлів, які виконують повторну передачу

p_N - імовірність того, що вузол в І-режимі передає;

p_R - імовірність того, що вузол в В-режимі передає;

Загальна кількість користувачів, що передають визначається:

$$N_k^{(T)} = N_k^{(N)} + N_k^{(R)}. \quad (2.2)$$

У зв'язку з вибором вузлів передачі та вибору сервером отриманих вузлів, має виконуватися наступне:

$$N_k^{(S)} \leq N_k^{(A)} \leq N_k^{(T)}.$$

де $N_k^{(T)}$ - загальна кількість передавальних вузлів;

$N_k^{(S)}$ - кількість вузлів, які успішно надіслали запит на планування;

$N_k^{(A)}$ - кількість придбаних вузлів;

Перехід вузла з режиму в режим властивостей:

$$N_{k+1}^{(B)} = N_k^{(B)} - N_k^{(R)} + failed_nodes_k,$$

$$failed_nodes_k = N_k^{(N)} + N_k^{(R)} - N_k^{(S)},$$

можемо вивести наступне:

$$\begin{aligned} N_{k+1}^{(B)} &= N_k^{(B)} - N_k^{(R)} + N_k^{(N)} + N_k^{(R)} - N_k^{(S)} \\ N_{k+1}^{(B)} - N_k^{(B)} &= N_k^{(N)} - N_k^{(S)}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Хоча $N_k^{(S)}$ – це кількість успішних передач протягом однієї сесії, середню пропускну здатність можна визначити як середнє значення $N_k^{(S)}$ для кожної сесії:

$$S = E[N^{(S)}].$$

Крім того, пропускна здатність нормалізується як S_0 , що полегшує порівняння різних наборів параметрів. Значення пропускної здатності нормалізується щодо максимально можливої пропускної здатності, яка, у свою чергу, обмежується або кількістю преамбул, або кількістю серверів:

$$S_0 = \frac{S}{S_{max}} = \frac{S}{\min(K, L)}.$$

Середня затримка D — це очікуваний час, необхідний для успішного планування новоствореного повідомлення eNodeB. Важливо зазначити, що після того, як повідомлення було заплановано, залишається ще деякий час, щоб почекати, а потім виконати саму передачу, яка не входить в D :

$$D = \frac{N}{S} - \frac{1}{p_N}, \quad (2.4)$$

Пропускна здатність може бути додатково описана за допомогою теорії ймовірності як:

$$\begin{aligned} S &= E_{N^{(T)}}[E_{N^{(S)}|N^{(T)}}[N^{(S)}]] \\ &= \sum_{n=0}^N \left(\sum_{s=0}^{\min(n, K, L)} s \cdot f_{N^{(S)}|N^{(T)}=n}(s) \right) \cdot f_{N^{(T)}}(n). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Позначення $E_{X|Y}[X]$ у рівнянні (2.5) позначає очікуване значення змінної X щодо умовного розподілу $f_{X|Y}$, замінимо його на Z . $E_Y[Z]$ позначає очікуване значення змінної Z щодо умовного розподілу f_Y .

$$f_{N^{(S)}|N^{(T)=n}}(s) \stackrel{\text{def}}{=} Pr(N^{(S)} = s | N^{(T)} = n)$$

Позначення показує умовний розподіл успішно переданих вузлів з урахуванням загальної кількості передавальних вузлів. Це також можна описати як функцію ймовірності того, що саме s вузлів досягнуть успіху, якщо задана кількість n передавальних вузлів.

$$f_{N^{(T)}}(n) \stackrel{\text{def}}{=} Pr(N^{(T)} = n)$$

Позначення показує рівноважний розподіл загальної кількості передавальних вузлів. Це також можна розглядати як функцію ймовірності того, що передають саме n вузлів. Крім того, це можна виразити через рівноважний розподіл ланцюга Маркова.

Описану вище модель можна представити у вигляді ланцюга Маркова (рисунок 2.1), де кожен стан i відповідає $N_k^{(B)}$, тобто саме i вузли заблоковані. Цей ланцюжок Маркова має природне обмеження на кількість станів, оскільки кількість затриманих повідомлень не може перевищувати загальну кількість вузлів N . Крім того, з будь-якого стану i всі стани більшого номіналу $i + 1, i + 2, \dots, N$ знаходяться в межах досяжності, оскільки одночасно може надійти будь-яка кількість нових повідомлень.

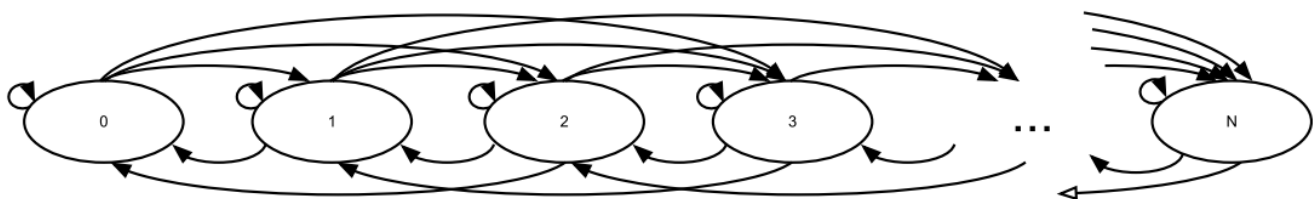


Рисунок 2.1 - Представлення ланцюга Маркова

Однак існує обмеження на те, скільки кроків «назад» може зробити кінцевий автомат в одному слоті, тобто перехід вузла з В-режиму в І-режим. Згідно з визначення моделі, вузол може повернутися до І-режиму лише в разі успішної передачі. Більше того, кількість вузлів, успішно переданих в одній сесії, не може перевищувати значення $\text{Min}(K, L)$, оскільки такі вузли повинні успішно пройти обидва етапи вибору. Можна побудувати однокрокову матрицю ймовірності переходу P цього ланцюга Маркова. Матриця має розміри $(N + 1) \times (N + 1)$. Кожен запис матриці представляє ймовірність переходу мережі з одного стану в інший, який можна описати як

$$p_{ij} = Pr(N_{k+1}^{(B)} = j | N_k^{(B)} = i), \quad (2.6)$$

де i та j – стани джерела та призначення відповідно.

$$p_{ij} = \sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^{\text{Min}(K,n)} \binom{i}{n-j+i-s} \cdot p_R^{(n-j+i-s)} (1-p_R)^{j-n+s} \times \binom{N-i}{j-i+s} p_N^{(j-i+s)} (1-p_N)^{N-j-s} \times f_{N(S)|N(T)=n}(s). \quad (2.7)$$

Оскільки це ланцюг Маркова, він має марківську властивість, що сума всіх ймовірностей переходу із стану i дорівнює 1, тобто сума ймовірностей у кожному стовпці матриці P дорівнює 1.

З визначеною матрицею ймовірностей P повертається до $f_{N(T)}(n)$, яку можна описати відповідно до рівноважного розподілу ланцюга Маркова як

$$\begin{aligned}
f_{N^{(T)}}(n) &= \sum_{i=0}^N Pr(N^{(T)} = n | N^{(B)} = i) \cdot \pi_i \\
&= \sum_{i=0}^N \left(\sum_{m=Max(0, n-i)}^{Min(n, N-i)} \binom{i}{n-m} \cdot p_R^{n-m} \cdot (1-p_R)^{i-n+m} \right. \\
&\quad \left. \times \binom{N-i}{m} \cdot p_N^m \cdot (1-p_N)^{N-i-m} \right) \cdot \pi_i.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

π є стаціонарним розподілом і задовольняє набір лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \pi = \pi P, \\ \sum_{k=0}^N \pi_k = 1. \end{cases} \tag{2.9}$$

З відомою матрицею ймовірностей P наведену вище систему рівнянь можна розв'язати для π , оскільки кількість рівнянь у P дорівнює числу розв'язків, яке дорівнює π .

Рівноважний розподіл $f_{N^{(T)}}$ визначає кількість передавальних вузлів у сесії після стабілізації системи.

Через преамбули та механізми серверів не завжди передане повідомлення приходить успішно. Тому спочатку необхідно знайти ймовірність проходження етапу вибору преамбули, а потім прийняття сервера. Весь процес відбору визначається формулою $f_{N^{(S)}|N^{(T)}} = p^{(s)}$, що є умовним розподілом успішно переданих. Через умову розділу:

$$\sum_{a=0}^{Min(n, K)} Pr(N^{(A)} = a | N^{(T)} = n) = 1,$$

Умовний розподіл можна розділити на дві частини:

$$\begin{aligned}
 f_{N^{(S)}|N^{(T)}=n}(s) &\stackrel{\text{def}}{=} Pr(N^{(S)}|N^{(T)}=n) \\
 &= \sum_{a=0}^{\text{Min}(n,K)} Pr(N^{(S)}=s|N^{(A)}=a, N^{(T)}=n) \times Pr(N^{(A)}=a|N^{(T)}=n) \\
 &= \sum_{a=0}^{\text{Min}(n,K)} f_{N^{(S)}|N^{(A)}=a, N^{(T)}=n}(s) \times f_{N^{(A)}|N^{(T)}=n}(a).
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

У рівнянні (2.10) $f_{N^{(A)}|N^{(T)}=n}(a)$ є умовним розподілом отриманих повідомлень за n передач за одну сесію. Це також можна описати як ймовірність того, що саме повідомлення буде отримано, враховуючи, що було передано n . Існує дещо інший алгоритм визначення того, які вузли отримують. Один з роздільністю колізій, а інший без. Математичні виведення будуть різними через відмінності у функціональності. Якщо розв'язання зіткнень вимкнено, розподіл можна описати так:

$$f_{N^{(A)}|N^{(T)}=n}(a) = \begin{cases} \frac{\binom{K}{a} \sum_{i=0}^{\text{Min}(\lfloor \frac{n-a}{2} \rfloor, K-a)} \binom{K-a}{i} \binom{n-a-i-1}{n-a-2i}}{\binom{n+K-1}{n}} & \text{if } 0 \leq a \leq \min(n, K) \\ 0 & \text{В інших випадках} \end{cases} \tag{2.11}$$

Коли дозвіл зіткнення увімкнено, розподіл приймає іншу форму:

$$f_{N^{(A)}|N^{(T)}=n}(a) = \begin{cases} \frac{\binom{K}{a} \binom{n-1}{n-a}}{\binom{n+K-1}{n}} & \text{if } 0 \leq a \leq \min(n, K), \\ 0 & \text{В інших випадках} \end{cases} \tag{2.12}$$

У рівнянні (2.10) $f_{N(S)|N(A)} = a$, $N^{(T)}=n^{(s)}$ є умовним розподілом успішно переданих вузлів з урахуванням отриманих i n переданих вузлів у сесії. Іншими словами, ймовірність того, що саме s вузлів успішно передають свої повідомлення з урахуванням отриманого i n вузлів, що передають. Наступне рівняння описує цей розподіл:

$$f_{N(S)|N(A)=a, N(T)=n}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s = \min(a, L), \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.13)$$

2.2 Модель каналу LTE при рознесеному прийманні

Нехай на стороні приймача встановлено N антен, як зображено на рисунку 2.2

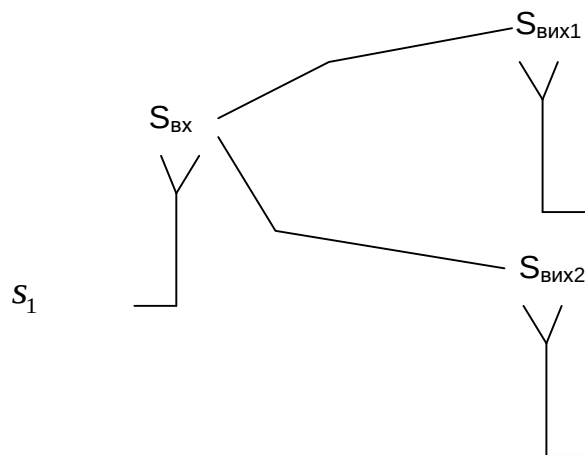


Рисунок 2.2 - Схема рознесеного приймання

Суть метода полягає у тому, що для приймання сигналу використовується декілька антен, які розміщено на певній відстані один від одного. У цьому випадку одержувач має не одну, а одразу N копій переданого сигналу, що прийшли різними шляхами. Це дозволяє зібрати більше енергії вихідного сигналу. Також сигнали, що надходять в протифазі до однієї антени, можуть приходити до іншої синфазно. Застосування такого методу дозволяє

зменшити кількість помилок при радіообміні даними без зниження швидкості передачі в умовах множинних перевідбивань сигналів. Цю схему організації радіо інтерфейсу можна назвати Single Input Multiple Output (SIMO).

Іншими словами, є N гілок рознесення. В цьому випадку властивості просторового каналу визначаються вектором – стовпцем $H = (h_1, h_2, \dots, h_N)^T$ коефіцієнтів передачі, де $(\cdot)^T$ знак транспонування.

Якщо передається сигнал $s_{ex}(t)$, то вектор $S_{вых}$ прийнятих сигналів визначається виразом [15]:

$$S_{вых}(t) = \sqrt{P_0} H \cdot s_{ex}(t) + Z(t), \quad (2.14)$$

де $Z(t)$ - вектор власних шумів,

P_0 - середня потужність, що випромінюється.

Шуми в різних антенах будемо вважати не корельованими між собою, тобто кореляційна матриця шуму ,

$$\langle ZZ^H \rangle = \sigma_0^2 I$$

де I - одинична матриця,

$(\cdot)^H$ – позначає ермітове сполучення.

де $Z(t)$ - вектор власних шумів.

Ефективність рознесеної передачі залежить від того, присутня або відсутня на передавальній стороні інформація про сам канал передачі (про вектор H вагових коефіцієнтів).

За наявності цієї інформації можлива реалізація адаптивної передачі, узгодженої з каналом. Тобто потужність сигналу підвищуватиметься у тому напрямку, де вплив перевідбиттів та згукань найбільший.

Припустимо, що на передавальному боці є N антен (рисунок 2.3), тобто у системі є N гілок рознесення. Тоді властивості просторового каналу визначаються вектором стовпцем $\mathbf{H} = (h_1, h_2, \dots, h_N)^T$ коефіцієнтів передачі.

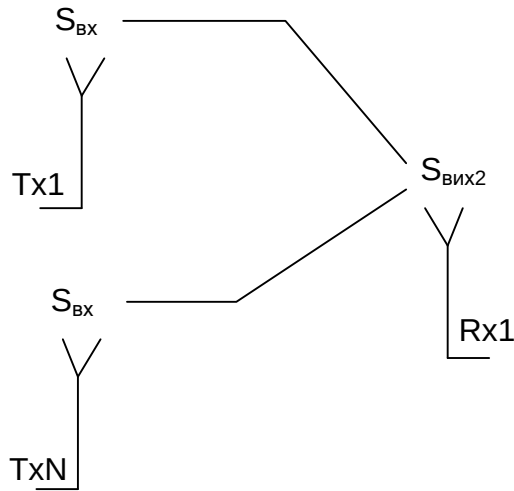


Рисунок 2.3 Схема з рознесеною передачею

Якщо стан каналу передавача невідомий, то потужність повинна ділитися рівномірно між усіма антенами, і прийнятий сигнал у такому разі визначається:

$$s_{\text{вих}}(t) = \sqrt{\frac{P_0}{N}} \left(\sum_{p=1}^M h_p \right) s_{\text{вх}}(t) + z(t). \quad (2.15)$$

Термін MIMO (Multiple Input Multiple Output) визначає технологію зв'язку, яка використовує просторовий поділ каналів за допомогою кількох передаючих антен та кількох приймальних.

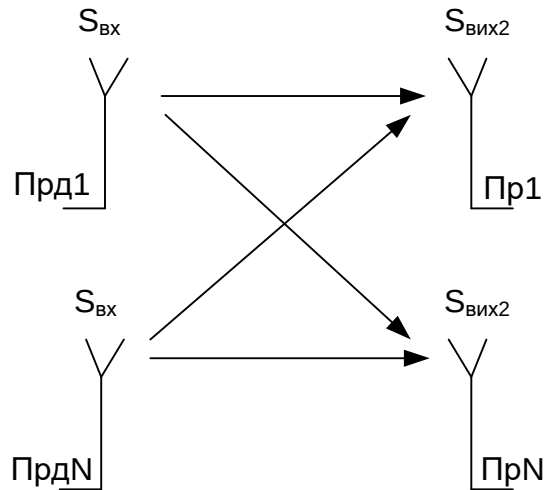


Рисунок 2.4 - Узагальнена блок - схема системи зв'язку з МІМО

Розглянемо бездротову систему з N_t передаючими (Прд) та N_r приймальними (Пр) антенами. Інформаційний символ, переданий i -ою антеною в момент часу k позначимо $s_i(k)$. Надіслані символи розміщені у векторі:

$$s_{ex}(k) = [s_1(k), \dots, s_{N_t}(k)]^T \quad (2.16)$$

Під час передачі переданий символ проходить не тільки прямий шлях, а й кілька відбитих, перш ніж прийде в j -у приймальну антену. Цей ефект називається багатопроменевим поширенням. Між кожною передавальною антеною i і кожною приймальною антеною j є комплексна імпульсна характеристика $h_{ij}(k)$ довжиною $L+1$, яка описується вектором

$$h_{ij} = [h_{ij}(0), \dots, h_{ij}(L)]^T$$

В цьому випадку канал для МІМО системи може бути представлений $L+1$ комплексними канальними матрицями

$$H(k) = \begin{pmatrix} h_{11}(k) & \dots & h_{1N_t}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1}(k) & \dots & h_{N_rN_t}(k) \end{pmatrix}, \quad k = 0, \dots, L \quad (2.17)$$

Символ, прийнятий антеною i на момент часу k , позначимо як $s_{\text{bl}X_j}(k)$.
Символи, прийняті N_r антенами, розташовані у векторі.

$$s_{\text{bl}X}(k) = [s_{\text{bl}X_1}(k), \dots, s_{\text{bl}X_{N_r}}(k)] \quad (2.18)$$

З урахуванням (2.15) та (2.17) цей вектор можна представити у вигляді

$$s_{\text{bl}X}(k) = \sum_{p=0}^L H(p) s_{\text{ex}}(k-p) + Z(k) \quad (2.19)$$

де $Z(k)$ - вектор відліків адитивного гауссівського шуму.

Математичний опис системи зв'язку з технологією MIMO може бути представлений як набір рівнянь з багатьма невідомими. Якщо кожне рівняння є лінійною комбінацією невідомих змінних і кількість рівнянь дорівнює числу невідомих, то система даних рівнянь має розв'язок. Якщо кількість рівнянь більша за кількість невідомих, то рішення може бути знайдено одним з методів, наприклад, методом найменших квадратів.

Розглянемо канал для системи зв'язку з MIMO 2×2 , яка складається з двох приймальних та двох передаючих антен.

1. Припустимо, що є послідовність комплексних інформаційних символів $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, яку необхідно передати.

2. При звичайній одноканальній передачі на першому інтервалі часу передається символ x_1 , на другому - x_2 , і так далі.

3. За технології MIMO використовується 2 антени; тому можна згрупувати символи, що передаються, у дві групи. На першому інтервалі часу передаються символи x_1 та x_2 першою та другою антенами відповідно, на другому інтервалі передаються символи x_3 та x_4 і так далі.

4. Якщо група з двох символів передається на одному інтервалі часу, на якому при звичайній передачі передавався лише один інформаційний , швидкість передачі подвоюється.

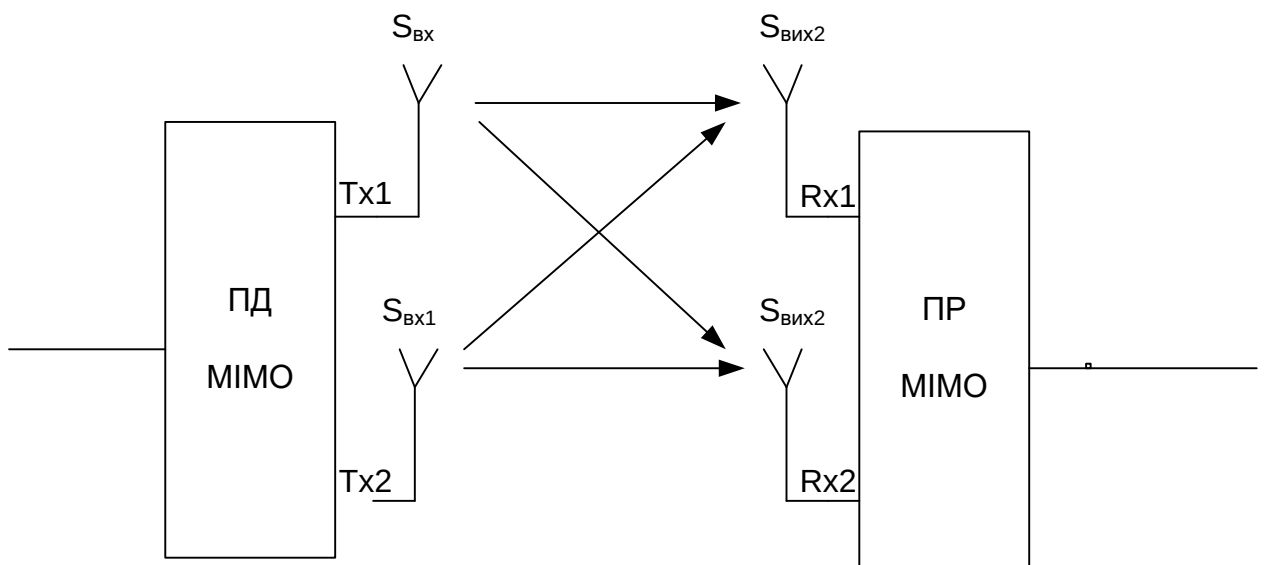


Рисунок 2.5 - Схема каналу з MIMO 2×2

Для оцінки переданого повідомлення приймемо припущення [6]:

- 1) для будь-якого каналу поширення радіохвиль характерно зменшення рівня сигналу зі збільшенням відстані між передавачем та приймачем;
- 2) передачі сигналу з i -ою Прд антени в j -ую Пр антену, кожен переданий символ необхідно помножити на комплексний коефіцієнт h_{ij} .
- 3) коефіцієнти h_{ij} між кожною приймальною та передавальною антеною є випадковими та некорельованими;
- 4) в антені приймача шум має гауссівську щільність ймовірності;
- 5) коефіцієнти h_{ij} відомі у точці прийому.

Перші та другі антенні сигнали, що приймаються, відповідно рівні:

$$s_{\text{вх}1} = h_{11}s_{\text{вх}1} + h_{12}s_{\text{вх}2} + z_1 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{\text{вх}1} \\ s_{\text{вх}2} \end{bmatrix} + z_1,$$

$$s_{\text{вх}2} = h_{21}s_{\text{вх}1} + h_{22}s_{\text{вх}2} + z_2 = \begin{bmatrix} h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{\text{вх}1} \\ s_{\text{вх}2} \end{bmatrix} + z_2,$$

де $s_{\text{вх}1}$ і $s_{\text{вх}2}$ - прийняті символи в першій та другій антенах відповідно,

h_{11} - коефіцієнт передачі (КП) каналу від першої передавальної антени до першої приймальної антени,

h_{12} - КП каналу від першої передавальної антени до другої приймальної антени,

h_{21} - КП каналу від другої передавальної антени до першої приймальної антени,

h_{22} - КП каналу від другої передаючої антени до другої приймальної антени,

$s_{\text{вх}1}, s_{\text{вх}2}$ - передані повідомлення,

z_1, z_2 - шуми в першій та другій приймальній антени.

У матричному вигляді система рівнянь може бути представлена таким чином:

$$\begin{bmatrix} s_{\text{вх}1} \\ s_{\text{вх}2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{\text{вх}1} \\ s_{\text{вх}2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

або

$$\mathbf{s}_{\text{вх}} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s}_{\text{вх}} + \mathbf{z} \quad (2.21)$$

2.3 Програмна модель LTE каналу

Комп'ютерна модель фізичного рівня спільного нисхідного каналу LTE представлена на рис.

Компьютерная модель физического уровня совместного нисходящего канала представлена на рисунку 2.6

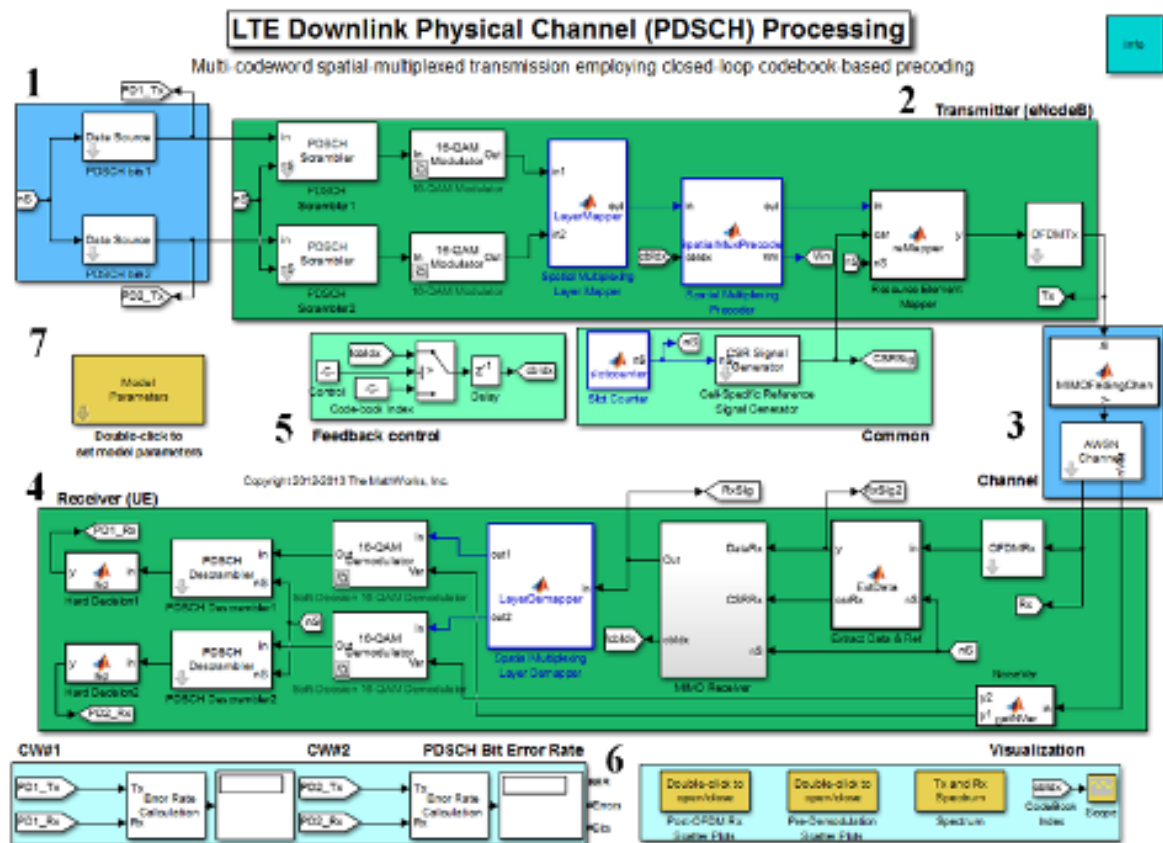


Рисунок 2.6 - Модель фізичного рівня сумісного нисхідного каналу LTE з технологією MIMO.

На рисунку 2.6 основні блоки моделі позначені цифрами. Розглянемо основні блоки, що містяться в представленій моделі.

1) Джерело даних. Генерує за кожний підкадр випадкову бітову послідовність заданої довжини. Дані розбиваються на кілька потоків відповідно до числа антен.

2) Передавач. Здійснює обробку фізично.

У даному блоці для кожного потоку виконується скремблювання та модуляція у відповідних підблоках. Далі відбувається процес просторово-часової обробки сигналу та OFDM передача. Для подальшої оцінки каналу використовують спеціальні опорні сигнали (Cell-specific reference signals), які передаються разом з інформаційними даними.

3) Модель MIMO каналу. Містить імітатор релеєвських завмирань і блок, що додає адитивний гауссівський білий шум.

4) Приймач. Здійснює обробку фізично.

5) Блок зворотного зв'язку. Використовується для оцінки каналу та просторово-часової обробки.

6) Блоки візуалізації та відображення результатів. Використовуються для побудови графіків та підрахунку ймовірності помилки (BER).

7) Блок параметрів моделі. Використовується для зміни та налаштування параметрів моделювання.

У цій моделі використовуються різні кольори для позначення призначення конкретного блоку:

- зелені - відповідають обробці сигналу фізично;
- сині – позначають умови, у яких відбувається моделювання;
- бірюзові – блоки візуалізації та відображення результатів;
- жовті блоки – блоки взаємодії з користувачем.

Параметри моделі, що змінюються:

- ширина каналу (1.4, 3, 5, 10, 15, 20), МГц;
- кількість OFDM символів у підкадрі;
- конфігурація антен (2x2, 4x4);
- вид модуляції (QPSK, 16QAM, 64QAM);
- швидкість коду;
- модель каналу із завмираннями;
- співвідношення сигнал/шум;
- максимальну кількість ітерацій при декодуванні.

У моделі використовується частотний дуплекс (FDD – Frequency Division Duplex).

Усі часові значення виражаються в одиницях елементарного інтервалу:

$$T_s = 1/(15000 \cdot 2048) , \text{ с} \quad (2.22)$$

Передача інформації у низхідному (і висхідному) напрямку організована у кадрах (frames) тривалістю

$$T_f = 307200 \cdot T_s = 10 , \text{ мс} \quad (2.23)$$

які, своєю чергою, поділяються більш дрібні тимчасові структури – слоти. Структура кадру передбачає розподіл кадру на 20 слотів, з нумерацією від 0 до 19, кожен із яких має тривалість

$$T_{slot} = 15360 \cdot T_s = 0.5 , \text{ мс} \quad (2.24)$$

У межах кадру розрізняють підкадри, що є парою з двох суміжних слотів; i -й підкадр містить слоти з номерами $2i$ та $2i+1$.

Обробка низхідного спільного каналу на базовій станції (eNodeB) включає обробку транспортного каналу та обробку фізичного каналу (PDSCH).

Транспортні канали забезпечують інтерфейс між рівнем MAC та фізичним рівнем. Низхідний канал, що спільно використовується, (DL-SCH) є основним типом низхідного транспортного каналу LTE. Він використовується і для даних користувача і для спеціальної керуючої інформації, а також частини низхідної системної інформації.

У цій моделі передається дві кодові комбінації, тобто. два транспортні блоки за інтервал часу передачі (TTI).

Кодові комбінації мають той самий розмір, модуляцію та швидкість кодування. Кожна кодова комбінація відповідає єдиному транспортному блоку. Фізичний канал відповідає ряду частотно – часових ресурсів, що використовуються передачі певного транспортного каналу.

Кожен транспортний канал відображається на фізичному каналі. Фізичний низхідний канал, що спільно використовується, (PDSCH) є основним фізичним каналом, що використовується одноадресної передачі даних. Ця модель використовує просторову мультиплексну передачу, засновану на книзі шифрів, і, в результаті, низхідна фізична обробка каналу включає:

- скремблювання;
- модуляція даних: низхідна модуляція даних перетворює скрембльовані біти в комплексні модульовані символи; набір підтримуваних схем модуляції включає QPSK, 16QAM і 64QAM, відповідає двом, чотирьом і шести бітам в одному модуляційному символі відповідно;
- схема модуляції вибирається параметром типу PDSCH модуляції на блоці Model Parameters; розподіл за рівнями: комплексно – модульовані символи, з обох кодових слів, розподіляються за просторовими рівнями (входи антен) оскільки передбачається повношвидкісна передача, то кількість рівнів дорівнює кількості передаючих антен;
- попереднє кодування, засноване на книзі шифрів: символи, що модулюються, попередньо кодуються, використовуючи книги шифрів;
- для двох антен (рівнів) використовується книга шифрів, заснована на DFT (Дискретне Перетворення Фур'є), яка допускає лише два записи, у той час як для чотирьох антен 16 записів. Цей приклад не моделює жодного з керуючих сигналів, що використовуються, у разі передачі індексу книги шифрів від eNodeB до UE і у разі зворотного зв'язку від UE до eNodeB (тобто приймає безпомилкову передачу індексу); розподіл на Ресурсні Елементи (RE):

попередньо кодовані символи, що підлягають передачі на кожній антені, розподіляються на ресурсні елементи (RE), з яких складаються ресурсні блоки (RB), доступні для передачі; кількість доступних RB залежить від ширини смуги каналу; ця залежність відображена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Відповідність ширини каналу та кількості ресурсних блоків

Ширина смуги частот каналу, МГц	1.4	3	5	10	15	20
Кількість RB	6	15	25	50	75	100

Для обраної конфігурації кожен RB містить 12 піднесучих, кожна з яких займає 15 кГц; таким чином, один RB займає 180 кГц спектра. Отже, при пропускній здатності каналу 20 МГц, 100 RB займають 18 МГц;

- опорні сигнали стільники: основні із опорних сигналів LTE – опорні сигнали стільники (Cell-Specific Reference, CSR). Вони визначаються для однієї, двох або чотирьох антен в соті і використовуються для оцінки каналу в приймачі;
- OFDM передачі.

Допущення та спрощення полягають в тому, що:

- передача по низхідній лінії відбувається для одного користувача.
- відсутня підтримка HARQ;
- використовується звичайний циклічний префікс, який визначає сім символів OFDM на слот;
- лише повношвидкісна передача, тобто. конфігурація антени 2x2 має 2 рівні, а конфігурація антени 4x4 має 4 рівні;
- розмір транспортного блоку визначено заздалегідь.

Висновки по розділу: розділ містить розробку статистичної моделі роботи мережі LTE на основі марківського процесу. Також розроблена математична модель рознесеного приймання та передачі. На основі цієї моделі було розроблено модель MIMO каналу та програмну модель каналу LTE.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ LTE

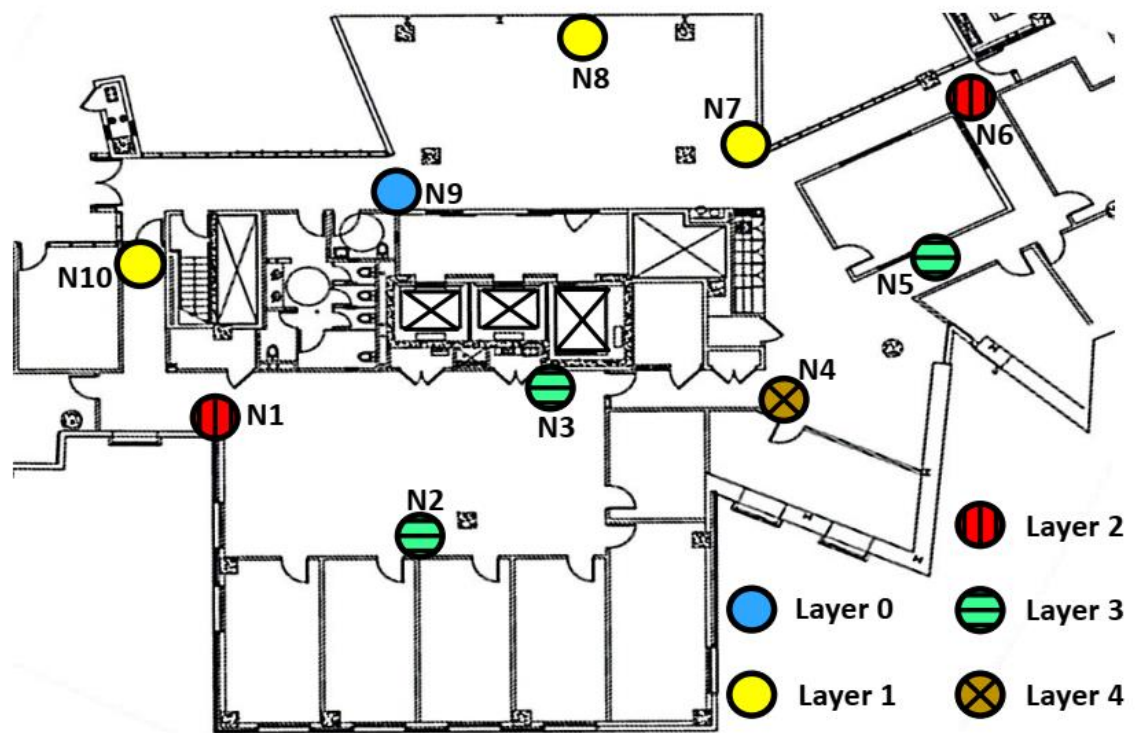
3.1 Дослідження параметрів мережі стандарту LTE з використанням технології MIMO

Модель містить тестовий стенд, який розміщено на одному поверсі будівлі. Залежно від їх розташування вузли можуть бути розділені ліфтами, проходами, внутрішніми стінами тощо. Тестовий стенд містить загалом 20 вузлів, при цьому кожен вузол емулює або невелику стільникову мережу LTE, або клієнта LTE.

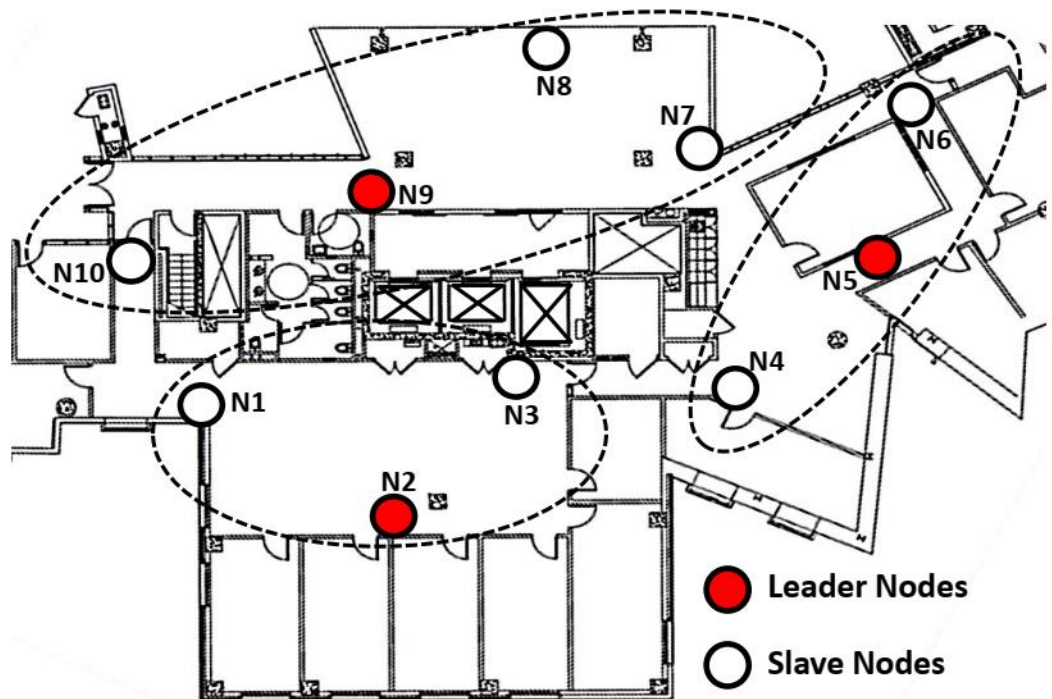
Призначаємо один вузол маленької комірки LTE на рівень 0, а потім запускаємо наш алгоритм розшарування, щоб призначити шари іншим невеликим стільникам. Проводимо контроль переданої потужності вузлів, щоб створити різні інтерференційні околиці та імітувати більшу географічну область.

Для кожного експерименту розгортаємо наші вузли навколо підлоги, щоб створити різні топології та шари невеликих осередків. Точна топологія для кожного експерименту приведена на рисунку 3.1

Щоб якомога точніше відтворити умови LTE, проводимо експерименти на частоті пробілу смуги. Зокрема, використовуємо центральну частоту 680 МГц, яка дуже близька до 700-800 МГц, де основні оператори. LTE має кілька можливих ширин каналу, і модель реалізовано з використанням ширини каналу 3 МГц. Модель може підтримувати будь-яку ширину каналу; однак вибір 3 МГц продиктований розміром FPGA та потужністю обробки платформи.



а) розміщення обладнання різних рівнів



б) Кластеризація MIMO та призначення лідера. Різні кластери не можуть передавати одночасно, оскільки вони заважають один одному.

Рисунок 3.1 - Топологія тестового стенду, що показує призначені шари для Chorus і вибрані лідери та кластери для MIMO.

Основними показниками мережі виступають:

- Фазова дисперсія: ключовою функцією розподілених протоколів МІМО є синхронізація фази між різними вузлами. Таким чином, природно оцінювати мережу з точки зору дисперсії фази в розподілених МІМО передавачах. В ідеальному сценарії фаза на кількох незалежних передавачах буде когерентною в часі, а дисперсія буде нульовою. Чим менше фазова дисперсія, тим нижче завади, що викликані неузгодженістю сигналів під час спільної передачі.

- Підвищення пропускної спроможності: обчислюємо відношення загальної пропускної здатності, яку може забезпечити мережа, тобто за рахунок одночасних передач від кількох незалежних малих стільників до кількох пристроїв кінцевого користувача, використовуючи схему розподіленого МІМО, до пропускної здатності, що надається мережею.

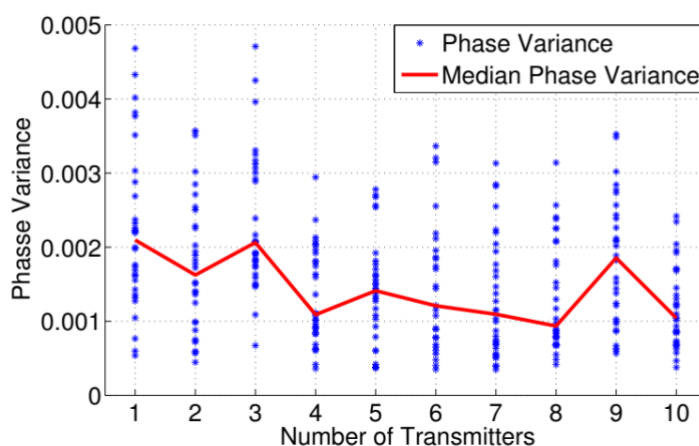
Стійкість до кількох вузлів, що передають сигнал синхронізації

Ключова властивість сервера керування Chorus полягає в тому, що він досягає стійкості до збоїв окремих вузлів і змін у мережевому з'єднанні завдяки тому, що кілька вузлів одночасно передають сигнал синхронізації. У цьому дослідженні проводимо перевірку залежності зміни якості синхронізації зі збільшенням кількості вузлів, які передають сигнал синхронізації.

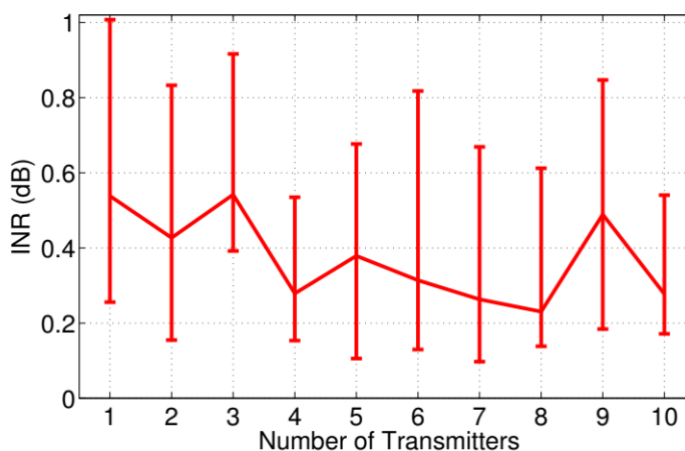
Для цього експерименту розгортаємо вузли на тестовому стенді моделі так, щоб було три різні області підключення. Вибираємо один вузол і призначаємо його рівень 0. Потім запускаємо протокол розшарування, який потім призначає рівень 1 усім вузлам, які можуть приймати рівень 0, і рівень 2 усім вузлам, які можуть приймати рівень 1. За визначенням, вузли рівня 1 синхронізуються з вузлом рівня 0, а вузли рівня 2 синхронізуються з комбінованим сигналом від вузлів рівня 1. Проводимо зміни кількості малих осередків LTE на рівні 1. Потім вибираємо один вузол у рівні 2 для синхронізації з комбінованим сигналом рівня 1. Основна мета — оцінити, наскільки добре вузол рівня 2 синхронізований з окремими вузлами рівня 1,

хоча він використовує комбінований сигнал синхронізації від усіх вузлів рівня 1.

Для цього вибираємо один вузол на рівні 1 для одночасної передачі даних з вузлом на рівні 2 і отримувати ці сигнали на допоміжному вузлі.² Щоб дозволити допоміжному вузлу виміряти різницю фаз між вузлами рівня 1 і рівня 2, змушуємо їх передавати в альтернативних символах, тобто вузол рівня 1 передає символи з непарними номерами, а вузол рівня 2 передає символи з парними номерами. Потім допоміжний вузол порівнює різницю фаз між двома вузлами, використовуючи кожен пару сусідніх символів, після компенсації відповідних каналів між вузлом рівнів 1 і рівнів 2 з самим собою. Повторюємо вимірювання з різними варіантами вузлів рівня 1 і рівня 2.



а) Фазова дисперсія



б) Співвідношення завад до шуму (INR)

Рисунок 3.2 - Продуктивність на допоміжному вузлі як функція кількості спільних передавачів у проміжному рівні синхронізації

На графіку, наведеному на рисунку 3.2 а) побудовано графік фазової дисперсії, що спостерігається на допоміжному вузлі, як функцію кількості одночасних передавачів у шарі. На рисунку показано, що дисперсія фази, що спостерігається на допоміжному вузлі, залишається постійною і низькою, навіть якщо кількість передавачів у проміжному рівні синхронізації збільшується.

Графік, наведений на рисунку 3.2 б) показує вплив цієї фазової дисперсії на завади, оцінюючи відношення завад до шуму (INR). Графік показує, що INR залишається меншим за 0,5 дБ для випадку до 10 одночасних передавачів. Це демонструє, що стратегія сервера керування Chorus, за допомогою якої всі вузли в системі передають сигнал синхронізації, забезпечує надійну синхронізацію.

На рисунку 3.2 а) зображено дисперсію різниці фаз між сигналами даних з вузлів рівня 1 і рівня 2 як функцію кількості передавачів на рівні 1. Дисперсія вимірюється через інтервали в 1 секунду, які є значно більшими, ніж час когерентності каналу. Якщо рівні синхронізовані ідеально, різниця фаз між сусідніми символами буде дорівнювати нулю, оскільки осцилятори заблоковані один з одним. Будь-яка помилка синхронізації буде проявлятися як відмінність від нуля фаз. На рисунку показано, що дисперсія різниці фаз залишається нижче 0,0022 радіана, навіть якщо кількість передавачів на рівні 1 збільшується з 1 до 10. Низька фазова дисперсія показує, що сервер керування Chorus працює належним чином без унікального лідера і може підтримувати хорошу синхронізацію, навіть якщо багато невеликих осередків сприяють сигналу синхронізації.

Розподілений МІМО намагається усунути завади, обнуляючи передані сигнали на конкретному приймачі. Якщо передавачі ідеально когерентні по фазі, то вони можуть ідеально компенсувати канали між ними до приймача і вирівняти сигнали, щоб усунути завади. Будь-яка фазова дисперсія перетворюється на фазовий шум і проявляється як неузгодженість сигналів,

тобто завади. Використаємо вимірювання зверху, щоб обчислити залишкові завади, коли два передавачі застосовують обнулення на допоміжному вузлі. На рисунку 3.2 b) зображено ці результати.

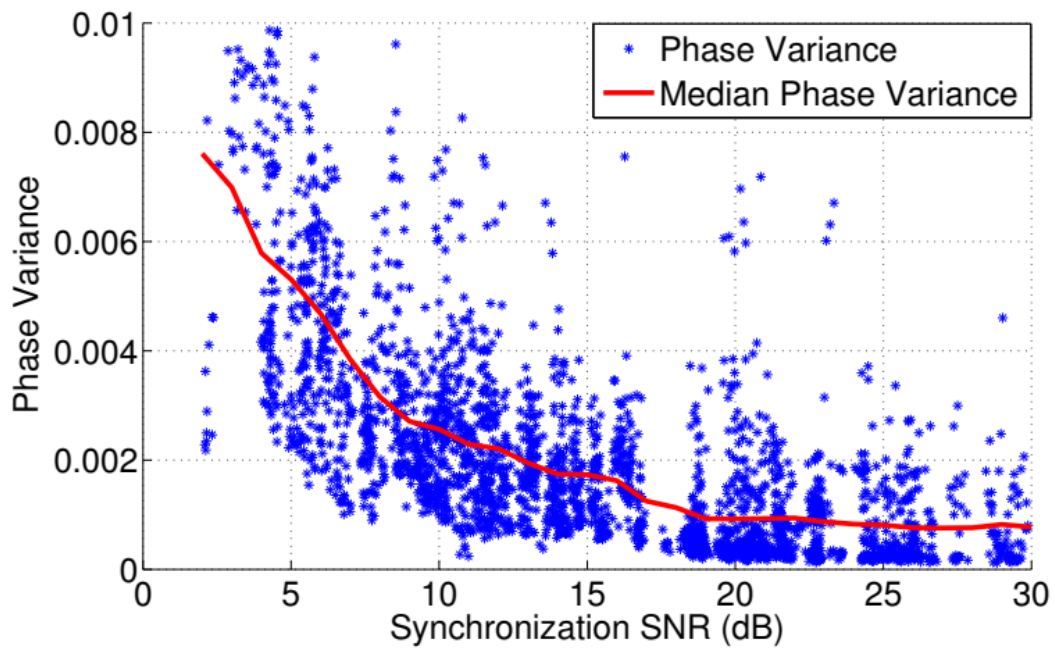
Слід відмітити наявність подібності форми між графіком INR і графіком фазової дисперсії. Це пояснюється приблизно лінійним співвідношенням між ними при низькому INR. На рисунку показано, що відношення залишкових завад до шуму становить 0,5 дБ, що є невеликим. Це показує, що, незважаючи на те, що сервер керування Chorus не має лідерів і кілька вузлів, які одночасно передають сигнал синхронізації, він може досягти високої продуктивності, порівнянної з попередніми системами, які покладалися на одного лідера.

3.2 Стійкість до різної якості синхронізації

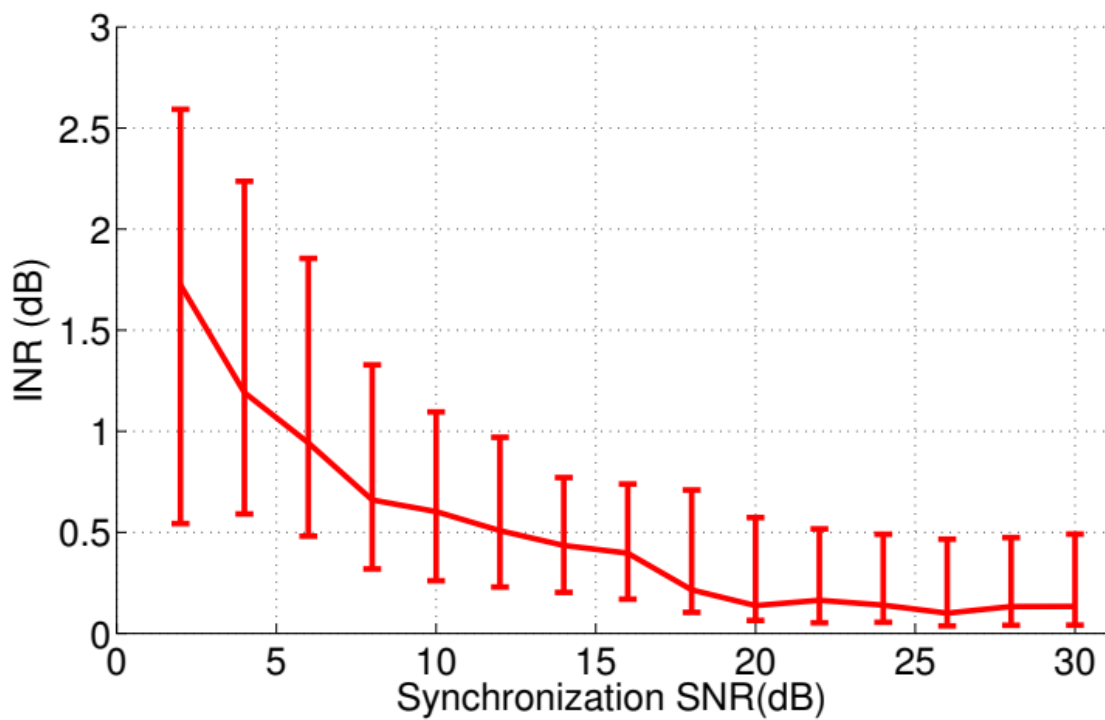
Важливо розуміти продуктивність сервера керування Chorus як функцію SNR каналу синхронізації з двох причин.

По-перше вузли сервера керування Chorus приєднуються до рівня з нижчим номером з достатньо сильним сигналом синхронізації.

По-друге, ключовою метою сервера керування Chorus є можливість надійно працювати в діапазоні SNR синхронізації, щоб забезпечити стійкість до змін у якості зв'язку. Для цього експерименту знову розгортаємо вузли, як і раніше, таким чином, що алгоритм розшарування ділить мережу на три рівня, рівень 0, рівень 1 і рівень 2. Вибираємо два невеликих вузла комірки, обидва в рівні 2, синхронізуючи з вузлом у рівень 1. Мета дослідження полягає в тому, щоб дослідити, чи два вузли малих стільників точно синхронізували свої генератори. Для цього повторюємо ту саму процедуру вимірювання, що й у попередньому дослідженні, де два маленьких стільники чергують передачу даних, а допоміжний режим вимірює різницю фаз між двома маленькими стільниками. Повторюємо цей процес і характеризуємо точність фазової синхронізації в різних SNR і місцях на тестовому стенді.



а) Фазова дисперсія



б) Співвідношення завад до шуму (INR)

Рисунок 3.3 - Продуктивність на допоміжному вузлі як функція SNR синхронізації.

Рисунок 3.3 а) зображує дисперсію фази між сигналами, отриманими від двох малих осередків у допоміжному вузлі,

Рисунок 3.3 б) показує середнє відношення інтерференції до шуму (INR) для різних SNR синхронізації. На рисунку показано, що сервер керування Chorus може досягти середнього INR менше 1 дБ навіть для синхронізаційного SNR до 6 дБ. Це визначає мінімальний SNR каналу синхронізації, який використовується алгоритмом розшаровування Chorus.

На рисунку 3.3 зображено дисперсію різниці фаз між двома невеликими комірками, що виміряні протягом 1-секундного інтервалу часу, як функцію мінімального SNR каналів синхронізації, тобто зв'язків від вузла рівня 1 до вузла.

На рисунку показано, що навіть коли SNR каналу синхронізації становить всього 6 дБ, медіана фазової дисперсії залишається нижчою за 0,0045. Як і раніше, знову досліджуємо вплив цієї фазової дисперсії на завади, вимірюючи залишкову інтерференцію, тобто INR. Зображуємо INR як функцію мінімального SNR каналів синхронізації на рисунку 3.3.

Слід відмітити, що медіана INR дуже мала, менше 1 дБ для SNR синхронізації більше 6 дБ. Рисунок 3.3 а) і б) показують, що, вибравши мінімальне SNR каналу синхронізації на рівні 6 дБ, Chorus може забезпечити, щоб максимальні завади становили менше 1 дБ.

3.3 Синхронізація вузлів, у яких відсутній зв'язок

Архітектура сервера керування Chorus дозволяє йому синхронізувати вузли, які не знаходяться в межах діапазону зв'язку один одного, каскадуючи сигнал синхронізації між рівнями. У цьому дослідженні оцінимо продуктивність такого каскаду.

Для цього експерименту розгортаємо вузли таким чином, що алгоритм розшарування ділить мережу на чотири рівні, рівні від 0 до 3. Потім вибираємо три вузли, по одному в рівнях 1, 2 і 3, з тестового стенду. Згідно з визначенням алгоритму розшарування, вузли в рівні 3 не можуть чути вузли в рівні 1.

Для кожного запуску вибираємо один вузол на рівні 1 і один вузол на рівні 3 і синхронізуємо через вузол на рівні 2. Мета полягає в тому, щоб дослідити, чи вузли в рівні 1 і рівні 3 точно синхронізували свої генератори. Тому повторюємо те саме вимірювання, що й у попередніх дослідженнях, але з малими стільниками у двох різних рівнях.

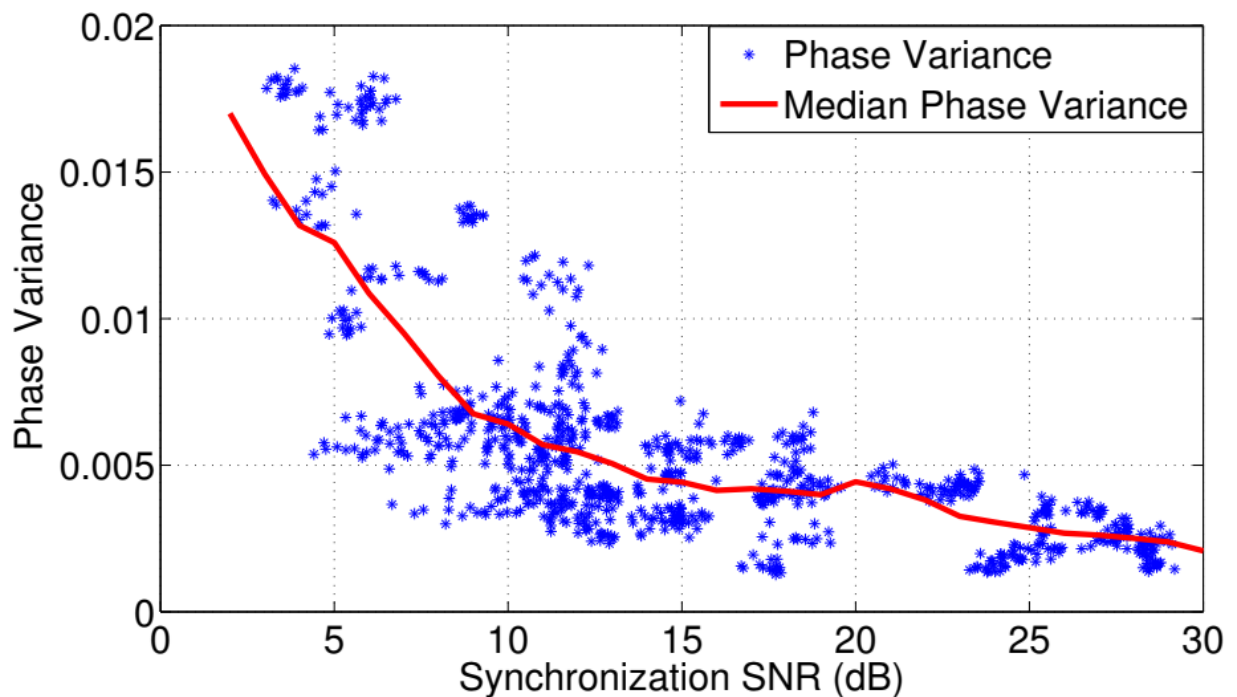


Рисунок 3.4 - Фазова дисперсія між невеликими комірками, які не мають зв'язку між собою і синхронізовані через проміжний вузол, як функція SNR синхронізації.

На рисунку 3.4 показано, що сервер керування Chorus може досягти високого рівня синхронізації, навіть коли вузли не мають зв'язку між собою.

На рисунку 3.4 зображено дисперсію різниці фаз між двома невеликими комірками, виміряними за інтервал часу в 1 секунду, як функцію мінімального SNR каналів синхронізації, тобто зв'язків між вузлом рівня 2 і двома невеликими комірками. На рисунку показано, що якість синхронізації залишається високою, навіть якщо SNR сигналу синхронізації падає.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		24	15							14
2	24		21	10						
3	15	21		12						
4		10	12		17					
5				17		17				
6					17		12		7	
7						12		20	19	
8							20		11	
9						7	19	11		13
10	14								13	

Рисунок 3.5 - Схема парного зв'язку між невеликими осередками.

Для рівня керування MIMO змушує провідний вузол передавати заголовок синхронізації перед кожним пакетом. Це неможливо в LTE, оскільки не можна вставляти нові заголовки між кадрами LTE. Щоб зробити MIMO сумісним з LTE, необхідно лідеру передавати свою інформацію синхронізації в ті самі елементи ресурсу, що використовуються для передачі сигналів синхронізації сервера керування Chorus. Оскільки MIMO не має шарів, лідер MIMO передає свій сигнал синхронізації по каналах усіх рівнів.

Розглядаємо можливість розміщення на одному поверсі будівлі. Поверх складається з офісів і конференц-залів, а наше розгортання складається з 20 вузлів, з яких 10 виконують роль невеликих осередків, а 10 — клієнтів. Виміряємо попарно якість зв'язку між усіма невеликими комірками для визначення вузлів, які добре чують один одного. На рисунку 3.5 показана матриця якості зв'язку з усіма каналами з SNR менше 6 дБ (мінімальне SNR синхронізації), виведеними назовні. На рисунку 3.5 показано попарне SNR у дБ між невеликими осередками в нашому розгортанні, при цьому зв'язки з SNR, меншим за поріг SNR синхронізації (6 дБ), виділені сірим кольором.

Жодна маленька клітинка не може мати зв'язок з всіма іншими малими клітинками.

Аналіз матриці якості зв'язку показує, що немає жодного вузла, який би мав зв'язок із усіма вузлами в мережі. Щоб запустити сервер керування Chorus на цьому тестовому стенді, нам потрібно лише вибрати кореневий вузол; рівні синхронізації налаштовуються самостійно.

На рисунку 3.1 а) показана топологія тестового стенду з кожним вузлом, позначеним його шаром, як призначено алгоритмом розшарування. Щоб запустити МІМО, потрібно вирішити, як розділити мережу на кластери розподілених систем МІМО, де кожен кластер складається з одного лідера та його підлеглих. Виходячи з матриці якості зв'язку на рисунку 3.5 видно, що мінімальна кількість кластерів дорівнює 3, тобто МІМО має вибрати 3 лідера та відповідні їм підпорядковані.

Виберемо кластери лідер-підпорядкований, вирішуючи задачу оптимізації, яка максимізує суму якості зв'язку між кожним підпорядкованим і його лідером. Це призводить до наступного три кластери: перший кластер складається з N1, N2 і N3 з N2 як лідера, другий складається з N4, N5 і N6, з N5 як лідера, а третій - N7, N8, N9 і N10, з N9 як лідером. Рисунок 3.1 b) показує топологію (таку ж, як (a)), з позначеними лідерами МІМО та пов'язаними кластерами. У МІМО вузли, що належать до різних кластерів, не синхронізовані і, отже, не можуть передавати одночасно без перешкод. Таким чином, протокол на основі лідера, як-от МІМО, повинен запускати протокол МАС для арбітражу середовища між сусідніми кластерами МІМО.

Розробка такого розподіленого міжкластерного протоколу МАС є складним завданням. Таким чином, використовуємо консервативний підхід і дозволяємо МІМО використовувати ідеального і централізованого арбітра, який проводить розмежування ресурсів між кластерами МІМО.

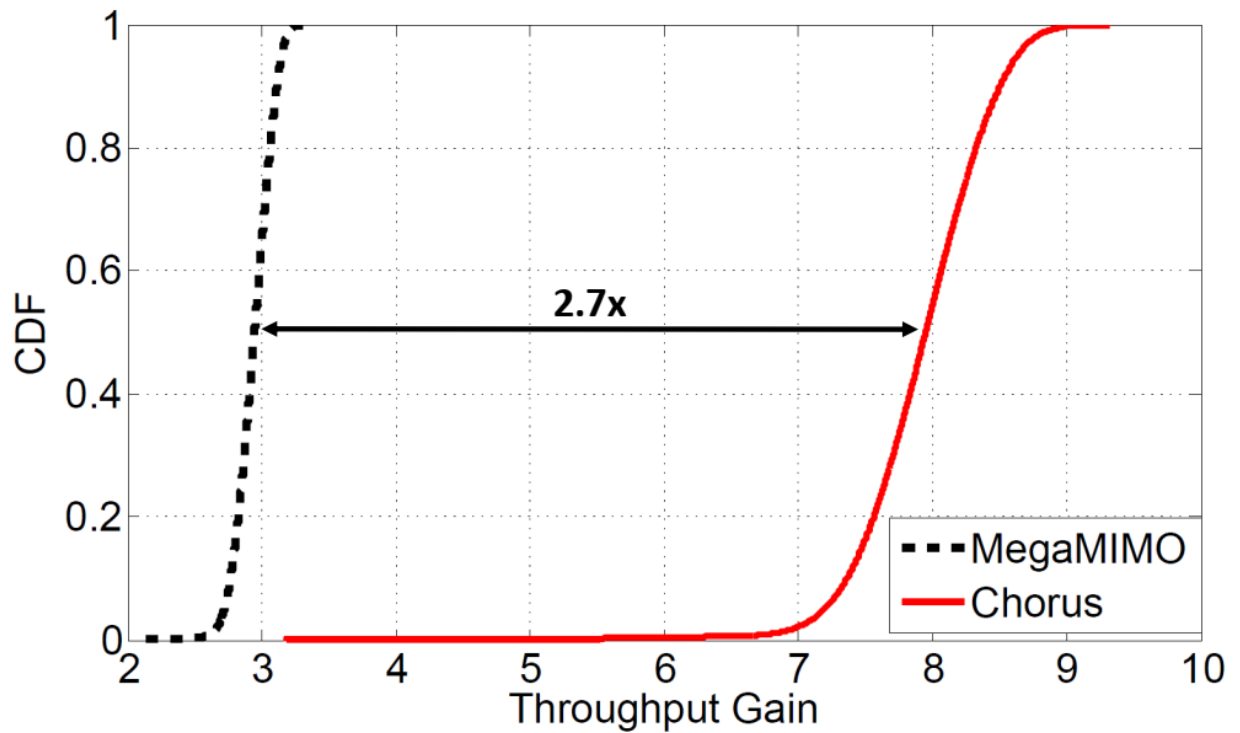


Рисунок 3.6 - Посилення Chorus у розподіленому розгортанні

Chorus може дозволити одночасну передачу навіть між вузлами, які не можуть чути жодного лідера, і, отже, забезпечити збільшення пропускної здатності в порівнянні з MIMO в міру масштабування мережі.

На рисунку 3.6 показано CDF збільшення пропускної здатності мережі Chorus і MIMO для різних варіантів розташування клієнта. На рисунку 3.6 показано, що Chorus досягає середнього приросту пропускної здатності в 2,7 рази порівняно з MIMO без сервера синхронізації. Chorus досягає такого збільшення пропускної здатності, оскільки він може синхронізувати всі малі осередки в мережі для спільної передачі всім 10 клієнтам, тоді як MIMO потрібно буде мультиплексувати між трьома кластерами і передавати лише 3 або 4 клієнтам одночасно. MIMO має три кластери, медіанний приріст менше ніж у 3 рази через дисбаланс у матрицях клієнтських каналів для різних макетів.

3.4 Масштабування мережі

Виконаємо моделювання в щільному міському середовищі. Кожна невелика комірка в системі є міським мікростільником з потужністю передачі 1 Вт, як описано на сторінці 29 стандарту 3GPP TS 136.104 v 12.7.0 LTE.

Використовуємо модель поширення без прямої видимості для макета сітки, як описано на сторінці 93 з 3GPP TR 36.814 V9.0.0. Приймачі мають мінімальний рівень шуму -100 дБ, що відповідає стандартному коефіцієнту шуму 6 дБ (визначеному в документі LTE TR 36 931) при 27° C для смуги пропускання 5 МГц.

З цими параметрами SNR в мережі зменшується до 0 дБ на відстані приблизно 300 м. Щоб оцінити щільне розгортання, розглянемо випадок, коли невеликі осередки розділені на середню відстань 50 м у сітці 8 км × 8 км.

Таким чином, моделювання має 25600 вузлів невеликих осередків, рівномірно розгорнутих у випадковому порядку в цій сітці. Ми маємо модель генератора для кожного вузла зі зміщенням несучої частоти $\pm 100 \text{ppb}$, що відповідає допуску обладнання LTE, визначеному в TR 36 104 [20, 7], і фазовим шумом -88 дБн на 100 кГц для смуги пропускання 5 МГц, що характерно для генераторів напруги, температури, що використовуються в малих елементах [50]. Кожен вузол маленької комірки в системі запускає контролер для забезпечення фазової синхронізації в присутності зміщень осцилятора. Запускаємо алгоритм розшарування на змодельованому розгортанні, а потім моделюємо роботу мережі протягом 5 секунд, що значно більше, ніж типовий час когерентності каналу в 100-200 мс. На рисунку 3.7 зображені різні рівні, призначені алгоритмом розшаровування Chorus. Це показує, що у всьому географічному діапазоні цієї симуляції Chorus повторно використовує частоти синхронізації.

Рисунок 3.7 візуалізує результати алгоритму розшаровування, показуючи, що ця мережа має 19 рівнів. Оскільки Chorus має 8 різних частот синхронізації, рівні використовуються повторно ці частоти. Оскільки маємо доступ до абсолютних фаз наших генераторів у нашій симуляції, можемо

обчислити абсолютну різницю фаз i , отже, фазову дисперсію, між парами вузлів у системі. Побудуємо медіану цієї фазової дисперсії як функцію відстані між парами вузлів. Оскільки кількість пар вузлів у нашій системі дуже велика, графік генерується шляхом підвибірki пар вузлів.

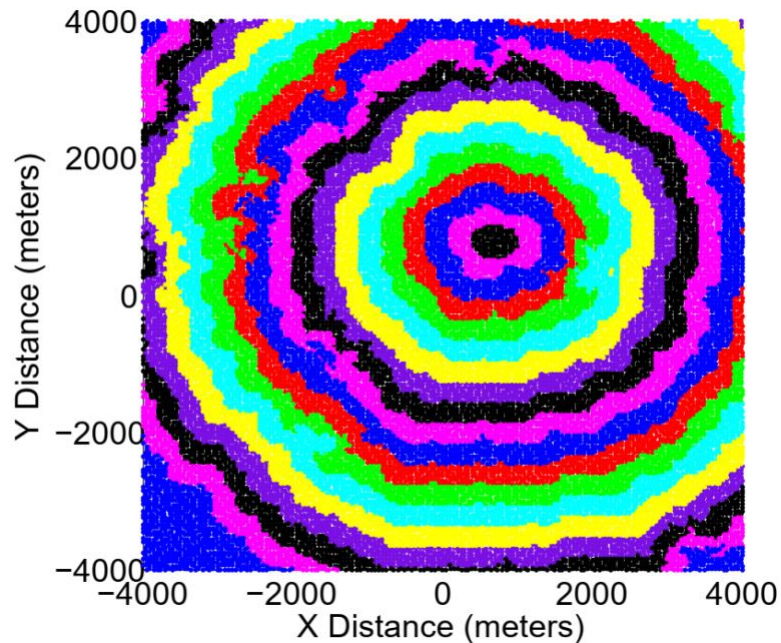


Рисунок 3.7 - Візуалізація схеми розшаровування.

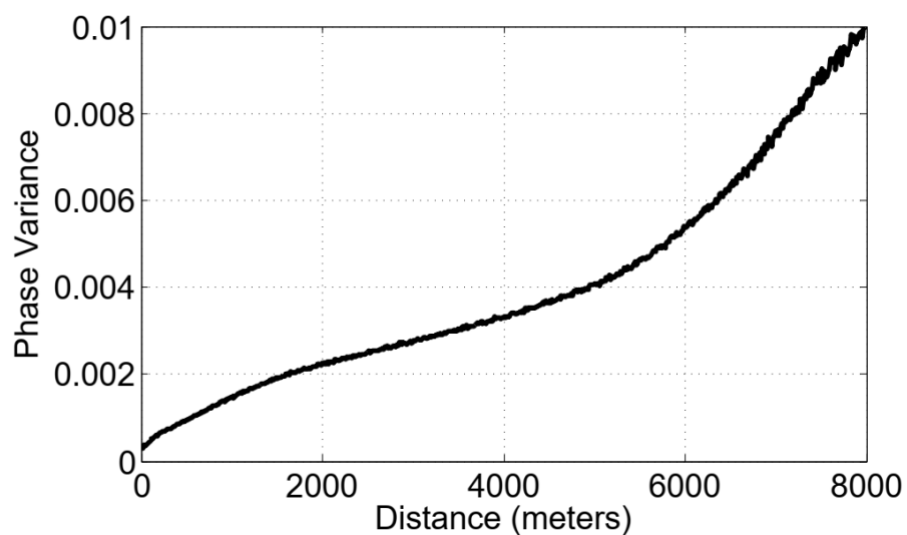


Рисунок 3.8 - Фазова дисперсія як функція відстані

На рисунку 3.8 показано, що, хоча фазова дисперсія збільшується як функція відстані між вузлами, вона залишається в межах 0,004 для вузлів на

відстані 5 км один від одного. Це означає, що Chorus забезпечує жорстку фазову синхронізацію для вузлів, які значно довші, ніж інтерференційний діапазон вузлів, і, отже, дозволяє спільну передачу від кількох передавачів.

На рисунку 3.8 показана медіана фазової дисперсії як функція відстані. Як і слід було очікувати, фазова дисперсія збільшується зі збільшенням відстані між парами вузлів. Крім того, фазова дисперсія залишається меншою за 0,004 для всіх вузлів на відстані 5 км один від одного. Для вузлів, віддалених один від одного, ніж ця відстань, більша дисперсія фази не має значення, оскільки вузли розділені безліччю кратних інтерференційного діапазону, а отже, їхні сигнали не взаємодіють. Це показує, що мережа синхронізації Chorus масштабується до великих мереж. Звичайно, це не означає, що тисячі вузлів будуть одночасно передавати один і той же набір клієнтів. Скоріше це показує, що Chorus може створити абстракцію розподіленої фазової когерентності між тисячами вузлів. Вищі рівні можуть потім обробляти мережу так, як вони обробляють дуже велику масивну систему МІМО, і можуть вільно об'єднувати будь-яку підмножину сусідніх базових станцій для створення мультиплексування або збільшення рознесення для клієнтів.

Висновки до розділу: на основі математичної та програмної моделі було проведено дослідження параметрів роботи мережі стандарту LTE з точки зору впливу різних факторів на продуктивність системи, а саме фазової дисперсії та часу затримок.

ВИСНОВКИ

При виконанні роботи було розроблено математичну та програмну моделі мережі мобільного зв'язку стандарту LTE з використанням технології MIMO. Також розроблена математична модель рознесеного приймання та передачі. На основі цієї моделі було розроблено модель MIMO каналу та програмну модель каналу LTE.

Було проведено дослідження параметрів роботи мережі стандарту LTE з використанням технології MIMO з точки зору впливу різних факторів на продуктивність системи, а саме фазової дисперсії та часу затримок. Показано, що дисперсія фази, що спостерігається на допоміжному вузлі, залишається постійною і низькою, навіть якщо кількість передавачів у проміжному рівні синхронізації збільшується. Використання сервера синхронізації дозволяє збільшити пропускну здатність системи та зменшити рівень завад.

У випадку коли співвідношення сигнал/шум каналу синхронізації становить 6 дБ, медіана фазової дисперсії залишається нижчою за 0,0045. Дослідження впливу фазової дисперсії на завади шляхом вимірювання залишкової інтерференції, показали, що при вивченні дисперсії різниці фаз між двома невеликими комірками якість синхронізації залишається високою, навіть якщо SNR сигналу синхронізації падає.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Hoymann, D. "LTE: The Definitive Guide" / David Hoymann. – 1st ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2010. – 416 p.
2. Про новинки стільникового зв'язку [Електронний ресурс] / 4G – технологии мобильной связи 4-го поколения. Режим доступу: <http://new-phones.ru/articles/281-4g-texnologiiimobilnoj-svyazi-4-go-pokoleniya.html>.
3. Радіодоступ 5G - 1 частина [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://itechinfo.ru/content/сеть-радиодоступа-5g-часть->. Radio Resource Control [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://anisimoff.org/lte/rrc.html>
4. Service Data Adaptation Protocol[Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.mpirical.com/glossary/sdap-service-dataadaptation-protocol>
5. Packet Data Convergence Protocol [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Packet_Data_Convergence_Protocol
6. Radio Link Control [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_Link_Control
7. Medium Access Control [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Medium_access_control
8. Ядро 5G [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.viavisolutions.com/ru-ru/5g-architecture>
9. MME [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/management-entity>

10. GSA – The Global mobile Suppliers Association [electronic resource] // access mode: <http://www.gsacom.com/>. 2. Informa Telecoms & Media [electronic resource] // access mode: <http://media.informatandm.com/>.
11. 4G/LTE в Україні. Діапазони частот, зони покриття, оператори, тарифи. URL:[https://www.workmobiles.ua/tags/LTE v ukraine](https://www.workmobiles.ua/tags/LTE_v_ukraine) (10.03.2020).
12. Явіся В.С., Вакуленко О.В. Оцінка швидкості передавання у мережах 4G // XI.
13. Науково-практична конференція «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил». Доповіді та тези доповідей. К.: BITI. 2018. С. 238-239.
14. Oberli C., Linnenbach R. "LTE and 4G Technology in Mobile Communications: Standards and Evolution" / Christian Oberli, Rüdiger Linnenbach. – 1st ed. – Berlin: Springer, 2012. – 350 p.
15. В Україні перерозподілили частоти для 4G. URL: <https://deps.ua/novosti/novosti-rynka/item/68243.html>.