

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

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
дипломної роботи

бакалавра
(назва освітнього рівня)

галузь знань	<u>17 Електроніка та телекомунікації</u> (шифр і назва галузі знань)
спеціальність	<u>172 Телекомунікації та радіотехніка</u> (код і назва спеціальності)
освітній рівень	<u>магістр</u> (назва освітнього рівня)
кваліфікація	<u>бакалавр з телекомунікацій та радіотехніки</u> (код і назва кваліфікації)

На
тему: «Дослідження завадостійкості каналів радіозв'язку з технологією
MIMO»

Виконавець: студент 5 курсу, групи 172-19зск-1

Алтухов Денис Дмитрович
(підпис) (прізвище ім'я по-батькові)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	Проф. Гусев О.Ю.		
розділів:			
спеціальний	Проф. Гусев О.Ю.		
економічний	Доц. Романюк Н.М.		
Рецензент			
Нормоконтроль	Проф. Гусев О.Ю.		

Дніпро
2022

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

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
безпеки інформації та телекомунікацій
д.т.н., професор _____ Корнієнко В.І.
« _____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу бакалавра

спеціальність _____ 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва спеціальності)

студента _____ 172-19зск-1
(група)

_____ Алтухов Денис Дмитрович
(прізвище ім'я по-батькові)

Тема дипломного проекту «Дослідження завадостійкості каналів радіозв'язку з технологією MIMO»

Наказ ректора НТУ "ДП" від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
<i>Стан питання. Постановка задачі</i>	Аналітичний огляд літератури по темі проекту	Квітень 2022
<i>Спеціальна частина</i>	Принцип роботи систем передачі даних на базі використання OFDM-систем зв'язку. Розробка моделі в середі MATLAB. Оформлення пояснювальної записки.	Травень 2022
<i>Економічний розділ</i>	Розрахунок капітальних витрат	Травень 2022

Завдання видав _____
(підпис)

Гусєв О.Ю.
(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв
до виконання _____
(підпис)

Алтухов Д.Д.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: 01 квітня 2022 р.

Строк подання дипломного проекту до ДЕК:

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: с., рис., табл., додатків, джерел.

Об'єкт розробки: системи зв'язку .

Предмет розробки: завадостійкість систем зв'язку з технологією MIMO.

Мета дипломної роботи: дослідження завадостійкості систем зв'язку з OFDM-MIMO.

В першому розділі виконаний аналітичний огляд літературних джерел по темі дипломної роботи. Здійснено постановку задачі роботи.

У другому розділі розроблено структуру та імітаційну модель каналу MIMO системи зв'язку з OFDM. Виконано модельний експеримент і проведено аналіз результатів.

У третьому розділі виконано розрахунок капітальних витрат на розробку імітаційної моделі каналу MIMO системи зв'язку з OFDM.

СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, МОДЕЛЬ СИСТЕМИ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МОДУЛЯЦІЯ, МАНІПУЛЯЦІЯ, МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ, КАНАЛ MIMO

ABSTRACT

Explanatory note: pp. , fig. , table , append. , sources .

Object of development: communication systems.

Subject of development: noise immunity of communication systems with MIMO technology.

The purpose of the thesis: study of noise immunity of communication systems with OFDM.

In the first section an analytical review of literature sources on the topic of the thesis is performed. The task of the work is set.

The second section develops the structure and simulation model of the MIMO channel of the OFDM communication system. A model experiment was performed and the results were analyzed.

In the third section, the calculation of capital costs for the development of a simulation model of the MIMO channel of the OFDM communication system is performed.

DATA TRANSMISSION SYSTEMS, SYSTEM MODEL, SIMULATION MODELING, MODULATION, MANIPULATION, MOBILE COMMUNICATION, COMMUNICATION SYSTEMS

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BER	BitErrorRate/ Відносна частота помилок на біт
FDD	FrequencyDivisionDuplex/Дуплексний режим поділу частоти
FFT	FastFourierTransform/ Пряме швидке перетворення Фур'є
HARQ	HybridAutomaticRepeatRequest/ Гібридна автоматична трансмісія на вимогу
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform/ Зворотне швидке перетворення Фур'є
IP	InternetProtocol/ Протокол роботи в Інтернеті
ITU	International Telecommunication Union/ Міжнародний союз Телекомунікацій
LS	LeastSquare/ Метод найменших квадратів
LTE	LongTermEvolution/ Довгострокова еволюція: бездротові мережі 4G
MCS	ModulationandCodingScheme/ Схема модуляції та кодування
MIMO	Multiple-Input-Multiple-Output/ Багатосистемний антени на передавальних і приймальних сторонах
MMSE	Minimum Mean-Square Error / Мінімальна помилка RMS
OFDM	OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing/ Ортогональних розподіл частоти з мультиплексуванням
OFDMA	Orthogonal-FrequencyDivisionMultipleAccess / Багатостанційний доступ з ортогональним частотним ущільненням
QAM	QuadratureAmplitudeModulation/Квадратурна амплітудна модуляція
QPSK	QuadraturePhaseShiftKeying/Квадратурна фазова модуляція
SAE	SystemArchitectureEvolution/ Еволюційна архітектура мережі
SC-FDMA	SingleCarrier - FrequencyDivisionMultipleAccess/ Багатостанційний доступ з поділом частоти на одному носії
SISO	Single-Input-Single-Output/ Системи з однією антеною на стороні приймаюча і однією антеною на передавальній стороні
TDD	TimeDivisionDuplex/Двобічний режим поділу часу
WiFi	WirelessFidelity/ Бездротова вірність (бездротовий стандарт)
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access/ Глобальна сумісність для мікрохвильового доступу (стандарт доступу до мікрохвильового радіо)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ... ..	
1.1 Технологія LTE.....	
1.2 Технології систем четвертого покоління.....	
1.2.1 Множинний доступ.....	
1.2.2 Технологія OFDM.....	
1.2.3 Гібридна процедура повторної передачі на запит.....	
1.2.4 Адаптація системи до характеристик каналу.....	
1.2.5 Керування потужністю.....	
1.2.6 Диспетчерізація.....	
1.2.7 Архітектура мережі SAE.....	
1.3 Технологія багатоантенної передачі.....	
1.4 Канальні моделі з технологією MIMO.....	
1.5 Постановка задачі.....	
1.6 Висновки.....	
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	
2.1 Імітаційна модель каналу LTE	
2.2 Модель каналу MIMO.....	
2.3 Дослідження ефективності технології MIMO в різних каналах.....	
2.3.1 Дослідження завадостійкості	
2.3.2 Спектри сигналів і діаграми розсіювання.....	
2.4 Висновки.....	
3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	
3.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку імітаційної моделі MIMO-системи зв'язку.....	
3.1.1 Визначення трудомісткості розробки моделі.....	

3.1.2 Розрахунок витрат на розробку моделі.....	
3.1.3 Розрахунок капітальних витрат.....	
3.2 Висновки.....	
ВИСНОВКИ.....	
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	
Додаток А.....	
Додаток Б.....	
Додаток В.....	

ВСТУП

Технології бездротового широкосмугового доступу (BSD) останнім часом швидко розвиваються. Велика кількість технологій, таких як широко використовувані в даний час WiMax і LTE, дозволяють абонентам отримати високошвидкісний доступ до різноманітних сучасних сервісів (голосовий, відео, інтернет, мобільне телебачення). У зв'язку з цим в останнє десятиліття стрімко розвиваються технології на базі OFDM-MIMO.

Технологія MIMO зменшує радіопомилки, не жертвуючи швидкістю передачі, використовуючи кілька шляхів поширення сигналу, що робить її більш імовірною для роботи на шляхах, які мають менше проблем з завмираннями і надмірним відображенням.

Завдяки використанню просторового різноманіття в системах доступу четвертого покоління на основі технології MIMO досягається швидкість до 300 Мбіт /с.

Як і раніше, гостро стоїть питання впливу умов поширення радіохвиль на роботу систем зв'язку. Канал є єдиною частиною системи, яка не може бути правильно спроектована, тому оцінка параметрів каналу важлива для роботи інших компонентів системи.

Оскільки характеристики каналу з часом не є постійними, необхідно враховувати ці зміни і адаптувати процес передачі. Ця функція реалізована в сучасних стандартах.

В данной работе рассматриваются различные модели каналов, их характеристики помехоустойчивости, а также способы их оценки.

1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Технологія LTE

3GPP Long Term Evolution (3GPP LTE) (довгострокова розробка) - це мобільний протокол передачі даних, який є рішенням для поліпшення стандарту UMTS (проект 3GPP, що відповідає третьому поколінню мобільного зв'язку) для задоволення майбутніх потреб у швидкості передачі даних.

Розробка технології LTE як стандарту офіційно почалася в кінці 2004 року. Основною метою досліджень на початковому етапі був вибір технології фізичного шару, яка могла б забезпечити високі швидкості передачі даних. В якості основних були запропоновані два варіанти: розробка існуючого інтерфейсу W-CDMA (використовується в HSPA-High Speed Packet). В результаті дослідження єдиною відповідною технологією стала OFDM, а в травні 2006 року в 3GPP була створена перша специфікація на радіоінтерфейсі Evolved – UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Перші попередні специфікації LTE були створені в рамках так званого випуску 3GPP Release 7. А в грудні 2008 року був затверджений Release 8, що фіксує архітектурні та функціональні вимоги до системи LTE [2].

Основні вимоги до LTE:

- зниження затримки, з точки зору встановлення з'єднання та затримки передачі;
- збільшення швидкості передачі даних користувача;
- збільшення швидкості передачі даних на межі стільника;
- підвищення спектральної ефективності, пошук можливості;
- використання старих частот;
- спрощення архітектури мережі;

- безшовна мобільність, включаючи перемикання між технологіями радіодоступу;
- розумне енергоспоживання для мобільної станції.

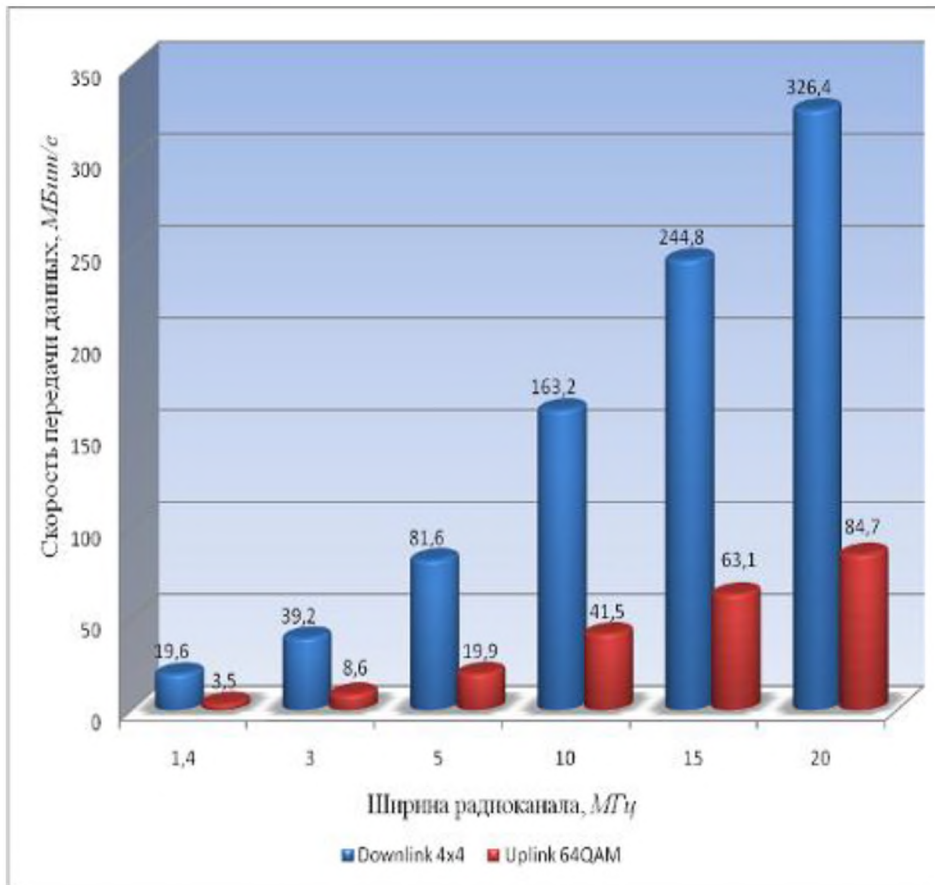


Рисунок 1.1 – Максимальна швидкість передачі даних при різних ширинах радіоканалів

Швидкість передачі даних за стандартом 3GPP LTE (рис. 1.1) в теорії досягає 326,4 Мбіт / с в зворотному зв'язку і 84,7 Мбіт / с - в висхідному посиленні [3]. У системі LTE вдалося домогтися зменшення затримки відповіді, тобто часу між відправкою запиту і отриманням даних. Для забезпечення двоспрямованої передачі даних між ВС і МС технології LTE підтримує як частоту (FDD), так і дуплекс часу (TDD). Для дуплексу частоти визначено 15 парних діапазонів частот (частот від 800 МГц до 3,5 ГГц), так і для тимчасового - 8. Однак ширина радіоканалу може бути різною. Ці

характеристики дозволяють задовольнити потреби різних операторів зв'язи, мають різну пропускну здатність. У той же час, обладнання LTE може підтримувати одночасно не менше 200 активних з'єднань (тобто 200 телефонних дзвінків) на стільнік 5 МГц. Система LTE побудована повністю на основі комутації пакетів, а подвійний режим дає можливість одночасно підтримувати голосову і передачу даних.

1.2 Технології систем четвертого покоління

1.2.1 Множинний доступ

Як кілька систем доступу в LTE на лінії біля ліній вгору і вниз, WiMax використовує OFDMA - багатостанційний доступ на основі ортогональної частотної мультиплексації. Ця технологія вирішує проблему усунення міжсимвольних перешкод, які виникають при високошвидкісній передачі даних за рахунок багатопроміневого поширення сигналу.

У LTE OFDM був залишений на лінії вгору, так як при додаванні багатьох ортогональних підвісів формується сигнал з великим піковим фактором (відношення максимальної потужності сигналу до середньої) [2]. Для передачі такого сигналу без спотворень потрібен високолінійний, а значить і дорогий підсилювач. Для спрощення терміналів було вирішено використовувати технологію SC-FDMA (Single Carrier - Частотний відділ множинного доступу) - мультиплексування на одному носії. Різниця між SC-FDMA і OFDMA полягає в тому, що SC-FDMA використовує додаткову обробку сигналів для зниження пікового фактора, підсилювач в цьому випадку може працювати в більш ефективному режимі, з більш високою ефективністю. SC-FDMA використовує перетворення Фур'є як таку додаткову обробку сигналів.

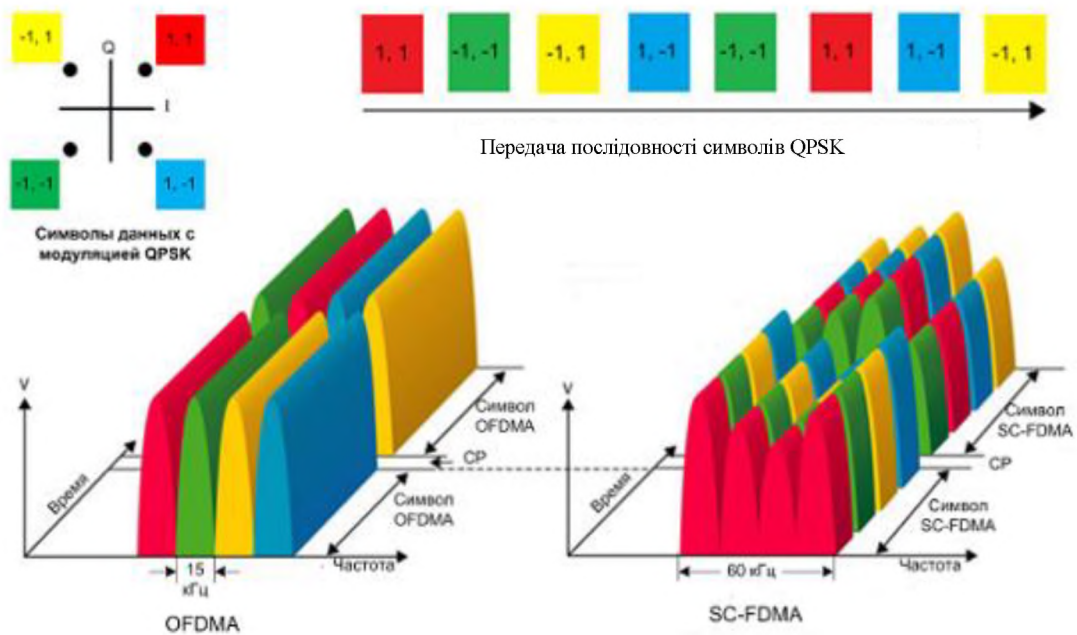


Рисунок 1.2 – Відмінність між OFDM і SC-FDMA

При використанні технології OFDM весь діапазон частот ділиться на невеликі смуги, в які розміщуються піднесучі, ортогональні один до одного. Залежно від використовуваної ширини каналу загальна кількість піднесучих може становити 72, 180, 300, 600, 900 або 1200. Кожна з піднесучих може мати свій вид модуляції. Можна використовувати такі модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM. Множинний доступ, організований тим, що одна частина піднесучих виділяється одному користувачеві в кадрі, інша частина - другому користувачеві і так далі.

Весь ресурс каналу ділиться на *блоки ресурсів (РБ)*. Один блок складається з 12 суміжних піднесучих, що займають смугу 180 кГц (одна піднесуча займає невелику смугу 15 кГц) і одного часового інтервалу (6 або 7 символів OFDM загальною тривалістю 0,5 мс). Кожен символ OFDM на кожному з піднесучих утворює елемент ресурсу (РЕ,).

У звичайній конфігурації (зі стандартною циклічною тривалістю префікса і, отже, 7 символів OFDM в одному слоті), кожен блок ресурсів включає $12 \times 7 = 84$ елементи ресурсу в низхідному посиленні.

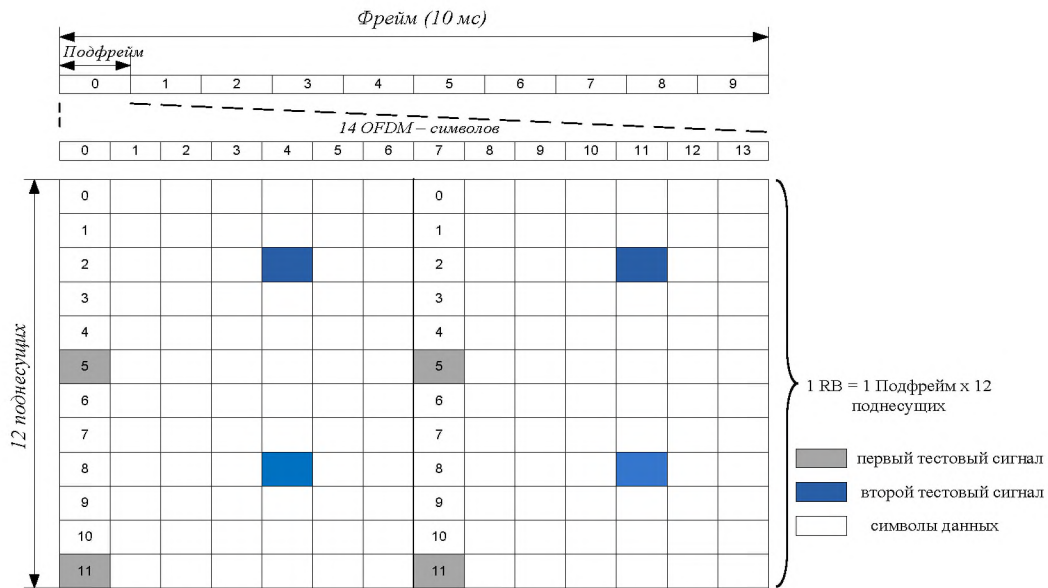


Рисунок 1.3 – Розташування тестових сигналів у ресурсних блоках

Частина елементів ресурсу використовується для передачі пілотного (опорного) сигналу.

Опорні сигнали в радіоінтерфейсі LTE використовуються для безпосередньої оцінки стану каналу передачі, так як приймач знає своє місцезнаходження в загальному радіоресурсі і її початкову форму. На основі вимірювань можна визначити реакцію каналу на інші піднесучі частоти і, використовуючи інтерполяцію, відновити їх первісну форму. LTE надає три типи опорних сигналів:

1. *Cell - specific*. Опорний сигнал, що характеризує осередок;
2. *UE – specific reference signals*. Сигнал, пов'язаний з конкретним абонентським пристроєм;
3. *MBSFN (Multicast/Broadcast, Single Frequency)* - сигнал для спеціального мультимедійного сервісу трансляції.

Сигнал *Cell - specific* транслюється в кожному підфрейму низхідного каналу, крім випадків MBSFN - передачі. Форма сигналу визначається на основі псевдовипадкової послідовності Голда, при ініціалізації якої використовується Cell ID (ідентифікатор осередку). У частотній області такі

сигнали передаються через кожні п'ять піднесучих частот. Сигнал Cell - specific або Reference Signal при стандартному циклічному префіксі транслюється в нульовому та четвертому OFDM - символах (рис.1.4). У цьому смуга, займана кожним сигналом, становить 15 кГц.

При використанні технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) приймач повинен оцінити стан каналу від кожної антени. У цьому випадку у напрямку Downlink здійснюється послідовна передача тестових сигналів з кожної антени. При двох передавальних антенах розподіл пілот - символів виглядатиме так [17].

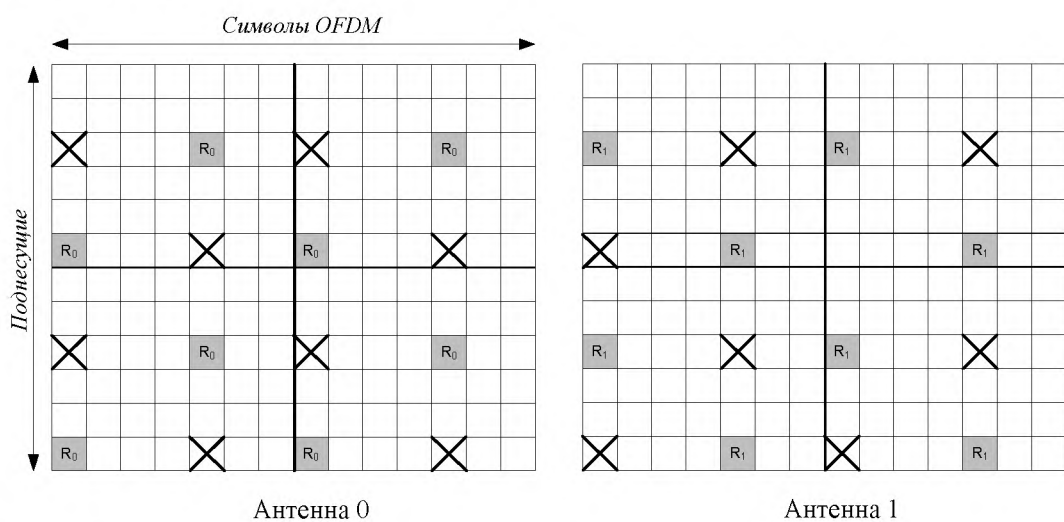


Рисунок 1.4 – Розташування тестових сигналів у ресурсних елементах при MIMO

Опорний сигнал UE – specific reference signals передається через окремий антенний порт 5 і повідомляє конкретному абонентському терміналу інформацію, необхідну для демодуляції низхідних каналів передачі даних.

1.2.2 Технологія OFDM

Як ефективний метод поділу каналів для систем стільникового зв'язку нових поколінь прийнятий метод множинного доступу на основі ортогонального частотного мультиплексування OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) у поєднанні з перешкодостійким видом модуляції

QPSK і спектрально - ефективними видами модуляції більш високого порядку 16QAM, 64QAM.

При OFDM передача даних побудована на формуванні загального багаточастотного сигналу, що складається з множини піднесучих вузькосмугових частот (рис. 1.5). При цьому кожна піднесуча може мати свій тип модуляції.

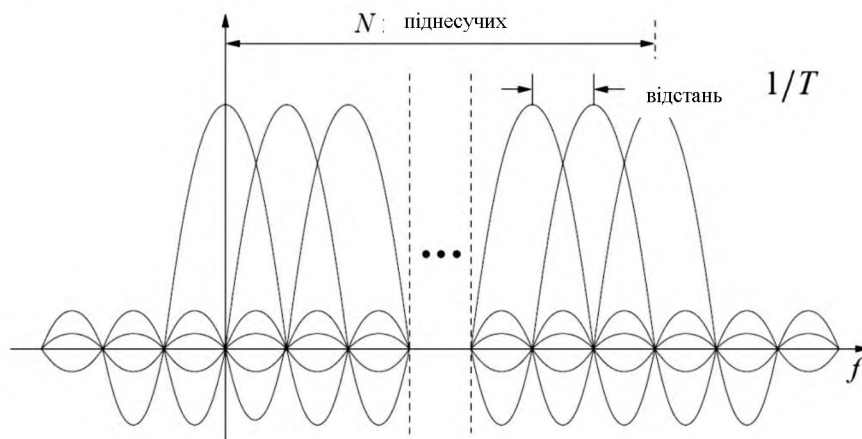


Рисунок 1.5 – Спектр OFDM - сигналу

Перерахуємо деякі особливості OFDM.

1 Піднесучі частоти в груповому спектрі OFDM - ортогональні сигнали. Це дозволяє розділяти піднесучі в приймачі, навіть при частковому перекритті їх спектрів. Запишемо умову ортогональності піднесучих частот f_n на інтервалі тривалості T_u :

$$\int_0^{T_u} f_m(t) f_l(t) dt = \begin{cases} 0 & \text{при } m \neq l \\ 1 & \text{при } m = l \end{cases} \quad (0.1)$$

де $f_m(t), f_l(t)$ - функції сигналу на m -й та l -й піднесучих частотах.

Для того, щоб ця умова виконувалася, постійне рознесення між піднесучими частотами дорівнює:

$$\Delta f = f_n - f_{n-1} = 1/T_u. \quad (1.2)$$

Тобто на інтервалі T_u має укладатися ціла кількість періодів різницевої частоти. Це досягається за рахунок введення спеціальних синхронізуючих сигналів.

2. Оскільки піднесучі частоти вузькосмугові, система має велику стійкість до впливу багатопроменевості в радіоканалі. При цьому суттєво знижується ефект міжсимвольної інтерференції перевідбитих сигналів, що дозволяє забезпечувати роботу системи в умовах відсутності прямої видимості між базовою станцією та мобільною станцією. Ця особливість пояснюється збільшенням тривалості корисного символу T_u і запровадженням додаткового захисного інтервалу T_g .

У цьому T_u повинен значно перевищувати T_g (для забезпечення мінімальних втрат у швидкості передачі). Тривалість T_g має перевищувати максимальний час затримки приходу перевідбитих сигналів. По суті T_g є копією частини OFDM - символу, взяту з кінця корисного інтервалу. Цей інтервал називається циклічним префіксом (CP – Cyclic Prefix) тривалістю 4,8 мкс (рис. 1.6).

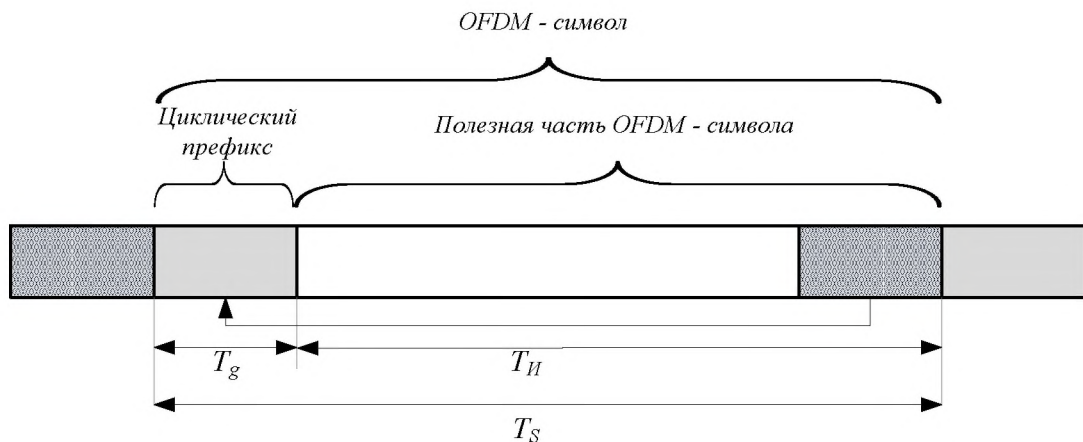


Рисунок 1.6 – Часова структура OFDM - символу в LTE

Таким чином, OFDM-символ являє собою сигнал, що передається на інтервалі T_s , протягом якого значення параметрів модуляції піднесучих залишаються постійними. Так як кожна піднесуча може модулюватися одним з трьох видів модуляції (QPSK, 16QAM, 64QAM), то один символ на одній піднесучій частоті містить 2, 4 або 6 біт переданих даних.

З технічної точки зору OFDM реалізується шляхом виконання зворотного дискретного перетворення Фур'є (IFFT - Inverse Fast Fourier Transform) у модуляторі на передавальній стороні та прямого перетворення Фур'є (FFT) у демодуляторі на приймальній стороні (рис. 1.7).

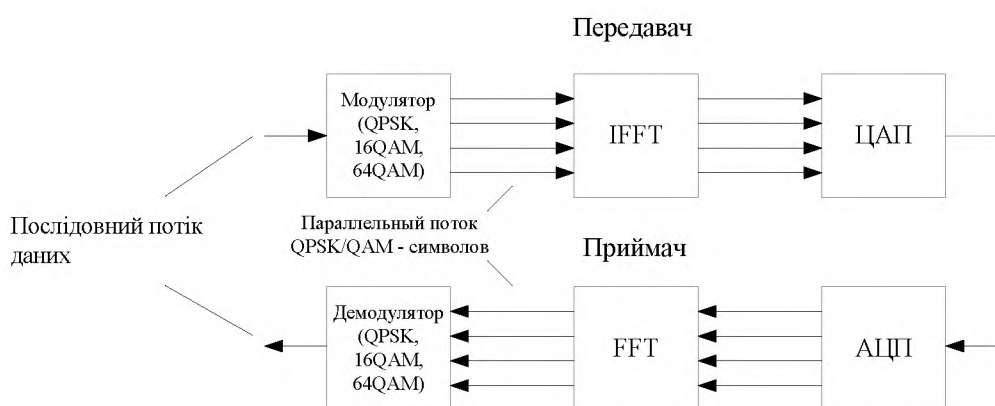


Рисунок 1.7 – Формування та прийом OFDM - сигналу

При формуванні OFDM-сигналу послідовний потік даних розбивається на блоки, що містять N символів. Кожен блок послідовності інформаційних символів перетворюється на паралельний потік, в якому кожен із символів відповідає певній піднесучій певного багаточастотного сигналу. При цьому тривалість такого символу збільшується в N раз і стає рівною T_u . Далі кожен символ із знову утвореного паралельного потоку піддається одному з видів модуляції. Отримане безліч паралельних модульованих КАМ-символів шляхом ОДПФ поєднується в сукупність ортогональних частот, що утворюють один єдиний широкосмуговий OFDM-сигнал. Сумарна ширина діапазону багаточастотного сигналу відповідає ширині діапазону вихідного

послідовного сигналу. Далі сигнал перетворюється на високочастотний аналоговий радіосигнал за допомогою ЦАП і передається на радіоканал.

Таким чином, основними перевагами OFDM - модуляції є:

- висока швидкість передачі;
- ефективність використання радіочастотного ресурсу;
- стійкість до негативного впливу багатопроменя в радіоканалі;
- застосування для формування та обробки сигналу порівняно простого перетворення Фур'є.

Однією із основних особливостей OFDM є застосування адаптивної схеми модуляції. У цій схемі залежно від умов радіоканалу використовуються різні схеми модуляції для груп піднесучих частот, призначених окремим каналам користувача. Адаптивний вибір кожної схеми модуляції забезпечує компроміс між спектральною ефективністю, тобто швидкістю передачі даних, і якістю їхнього прийому, яке прийнято характеризувати ймовірністю помилки на біт (BER – bit error rate).

Спектральна ефективність за різних методів модуляції: 1-2 біт/с/Гц - QPSK, 4-6 біт/с/Гц - 16QAM, 64QAM. Менш завадостійкими є методи модуляції вищого порядку. Найбільш завадостійкою є QPSK при низьких швидкостях завадостійких кодів.

Таким чином, адаптація схем модуляції є певною мірою аналогом динамічного регулювання потужності в радімережі і може використовуватися комплексно з нею. Тобто, за наявності запасу потужності на БС для абонентського терміналу, на краю стільника може бути призначена модуляція вищого порядку. Це станеться за рахунок збільшення потужності БС для даного терміналу.

1.2.3 Гібридна процедура повторної передачі на запит

У системах WiMax та LTE використовується процедура повторної передачі HARQ (Hybrid Automatic Repeatre Quest) (рис.1.8). Особливість її реалізації в LTE у тому, що одночасно може підтримуватись кілька (до 8) HARQ-процесів. Завдяки спрощеній архітектурі LTE (у WiMax, як правило, є контролер базових станцій, а в LTE немає) скоротився час на обробку пакетів до 10 мс, проти 30 мс у WiMax [1].

Якщо дані, пов'язані з HARQ-процесом, прийняті успішно, приймач відправляє повідомлення про успішний прийом/неприйм даних (ACK/NACK). У разі відсутності підтвердження або повідомлення NACK, відбувається повторна передача.

Для об'єднання повторно переданих пакетів у цих технологіях використовуються різні процедури. У WiMax здійснюється просте об'єднання повторно - переданих пакетів, а LTE при кожній наступній повторній передачі збільшується число перевірочних біт у пакеті. Другий метод набагато ефективніший і дає помітний енергетичний виграш.

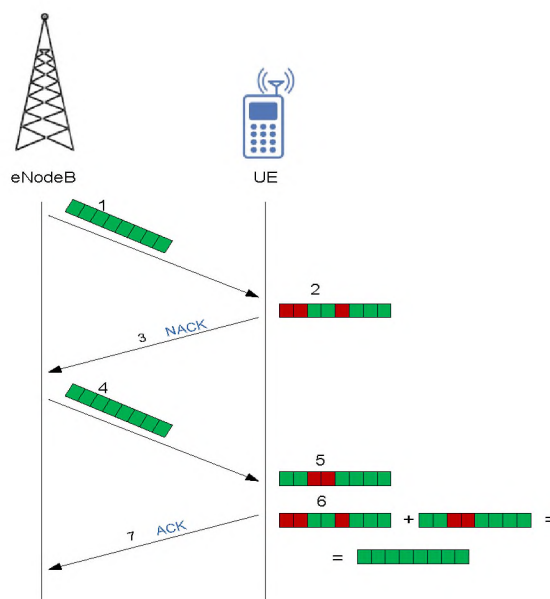


Рисунок 1.8 – Процедура HARQ

1.2.4 Адаптація системи до характеристик каналу

У сучасних системах радіодоступу існує можливість максимально врахувати умови поширення радіохвиль у каналі та адаптуватися до них за рахунок вибору найбільш підходящої схеми модуляції та кодування MCS (Modulation and Coding Scheme). Квадратурна амплітудна модуляція QPSK/16QAM/64QAM може комбінуватися з завадостійким кодуванням з різними кодovими швидкостями.

LTE доступні 29 схем MCS з яких вибирається та, яка забезпечує максимальну пропускну здатність при даному стані каналу. Чим ближче абонент до eNodeB, тим вище якість обслуговування йому надається. У WiMax число схем набагато менше, а точність налаштування на канал грубіша.

1.2.5 Керування потужністю

У будь-якій стільниковій мережі підтримуються процедури управління потужністю передавачів для боротьби із завмираннями та компенсації втрат на лінії. У класичному алгоритмі потужність випромінювання сигналів користувача повинна бути такою, щоб рівні сигналів різних користувачів надходили на вхід приймача eNodeB з ОСШ, рівним деякому пороговому значенню. Такий алгоритм використовується у WiMax.

У LTE застосовується часткове керування потужністю. Порогове ЗСШ змінюється для користувачів залежно від їхнього становища в соті. Чим ближче абонент до eNodeB, тим більше вписувалося поріг ОСШ як критерій регулювання потужності. Тобто поблизу базових станцій UE працює з вищим ставленням сигнал/шум, з вищою схемою MCS, а отже, з вищою спектральною ефективністю. Крім того, працюючи з підвищеною потужністю, UE справляється з внутрішньосистемною інтерференцією – пригнічує соканальні перешкоди.

Кожна базова станція LTE контролює рівень перешкод від сусідніх стільників. Періодично eNodeB обмінюються індикаторами навантаження ОІ (Overload Indicator), що вказують, у якому ресурсному блоці рівень перешкод перевищує граничне значення. Параметри керування потужністю встановлюються залежно від прийнятого ОІ. Якщо виявляється блок з високим рівнем перешкод, базова станція посилає команду знизити потужність UE, випромінювану в даному ресурсному блоці.

1.2.6 Диспетчеризація

Під диспетчеризацією розуміється процес розподілу мережевих ресурсів між користувачами [2]. Мета диспетчеризації - збалансувати якість зв'язку та загальну продуктивність системи. У LTE передбачена динамічна та статична диспетчеризації. Динамічна розподіляє ресурси, залежно від поточного стану каналу зв'язку. Вона забезпечує передачу даних на підвищених швидкостях (за рахунок модуляції вищого порядку, зменшення ступеня кодування каналу, передачі додаткових потоків даних та меншої кількості повторних передач), задіявши для цього тимчасові та частотні ресурси з відносно добрими умовами зв'язку. Таким чином, для передачі будь-якого конкретного обсягу інформації потрібно менше часу.

Для трафіку сервісів, що пересилають пакети з невеликим корисним навантаженням і через однакові проміжки часу (наприклад, IP - TV), обсяг службової інформації, необхідний динамічної диспетчеризації, може перевищити обсяг корисних даних. Для таких випадків у LTE передбачена статична диспетчеризація.

1.2.7 Архітектура мережі SAE

Для технології LTE консорціум 3GPP запропонував нову мережну інфраструктуру (SAE – System Architecture Evolution). Мета та сенс концепції SAE – ефективна підтримка широкого комерційного використання будь-яких послуг на базі IP та забезпечення безперервного обслуговування абонента

при його переміщенні між мережами бездротового доступу, які не обов'язково відповідають стандартам 3GPP (GSM, UMTS, W-CDMA, тощо)

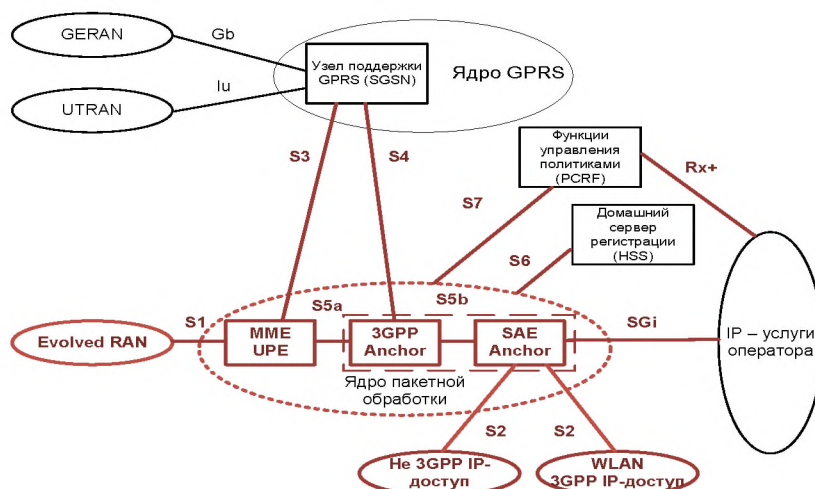


Рисунок 1.9 – Основні компоненти архітектури SAE

У мережі SAE можна використовувати лише два типи вузлів - базові станції (evolve dNodeB, eNodeB) та шлюзи доступу (Access Gateway, AGW).

Зменшення кількості типів вузлів дозволить операторам знизити витрати як на розгортання мереж LTE/SAE, так і їх подальшу експлуатацію.

Ядро мережі (Core Network) SAE включає чотири ключові компоненти:

1) модуль управління мобільністю (Mobile Management Entity, MME), що забезпечує зберігання службової інформації про абонента та управління нею, авторизацію термінальних пристроїв та загальне управління мобільністю;

2) модуль управління абонентів (User Plane Entity, UPE), який відповідає за встановлення низхідного з'єднання, шифрування даних, маршрутизацію та пересилання пакетів;

3) 3GPP якір (3GPP anchor), що виконує роль шлюзу між мережами 2G/3Gi LTE;

4) SAE якір (SAE anchor) використовується для підтримки безперервності сервісу при переміщенні абонента між мережами, як відповідними специфікаціями 3GPP, так і не відповідними (WLAN). Останні

два компоненти є абсолютно нові елементи архітектури ядра мережі мобільного зв'язку (Evolved Packet Core) і зобов'язані своєю появою вимоги підтримки мобільності при переміщенні абонента між мережами різних типів.

Важлива особливість SAE - дані користувача можуть пересилатися між базовими станціями безпосередньо, причому як за допомогою провідного, так і бездротового зв'язку (інтерфейс X2). Це особливо важливо при хендовері для швидкого безшовного перемикання користувача між базовими станціями. Можлива передача даних між eNodeB і через шлюзи транспортної IP-мережі.

1.3 Технологія багатоантенної передачі

Вимоги до пропускної спроможності мобільних мереж дуже високі і при цьому вони постійно зростають. Очевидні варіанти збільшення пропускної спроможності - збільшення ширини каналу та використання модуляцій вищого порядку, що не дозволяють повністю вирішити задачу забезпечення високої пропускної спроможності. Частотний діапазон обмежений. А використання модуляції вищого порядку передбачає підвищення відношення сигнал/шум, що теж має свою межу. Ще одним способом збільшення пропускної спроможності бездротових систем є використання декількох передавальних та приймальних антен (MIMO – Multiple Input Multiple Output) та спеціальна обробка сигналу в цьому випадку.

Технологія MIMO (рис. 1.10) дозволяє значно збільшити стійкість до перешкод каналів зв'язку, тобто. зменшити відносне число біт, прийнятих з помилкою, без зменшення швидкості передачі в умовах багатопроменевого поширення.

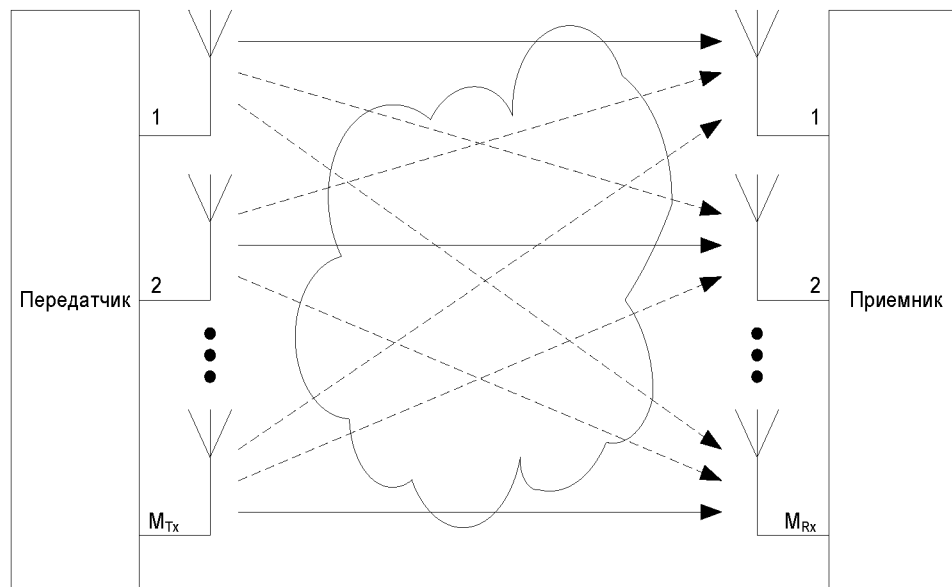


Рисунок 1.10 – Общая схема системы ММО

Технологію ММО можна вважати не технологією, а шляхом формування каналу зв'язку з кількома антенами [4]. ММО об'єднує в собі цілу низку технологій:

- 1) використання "інтелектуальних" антен, що дозволяють формувати вузьку спрямованість передачі даних (промені), усувати перешкод, що заважають впливу, за рахунок їх компенсації в приймальному пристрої;
- 2) використання просторово-часового кодування (Space Time Coding, STC);
- 3) використання поляризаційного поділу каналів, поляризаційної обробки сигналів.

Всі різновиди цієї технології спрямовані на досягнення однієї мети - збільшення пікової швидкості передачі даних в мережах зв'язку за рахунок покращення стійкості до перешкод.

Якщо в системі ММО можна передати від приймача до передавача інформацію про характеристики каналу поширення радіохвиль, то на передавальній та приймальній сторонах є можливість сформувати оптимальним чином діаграми спрямованості багатoelementних антен так,

щоб просторові канали розповсюдження окремих потоків найменше інтерферували між собою, що значно підвищує енергетичний бюджет з'єднання.

Саме такий принцип закладено в LTE, де реалізується схема MIMO із зворотним зв'язком CL-MIMO (Close Loop MIMO). У приймачі після оцінювання каналу вибирається відповідна прекодувальна матриця.

Номер оптимальної матриці PMI (Precoding Matrix Indicator) посилається передавачу. Зворотній зв'язок у схемі MIMO WiMax не передбачено. На противагу CL-MIMO існує схема OL – MIMO (Open Loop MIMO), без зворотного зв'язку. Тут, на передавальній стороні відсутня інформація про канал поширення радіохвиль.

Розрізняються у цих системах схеми каналного кодування, що передують обробці MIMO. У WiMax - послідовне кодування, а LTE - паралельне. При паралельній схемі вхідні дані демультимплексуються на два потоки, кожен з яких окремо піддається завадостійкого кодування.

Закодовані потоки подаються до схеми MIMO. На приймальній стороні здійснюються зворотні операції, після зняття завадостійкого коду в обох гілках декодовані дані подаються назад до приймача - обробник MIMO: реалізується ітераційний алгоритм спільної демодуляції MIMO і каналного декодування, що дозволяє помітно покращити роботу приймача і знизити потрібне його відношення. Цей алгоритм називається алгоритмом послідовного виключення демодулованих компонент SIC (Successive Interference Cancellation). При послідовному каналному кодуванні, як і WiMax, цей алгоритм нереалізований.

Розглянемо приріст продуктивності, що очікується від використання MIMO [5]. На рис. 1.11 показана залежність швидкості передачі від відношення сигнал/шум. Прийmemo ширину радіоканалу 100 кГц. Порівнюватимемо системи з $M = 1, 2, 4$ антенами. Для простоти

характеристики каналу приймаються постійними. Якщо припустити, що мета отримувати ОСШ дорівнює 25 дБ, система з $M = 1$ (Single Input Single Output) може забезпечити швидкість передачі даних 0.7 Мбіт/с. З числом антен $M = 2$ та 4 ми можемо реалізувати швидкість передачі даних 1,4 та 2,8 Мбіт відповідно. Це збільшення швидкості передачі даних реалізується без збільшення потужності або розширення діапазону, що використовується в порівнянні з системою SISO. В принципі, з використанням системи SISO можна досягти швидкості передачі даних 2,8 Мбіт/с при ЗСШ 25 дБ, якщо збільшити ширину діапазону пропускання до 400 кГц, або, альтернативно, при ширині смуги 100 кГц, домогтися вхідного ЗСШ рівного 88 дБ.

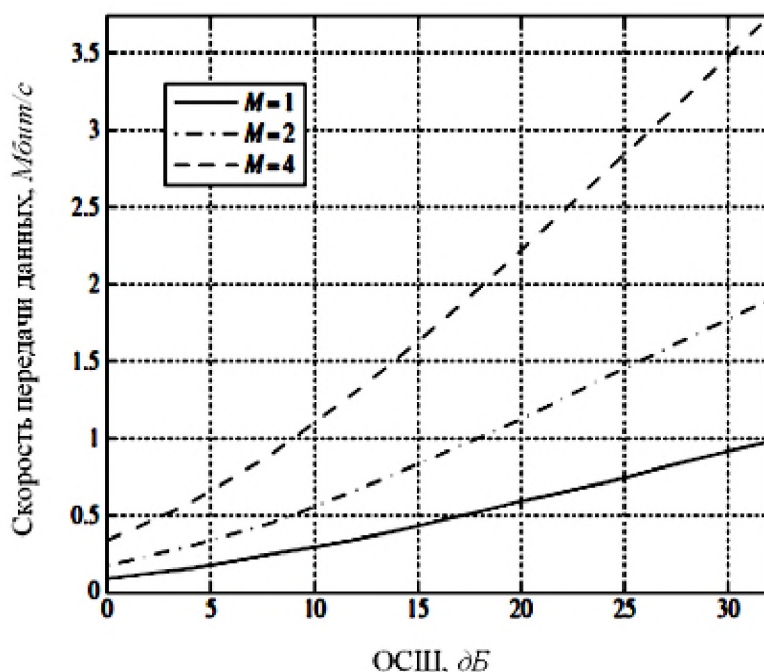


Рисунок 1.11 – Залежність швидкості передачі від ОСШ при різному числі антен

У MIMO - системах є три основних види передачі: просторове мультиплексування (spatial multiplexing), рознесена передача (transmit diversity) та формування спрямованого променя (beamforming) (рис. 1.12). Перший режим означає, що кожен антенний канал транслює незалежний інформаційний потік. При цьому самі канали мають бути некорельованими. Можливо два види просторово – мультиплексованої передачі – для одного

терміналу користувача (Single User MIMO, SU – MIMO) та для кількох терміналів (Multi User MIMO, MU – MIMO). У першому випадку eNodeB передає кілька незалежних потоків даних одному UE. У MU - MIMO ресурсні елементи з однаковими частотно - часовими параметрами повинні прийматись різними UE. Рознесена передача передбачає, що через кілька антен передається один потік даних із деякою тимчасовою затримкою. Ця техніка призначена для боротьби із завмираннями в радіоканалі та спрямована лише на покращення якості передачі в каналі. На швидкість передачі впливає незначно.

Формування спрямованого променя має на увазі під собою концентрацію енергії в одному або кількох напрямках, шляхом формування променя або шляхом попереднього кодування.

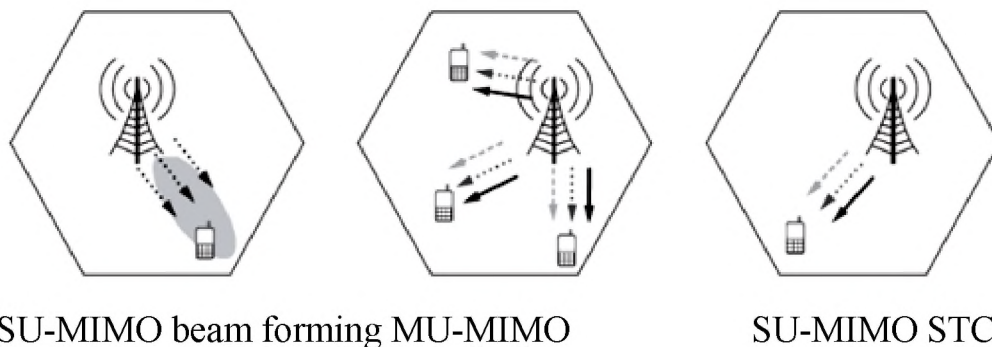


Рисунок 1.12 – Приклад SUи MUMIMO систем

Технологія MIMO знаходить застосування практично у всіх системах бездротової передачі (WiMax, WiFi, стільникові системи зв'язку). Причому можливості її до кінця не використані. Вже зараз розробляються нові варіанти конфігурації антен, аж до 64x64 MIMO. Це в майбутньому дозволить досягти ще більших швидкостей передачі даних, ємності мережі та спектральної ефективності.

1.4 Канальні моделі з технологією MIMO

Модель релеївського каналу

Релеєвський канал - канал із завмираннями, в якому прямий сигнал суттєво ослаблений, фаза коефіцієнта передачі рівномірна. розподілена в межах $[0...2\pi]$, а амплітуда підпорядковується релеївському розподілу. Функція щільності ймовірності Релея (1.3) та відповідний їй графік (рис. 1.13)

$$f(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right)$$

(1.3)

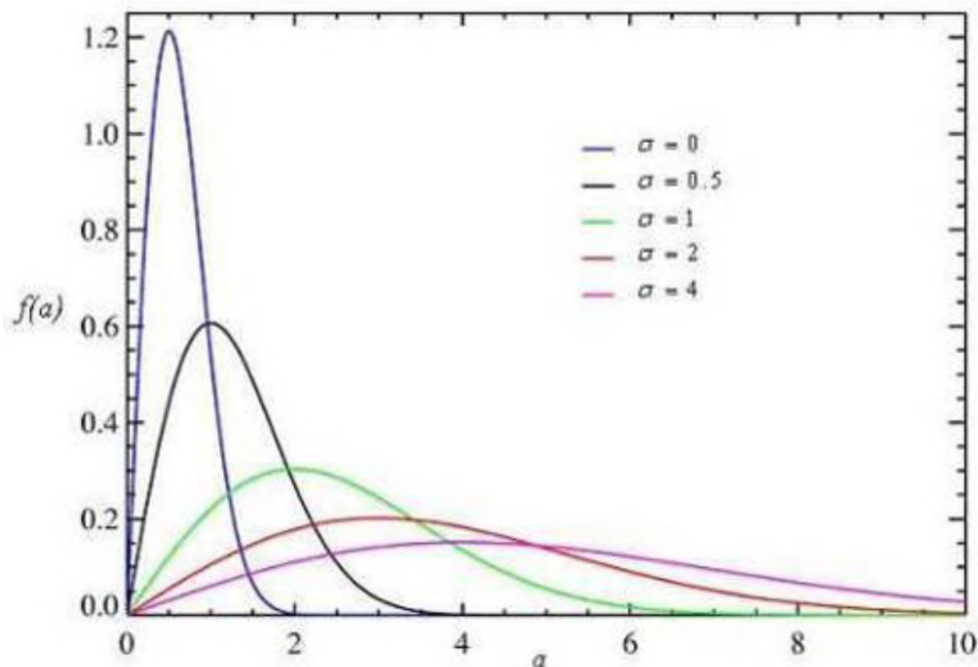


Рисунок 1.13 – Функція щільності ймовірності розподілу Релею.

Релеєвські завмирання, зумовлені інтерференцією досить великої кількості розсіяних сигналів і сильним ослабленням прямого сигналу, є найглибшими і призводять до значних помилок під час передачі інформації. Релеєвський канал, у якому завмирання сигналів є найглибшими, уражає міських умов. Для приміських та сільських умов найбільш характерним є райсівський канал, коли поряд із розсіяними сигналами є прямий сигнал [7].

Розглянемо випадок з однією передавальною та однією приймальною антеною

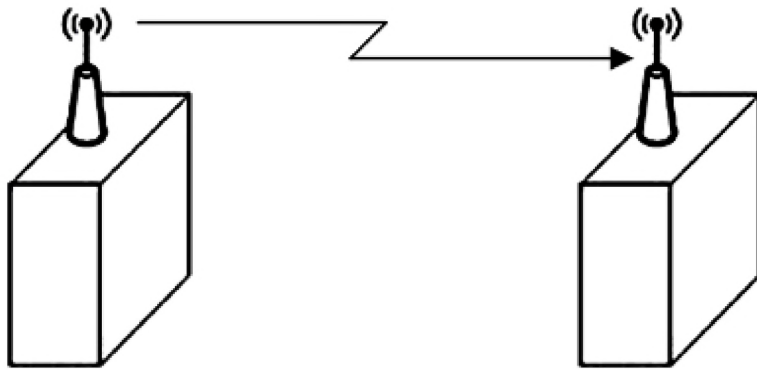


Рисунок 1.14 – Схема SISO.

Для представлення сигналу на вході каналу зв'язку приймемо традиційний опис [8]:

$$\begin{aligned} s_{\text{вх}}(t) &= a(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)) = \operatorname{Re} \left\{ a(t) \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 t + \varphi(t) \right] \right\} \right\} = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ a(t) \exp [j\varphi(t)] \exp [j2\pi f_0 t] \right\} = \operatorname{Re} \left\{ \dot{a}(t) \exp [j2\pi f_0 t] \right\}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $\dot{a}(t) = a(t) \exp [j\varphi(t)]$ - комплексна огибающая речовинного сигналу.

Сигнал на виході широкосмугового каналу має вигляд

$$\begin{aligned} s_{\text{вих}}(t) &= h \cdot a(t - \tau) \cos [2\pi f_0 t + \varphi(t - \tau) + \psi] = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ h \cdot a(t - \tau) \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 t + \varphi(t - \tau) + \psi \right] \right\} \right\} = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \dot{h} \cdot \dot{a}(t - \tau) \exp \{ 2\pi f_0 t \} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ \dot{b}(t) \exp \{ 2\pi f_0 t \} \right\}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де $\dot{b}(t) = \dot{h} \cdot \dot{a}(t - \tau)$ - комплексна огибающая сигналу на виході каналу, $\dot{h} = h \cdot \exp [j\psi]$ - комплексний коефіцієнт передачі радіоканалу, τ - час затримки сигналу при поширенні сигналу від передавальної антени до приймальної, $\tau = r_c / c$.

Таким чином, комплексну огибающую сигнала на виході каналу можна легко знайти, якщо відомий коефіцієнт передачі.

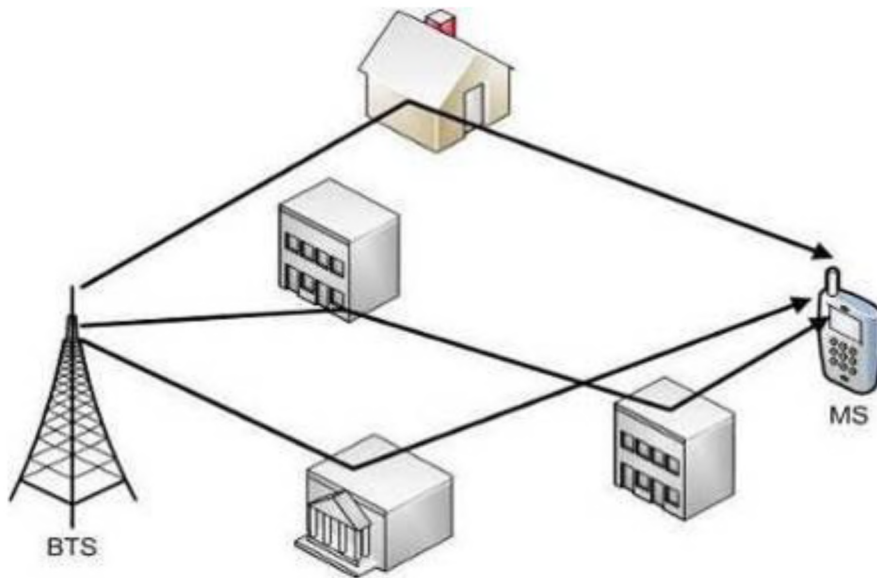


Рисунок 1.15 – Приклад багатопроменевого поширення сигналу в релієвському каналі

Так як при поширенні сигнал перевідбивається від перешкод (рис. 1.15), то сумарний сигнал на виході каналу буде складатися з декількох компонентів (2.3) і набуде вигляду:

$$s_{\text{вbx}}(t) = \text{Re} \left\{ \left[\sum_{i=1}^n h_i \cdot \exp[j\psi_i] \cdot a(t - \tau_i) \exp\{j\varphi(t - \tau_i)\} \right] \cdot \exp\{2\pi f_0 t\} \right\} = \text{Re} \{ \dot{b}(t) \exp\{2\pi f_0 t\} \}. \quad (2.4)$$

Здесь

$$\dot{b}(t) = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \exp[j\psi_i] \cdot a(t - \tau_i) \exp\{j\varphi(t - \tau_i)\} = \sum_{i=1}^n \dot{h}_i \cdot \dot{a}(t - \tau_i) \quad (2.5)$$

комплексна огибающая сигнала на виході каналу передачі.

Модель райсовского канала

Райсовський канал характеризується тим, що існує хоча б одна траєкторія поширення сигналу прямої видимості r_0 (рис. 1.16.).

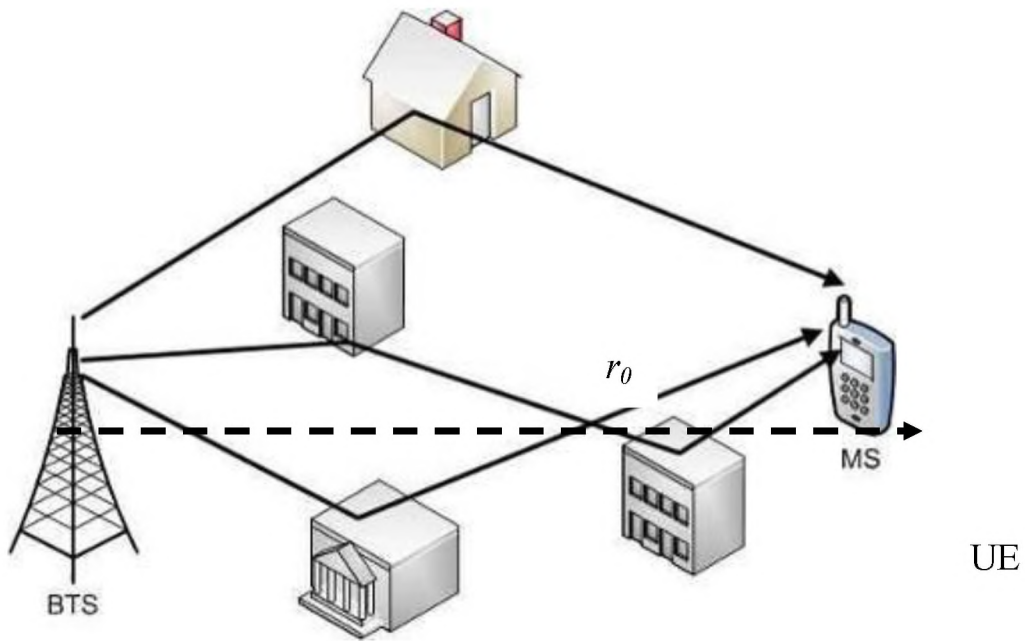


Рисунок 1.16 – Приклад багатопроменевого поширення сигналу у райсівському каналі

Тобто, поряд з розсіяними сигналами приймач надходить прямий сигнал з постійною амплітудою. Таким чином, сигнал на вході приймача складається з регулярної та випадкової компонент. Амплітуда сумарного сигналу є випадковою та підпорядковується райсівському розподілу. Функція щільності ймовірності розподілу Райсу (2.6) та відповідної їй графік (рис. 1.17)

$$f(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(a^2 + m^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{a \cdot m}{\sigma^2}\right) \quad (2.6)$$

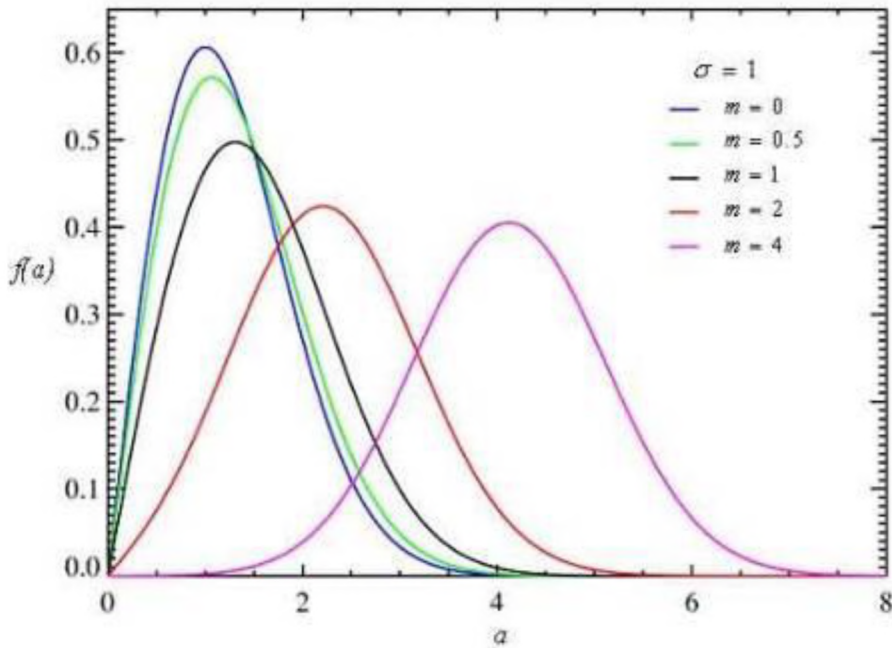


Рис. 1.17 – Функція щільності ймовірності розподілу Райсу

Така модель є більш загальною, ніж модель релеєвських завмирань.

Сигнал на вході системи, у разі, також описується формулою (2.2).

Формула для сигналу на виході каналу набуде вигляду:

$$s_{\text{вих}}(t) = h_0 s_{\text{вх}}(t - \tau_0) + \sum_{i=1}^n h_i s_i(t - \tau_i) \quad (2.7)$$

Тоді, з урахуванням (2.7) формула (2.4) набуде наступного вигляду:

$$s_{\text{вих}}(t) = \text{Re} \left\{ \left[h_0 \cdot \exp[j\psi_0] \cdot a(t - \tau_0) \exp\{j\varphi(t - \tau_0)\} + \sum_{i=1}^n h_i \cdot \exp[j\psi_i] \cdot a(t - \tau_i) \exp\{j\varphi(t - \tau_i)\} \right] \cdot \exp\{2\pi f_0 t\} \right\} = \text{Re} \{ \dot{b}(t) \exp\{2\pi f_0 t\} \}. \quad (2.8)$$

Тут

$$\begin{aligned} \dot{b}(t) &= h_0 \cdot \exp[j\psi_0] \cdot a(t - \tau_0) \exp\{j\varphi(t - \tau_0)\} + \sum_{i=1}^n h_i \cdot \exp[j\psi_i] \cdot a(t - \tau_i) \exp\{j\varphi(t - \tau_i)\} = \\ &= \dot{h}_0 \cdot \dot{a}(t - \tau_0) + \sum_{i=1}^n \dot{h}_i \cdot \dot{a}(t - \tau_i). \end{aligned}$$

комплексна огибаюча сигналу на виході каналу передачі. Потужність променя прямої видимості пропорційна.

Якщо коефіцієнт передачі h має райсівський розподіл, то його можна представити як суму коефіцієнтів передачі регулярної (статичної) $h^{(st)}$ і випадкової $h^{(Rl)}$ компонент [7]

$$h = h^{(st)} + h^{(Rl)} \quad (2.9)$$

Доданок $h^{(st)}$ описує статичну (не флюктууючу) складову, а $h^{(Rl)}$ визначає випадкову (релеєвську) складову. Фаза коефіцієнта рівноймовірна в межах $[0...2\pi]$, а реальна та уявна частини мають гауссівський розподіл з нульовим середнім.

Райсівські завмирання сигналів часто описують не середніми відносними потужностями регулярної $\rho_0^{(st)}$ та випадкової $\rho_0^{(Rl)}$ складових сигналу, а двома іншими параметрами. Це середнє ОСШ ρ та відношення γ середніх потужностей статичної та флюктууючої компонент сигналу. У загальному випадку формули переходу мають вигляд:

$$\begin{cases} \rho_0^{(st)} = \frac{\gamma}{\gamma+1} \rho_0; \\ \rho_0^{(Rl)} = \frac{1}{\gamma+1} \rho_0; \end{cases} \quad \begin{cases} \rho_0 = \rho_0^{(st)} + \rho_0^{(Rl)}; \\ \gamma = \frac{\rho_0^{(st)}}{\rho_0^{(Rl)}}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Модель гаусівського каналу

Гауссовский канал, чи канал з адитивним білим гауссовским шумом (АБГШ), це канал, у якому лише одне прямий промінь між передавачем і приймачем, тобто. багатопроменевість повністю відсутня. Міжсимвольна інтерференція в цьому каналі також відсутня, а основним джерелом спотворень, в даному випадку, є тепловий шум, що генерується в приймачі. Цей шум, як правило, має постійну спектральну щільність у всій смузі частот, що використовується, і гауссівську функцію щільності ймовірності з

нульовим середнім. Функція щільності ймовірності (2.11) та відповідний їй графік (рис. 1.18)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.11)$$

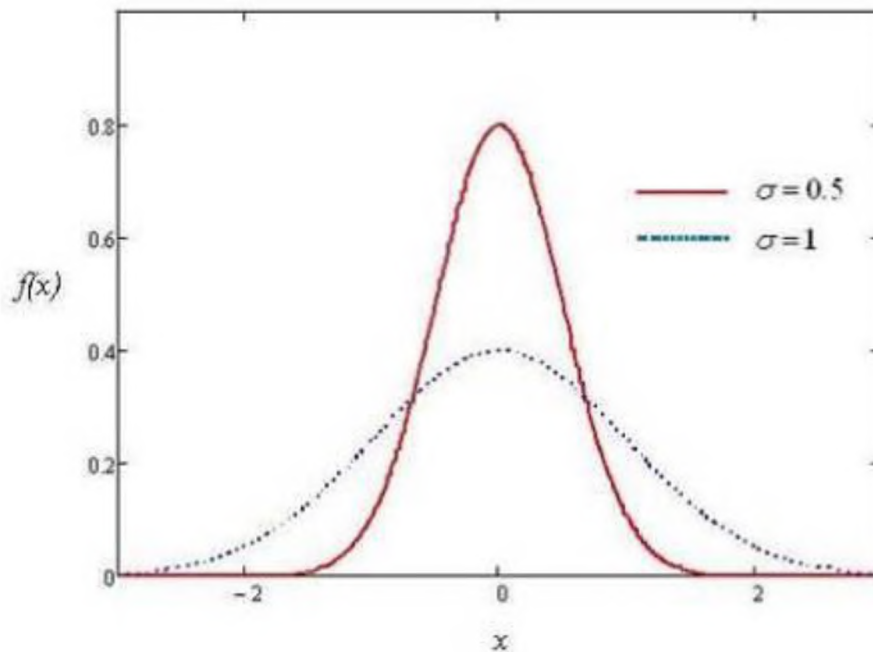


Рисунок 1.18 – Функція щільності ймовірності розподілу Гауса ($m=0$)

Мається на увазі, що потужність сигналу падає зі зростанням відстані так само, як при поширенні у вільному просторі. У моделі вільного простору область між антенами передавача та приймача передбачається вільною від об'єктів, які могли б поглинати чи відбивати енергію на радіочастотах. Атмосфера, усередині цієї області, поводить себе як однорідне непоглинаюче середовище. Приймається, що земля знаходиться нескінченно далеко від сигналу, що поширюється (нехтуємо коефіцієнтом відображення).

Сигнал на вході каналу зв'язку описується виразом (2.2). Сигнал на виході такого каналу, як було сказано вище, має лише промінь прямої видимості та описується простою формулою

$$s_{\text{вх}}(t) = h_0 \cdot s_{\text{ex}}(t) + z(t), \quad (2.12)$$

де $z(t)$ – адитивна гауссівська завада.

Модель каналу при рознесеному прийомі

Припустимо, що у приймальній стороні є N антен (рис. 1.19)

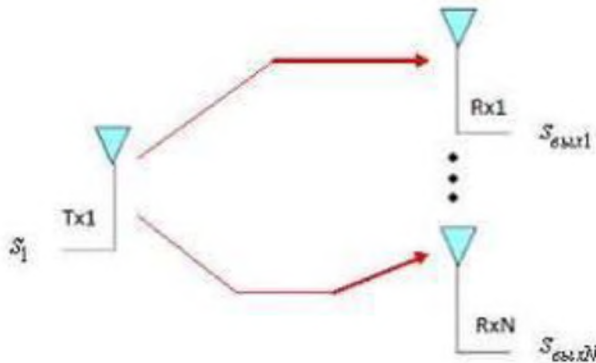


Рисунок 1.19 – Схема рознесеного прийому

Суть методу у тому, що з прийому сигналу використовується відразу кілька антен, розташованих з відривом друг від друга. 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 перевідбитих сигналів. Цю схему організації радіо інтерфейсу можна назвати Single Input Multiple Output (SIMO).

Іншими словами, є N гілок рознесення. Тепер властивості просторового каналу визначаються вектором–стовпцем $H = (h_1, h_2, \dots, h_N)^T$ коефіцієнтів передачі, де $(.)^T$ – знак транспонування. Если передається сигнал $s_{\text{ex}}(t)$, то вектор $S_{\text{вх}}$ прийнятих сигналів равен [7]:

$$\mathbf{S}_{\text{ввых}}(t) = \sqrt{P_0} \mathbf{H} \cdot s_{\text{вк}}(t) + \mathbf{Z}(t) \quad (2.13)$$

Де $\mathbf{Z}(t)$ – вектор власних шумів, P_0 – середня випромінювана потужність. Шуми в різних антенах будемо вважати не корельованими між собою, тобто кореляційна матриця шуму $\langle \mathbf{Z}\mathbf{Z}^H \rangle = \sigma_0^2 \mathbf{I}$, де \mathbf{I} - одинична матриця, $(\cdot)^H$ - означає ермітове сполучення.

Ефективність рознесеної передачі залежить від того, є або відсутня на передавальній стороні інформація про сам канал передачі (про вектор \mathbf{H} вагових коефіцієнтів). За наявності цієї інформації можлива реалізація адаптивної передачі узгодженої з каналом. Тобто потужність сигналу підвищуватиметься у тому напрямку, де вплив перевідбитків та загасань найбільший.

Припустимо, що на передавальній стороні є N антен (рис. 1.20), тобто в системі є N гілок рознесення. Тоді властивості просторового каналу визначаються вектором-стовпцем $\mathbf{H} = (h_1, h_2, \dots, h_N)^T$ коефіцієнтів передачі.

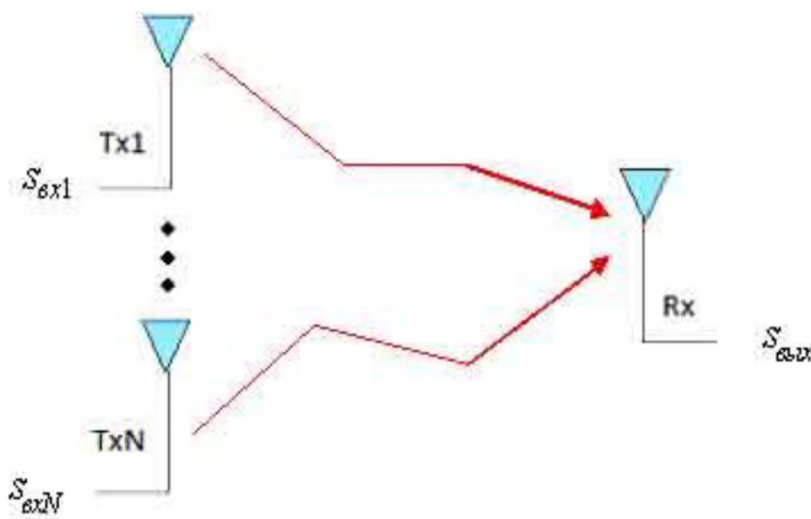


Рисунок 1.20 – Схема з рознесеною передачею

Якщо стан каналу передавачу невідомий, то потужність повинна ділитися рівномірно між усіма антенами, і прийнятий сигнал у такому разі дорівнюватиме.

$$s_{\text{вх}}(t) = \sqrt{\frac{P_0}{N}} \left(\sum_{p=1}^M h_p \right) s_{\text{ex}}(t) + z(t). \quad (2.14)$$

Модель каналу в системах передачі із технологією MIMO

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

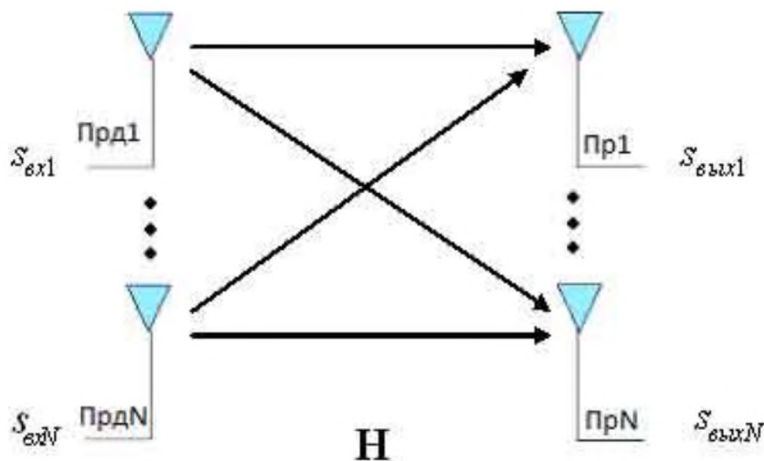


Рисунок 1.21 – Обобщенная блок - схема системы связи с MIMO

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 [9]

$$s_{\text{ex}}(k) = [s_1(k), \dots, s_{N_t}(k)]^T \quad (2.15)$$

длиной N_t .

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 антенною i та кожною приймальною антенною j є комплексна імпульсна характеристика $h_{ij}(k)$ довжиною $L+1$, описана вектором

$$h_{ij} = [h_{ij}(0), \dots, h_{ij}(L)]^T. \quad (2.16)$$

Тепер канал для MIMO-системи може бути представлений $L+1$ комплексними каналними матрицями

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

Символ, прийнятий антенною i в момент часу k , позначимо як $s_{\text{ввл}x_i}(k)$.

Символи, прийняті N_r антенами, розташовані у векторі.

$$s_{\text{ввл}x}(k) = [s_{\text{ввл}x_1}(k), \dots, s_{\text{ввл}x_{N_r}}(k)]. \quad (2.18)$$

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

$$s_{\text{ввл}x}(k) = \sum_{p=0}^L H(p)s_{\text{ввл}x}(k-p) + Z(k), \quad (2.19)$$

де $Z(k)$ – вектор відліків адитивного гаусівського 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 рішення. Якщо кількість рівнянь більша за кількість невідомих, то рішення може бути знайдено одним з методів, наприклад, методом найменших квадратів.

1.5 Постановка задачі

Метою цієї роботи є дослідження завадостійкості систем зв'язку з OFDM.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1 Виконати аналітичний огляд існуючих технологій MIMO-зв'язку.

2 Розробити функціональну та імітаційну модель MIMO-каналу.

3 Провести модельний експеримент з метою дослідження поведінки основних характеристик завадостійкості MIMO-систем зв'язку в умовах шумів та багатопробеневого поширення.

4 Здійснити аналіз отриманих результатів.

1.6 Висновки

1 Виконано аналітичний огляд існуючих технологій MIMO-систем зв'язку, який показав актуальність цієї роботи та дозволив сформулювати постановку завдання.

2 Розглянуто технологію багатоантенної передачі, що намітила шляхи побудови імітаційної моделі MIMO-системи.

3 Здійснено аналіз шумових процесів, які у основних типах каналів зв'язку.

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Імітаційна модель каналу LTE

Комп'ютерна модель фізичного рівня спільного низхідного каналу LTE представлена на рис. 2.1.

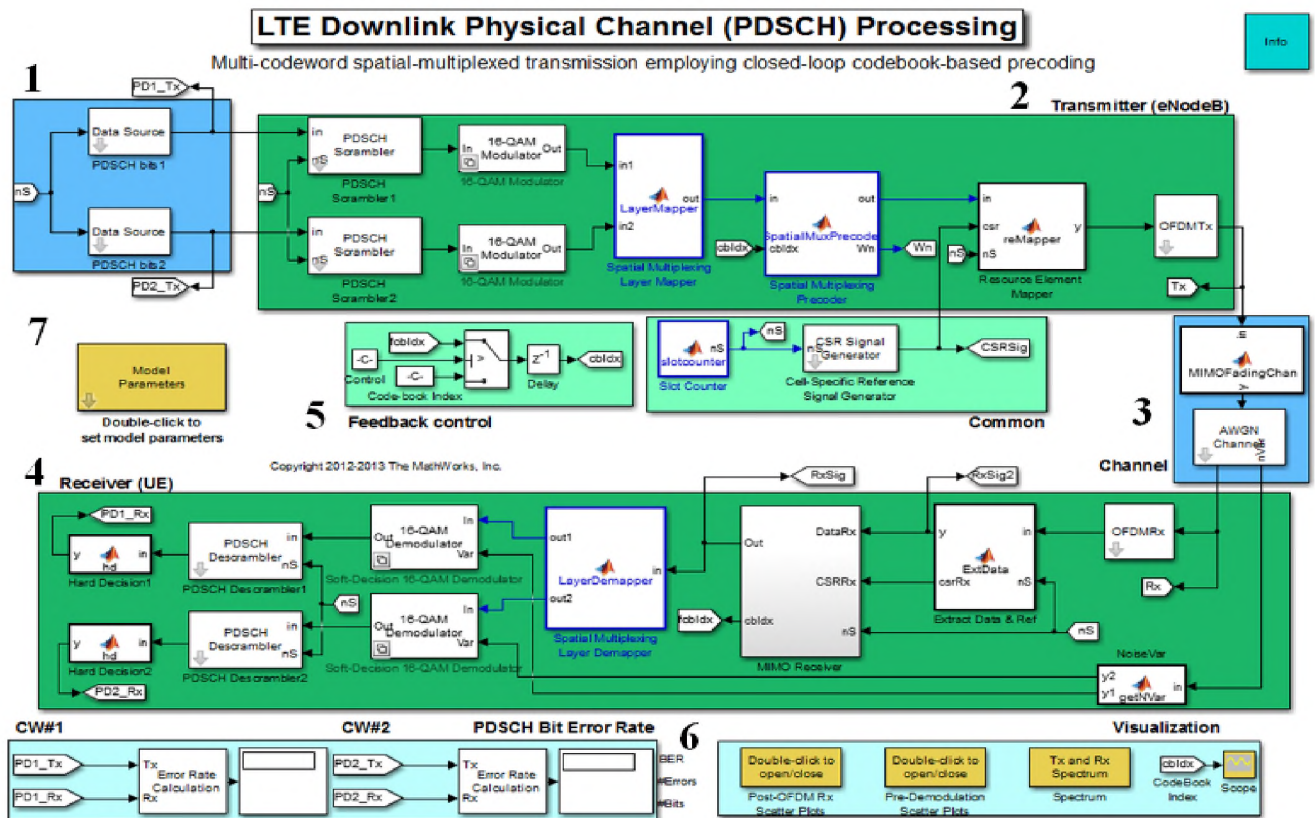


Рисунок 2.1 – Модель фізичного рівня спільного низхідного каналу LTE з технологією MIMO

На цьому рисунку основні блоки моделі позначені цифрами. Наведемо короткі відомості про блоки, що використовуються у цій роботі.

1) *Джерело даних.* Генерує за кожний підкадр випадкову бітову послідовність заданої довжини. Дані розбиваються на кілька потоків відповідно до числа антен. На рис. 2.2 наведено приклад 2x2 конфігурації.

2) *Передавач.* Здійснює обробку фізично. У даному блоці для кожного потоку виконується скремблювання і 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 замирань і блок, що додає адитивний гаусовський білий шум.

4) *Приймач*. Здійснює обробку на фізичном рівні.

5) *Блок зворотнього 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;
- Число OFDM-символів у підкадрі;
- Конфігурація антен (2x2, 4x4);
- вид модуляції (QPSK, 16QAM, 64QAM);
- Швидкість коду;
- модель каналу із завмираннями;
- ОСЦ;
- Максимальна кількість ітерацій при декодуванні.

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

Усі часові значення виражаються в одиницях елементарного інтервалу [11]

$$T_s = 1/(15000 \cdot 2048) \text{ с.} \quad (2.1)$$

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

$$T_f = 307200 \cdot T_s = 10 \text{ мс,} \quad (2.2)$$

які, своєю чергою, поділяються на більш дрібні тимчасові структури - слоти.

Структура кадру (рис. 2.2) передбачає розподіл кадру на 20 слотів, з нумерацією від 0 до 19, кожен із яких має тривалість

$$T_{slot} = 15360 \cdot T_s = 0.5 \text{ мс.} \quad (2.3)$$

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

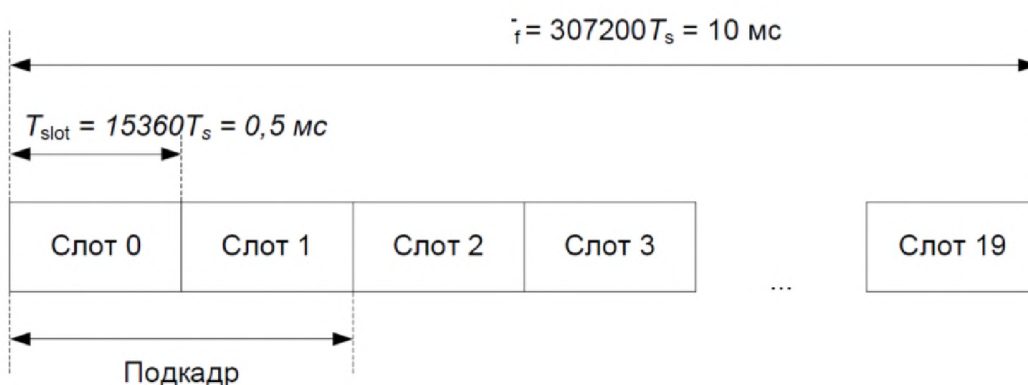


Рисунок 2.2 – Структура кадру

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 спільно використовуваний канал (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 цьому 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 спільно використовуваний канал (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:

- 1) скремблювання;
- 2) 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 (Розділ 7.1 і 6.3.2 зі стандарту LTE [12]); схема модуляції вибирається параметром типу модуляції PDSCH на блоці Model Parameters;
- 3) розподіл за рівнями: комплексно-модульовані символи, з обох кодових слів, розподіляються за просторовими рівнями (входи антен) відповідно до розділу 6.3.3.2 стандарту LTE [12]; оскільки передбачається повношвидкісна передача, то кількість рівнів дорівнює кількості передаючих антен;
- 4) попереднє кодування, засноване на книзі шифрів: символи, що модулюються, попередньо кодуються, використовуючи книги шифрів,

визначені в Розділі 6.3.4.2 зі стандарту LTE [12]; 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 (рівнів) 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);

5) 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 полосы частот канала, МГц	1.4	3	5	10	15	20
Число 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;

6) опорні сигнали стільнику: основні з опорних сигналів LTE – опорні сигнали стільнику (Cell Specific Reference, CSR); вони визначаються для однієї, двох або чотирьох антен в стільнику і використовуються для оцінки каналу в приймачі;

7) OFDM передачі.

Допущення та спрощення

- передача по низхідній лінії відбувається для одного користувача;
- немає підтримки HARQ;используется обычный циклический префикс, который определяет семь символов 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.

2.2 Модель MIMO каналу

Детально в роботі розглядається частина моделі, що складається з MIMO-каналу із завмираннями та каналу з АБГШ (рис. 2.3). При дослідженні ефективності ми будемо змінювати перераховані вище параметри, щоб досліджувати ефективність системи MIMO в таких умовах.

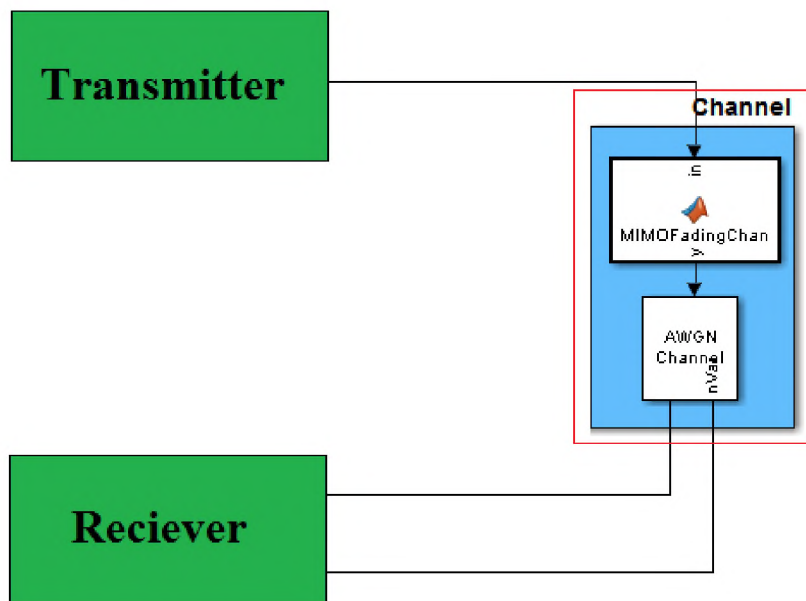


Рисунок 2.3 – Структурна схема моделі каналу із технологією MIMO

Блок MIMO Fading Channel реалізує профіль MIMO каналу із завмираннями. Профілі з більш високою мобільністю виключені, оскільки режим просторового мультиплексування зі зворотним зв'язком застосовується лише до сценаріїв з низькою мобільністю, за рахунок чого організується висока швидкість передачі даних. У цьому блоці використовується системний об'єкт comm. LTE MIMO Channel і системний об'єкт comm. MIMO Channel з низькою кореляцією параметрів між безліччю каналів. Системний об'єкт comm. LTE MIMO Channel пропускає вхідний сигнал через багатопроменевий LTE MIMO канал. Спеціалізація цих системних об'єктів передбачає попередньо встановлені конфігурації для

використання при моделюванні каналного рівня LTE. Дані системні об'єкти моделюють релеєвські завмирання кожного каналу.

Таблица 2.2 – Свойства comm. LTE MIMO Channel

Sample Rate	Частота дискретизації вхідного сигналу (Герц) Значення за замовчуванням становить 30.72 МГц, як це визначено в специфікації LTE.
Profile	Профіль розповсюдження каналу Визначається умови поширення багатопроменевого каналу із завмираннями з можливих варіантів: Розширена модель для пішоходів (EPA – Extended Pedestrian A Model) з доплерівським зрушенням 0 Гц та 5 Гц; Розширена модель для транспортних засобів (EVA - Extended Vehicular A Model) з доплерівським зсувом 5 Гц та 70 Гц. Спектр релеєвських замирань каналу є спектром Джейкса, який завжди вибирається у специфікації LTE.
Antenna Configuration	Конфігурація антени Визначається конфігурація антени LTE MIMO каналу як із 1x2 2x2 4x2 4x4. Ці конфігурації підтримуються Release 10 специфікації LTE. Значення за промовчанням 2x2.
Correlation Level	Рівень просторової кореляції Визначається рівень просторової кореляції LTE MIMO каналу як один з низьких Середня Високий. Значення за промовчанням цієї властивості Низький. При виборі такого рівня канал MIMO є просторово некорельованим.

Далее приводятся каналные пространственные корреляционные матрицы для данной модели:

1) Корреляционная матрица передатчика eNodeB

Одна антенна	Дві антени	Чотири антени
$R_{eNB} = 1$	$R_{eNB} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ \alpha^* & 1 \end{pmatrix}$	$R_{eNB} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha^{1/9} & \alpha^{4/9} & \alpha \\ \alpha^{1/9*} & 1 & \alpha^{1/9} & \alpha^{4/9} \\ \alpha^{4/9*} & \alpha^{1/9*} & 1 & \alpha^{1/9} \\ \alpha^* & \alpha^{4/9*} & \alpha^{1/9*} & 1 \end{pmatrix}$

2) Кореляційна матриця приймача UE

Одна антена	Дві антени	Чотири антени
$R_{UE} = 1$	$R_{UE} = \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ \beta^* & 1 \end{pmatrix}$	$R_{UE} = \begin{pmatrix} 1 & \beta^{1/9} & \beta^{4/9} & \beta \\ \beta^{1/9*} & 1 & \beta^{1/9} & \beta^{4/9} \\ \beta^{4/9*} & \beta^{1/9*} & 1 & \beta^{1/9} \\ \beta^* & \beta^{4/9*} & \beta^{1/9*} & 1 \end{pmatrix}$

2) Просторова кореляційна матриця між антенами передавача та приймача:

MIMO 2x2

$$R_{spat} = R_{eNB} \otimes R_{UE} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha \\ \alpha^* & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & \beta \\ \beta^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \beta & \alpha & \alpha\beta \\ \beta^* & 1 & \alpha\beta^* & \alpha \\ \alpha^* & \alpha^*\beta & 1 & \beta \\ \alpha^*\beta^* & \alpha^* & \beta^* & 1 \end{bmatrix}$$

MIMO 4x4

$$R_{spat} = R_{eNB} \otimes R_{UE} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^{1/9} & \alpha^{4/9} & \alpha \\ \alpha^{1/9*} & 1 & \alpha^{1/9} & \alpha^{4/9} \\ \alpha^{4/9*} & \alpha^{1/9*} & 1 & \alpha^{1/9} \\ \alpha^* & \alpha^{4/9*} & \alpha^{1/9*} & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & \beta^{1/9} & \beta^{4/9} & \beta \\ \beta^{1/9*} & 1 & \beta^{1/9} & \beta^{4/9} \\ \beta^{4/9*} & \beta^{1/9*} & 1 & \beta^{1/9} \\ \beta^* & \beta^{4/9*} & \beta^{1/9*} & 1 \end{bmatrix}$$

Для того, щоб змоделювати гаусівський канал, достатньо видалити блок MIMO Fading Channel (рис. 2.4).

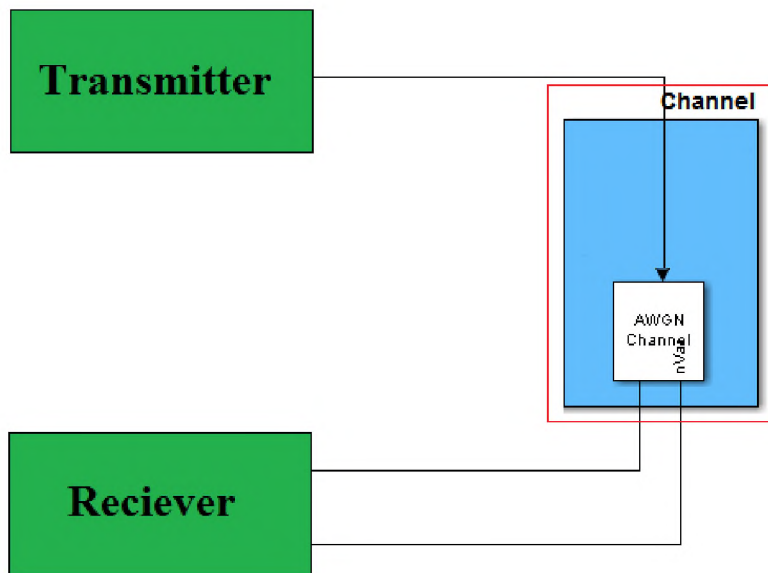


Рисунок 2.4 – Структурна схема моделі гаусівського каналу

Таким чином, забезпечується відсутність ефекту багатопроменевості та міжсимвольної інтерференції, а також наявність прямої видимості між передаючими та приймальними антенами., тобто. досягається ідеалізація каналу передачі.

2.3 Дослідження ефективності технології MIMO в різних каналах

2.3.1 Дослідження завадостійкості

У цьому розділі наводяться результати моделювання, описаних вище моделей каналів MIMO. Мета моделювання полягає в тому, щоб досліджувати ефективність застосування технології MIMO при різних моделях каналу із завмираннями, використовуючи при цьому різні конфігурації антен та методи оцінки каналу.

Під час проведення досліджень прийнято такі чисельні значення основних параметрів:

ширина каналу – 20 МГц;

вид модуляції – QPSK;

рівень просторової кореляції – низький.

Передбачається, що випромінювана потужність завжди однакова, а швидкість передачі змінюється залежно від конфігурації антен. Результатом моделювання є криві завадостійкості, що показують залежність ймовірності бітової помилки від ЗСШ. Тут досліджувалося два найважливіші канали: гаусівський і релєєвський. При цьому використовувалися дві конфігурації антен: 2x2 та 4x4.

Для порівняння збудуємо отримані залежності на одному графіку (рис. 2.5).

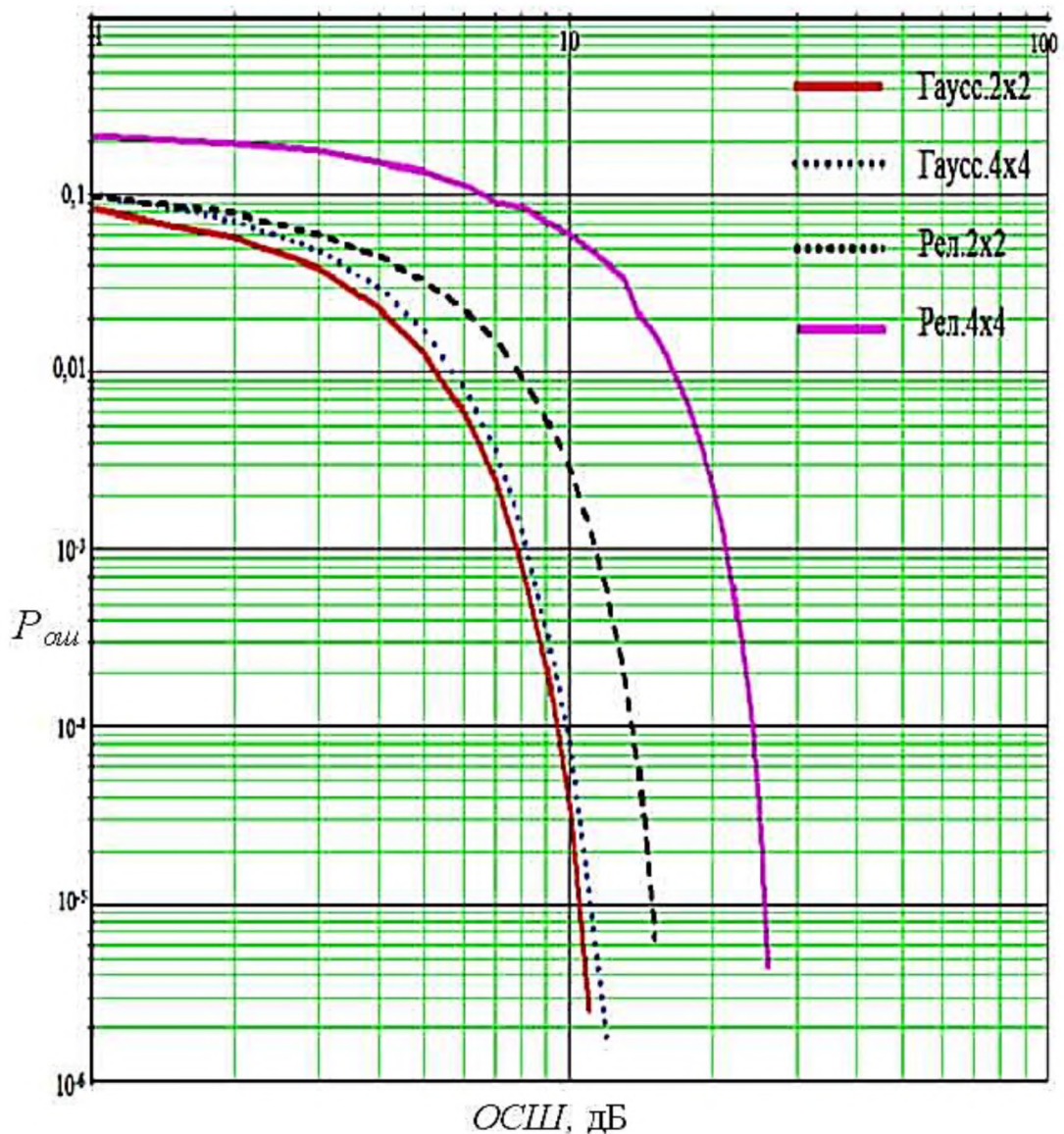


Рисунок 2.5 – Криві завадостійкості для гаусівського та релєєвського каналів

За отриманими результатами можна сказати, що зі збільшенням числа антен відбувається значний виграш у швидкості (майже двічі). Недоліком є зниження завадостійкості зі збільшенням числа антен. Ця обставина компенсується завадостійким турбо - кодуванням, що передую скремблювання.

Як видно з рисунка 2.5 властивості каналу істотно впливають на якість передачі. Найкращими показниками має канал з АБГШ та конфігурацією МІМО 2x2.

2.3.2 Спектри сигналів та діаграми розсіювання

Ця модель також дозволяє отримати:

- зображення спектрів сигналів, що передається і приймається;
- діаграми розсіювання сигналів, прийнятих кожною антеною після обробки в OFDM приймачі;
- діаграми розсіювання сигналів, прийнятих кожною антеною після обробки в МІМО приймачі;

При експериментальному дослідженні для різних каналів встановлювалося ОСШ рівне 18 дБ (встановлене в моделі за умовчанням) і використовувалася конфігурація МІМО 2x2. Інші параметри мали зазначені вище значення. На рис. 2.6 та рис. 2.7 жовтим кольором показаний спектр переданого сигналу, а синім прийнятого. Покази знімалися на вході та виході каналу зв'язку. По зображенням спектрів можна дійти невтішного висновку у тому, яке впливає канал із завмираннями до рівня переданого сигналу.

Як очевидно з цих малюнків рівень спектральних компонент прийнятого сигналу в релеєвском каналі значно змінюється у основній смузі за умов багатопроменевого поширення.

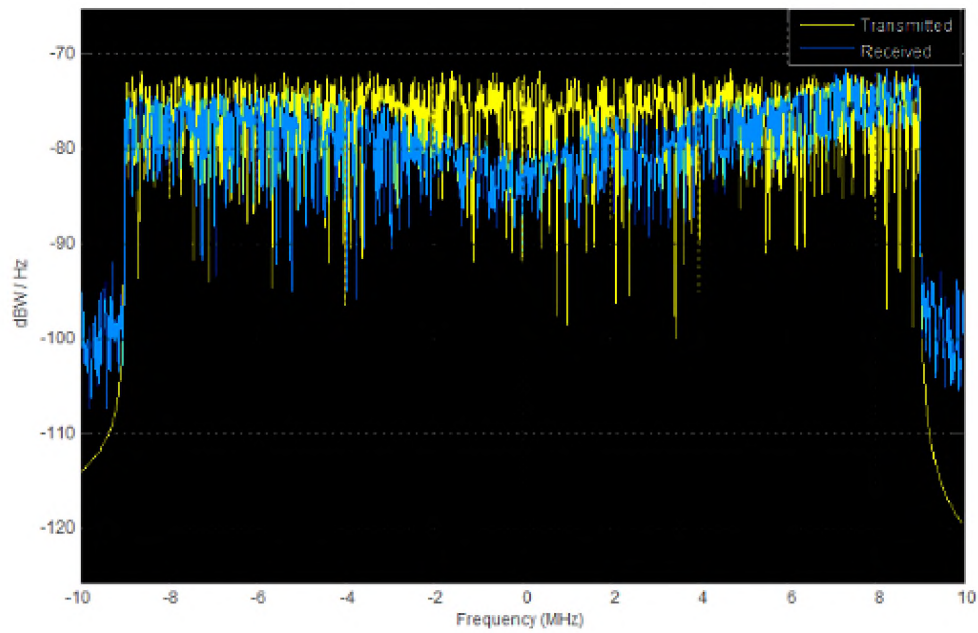


Рисунок 2.6 – Спектри сигналів у системі з МІМО 2x2 (релеєвський канал)

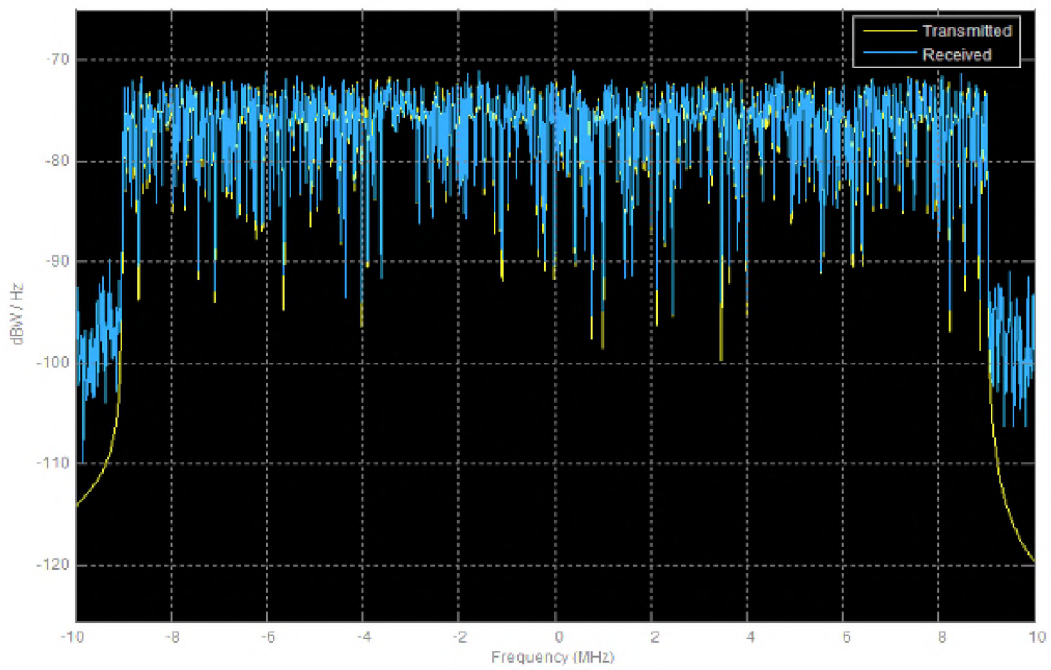


Рисунок 2.7 – Спектри сигналів у системі з МІМО 2x2 (гаусівський канал)

По цьому рисунку можна сказати, що в гауссівському каналі рівні сигналів, що передається і приймається, практично рівні, на відміну від релеївського каналу, а послаблення сигналу практично відсутнє. Далі наводяться діаграми розсіювання сигналів прийнятих кожною антеною на виході МІМО приймача.

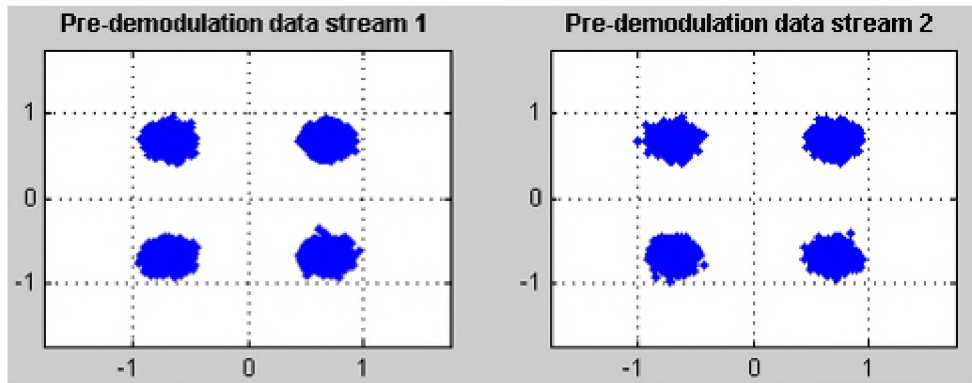


Рисунок 2.8 – Гаусівський канал

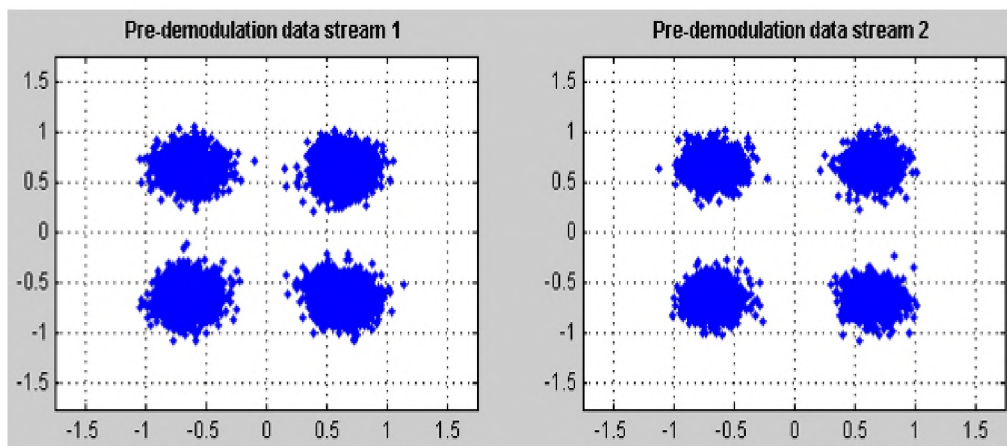


Рисунок 2.9 – Релеєвський канал після вирівнювання

Сигнали, що прийшли після обробки в OFDM приймачі, піддаються додатковій обробці в MIMO приймачі. Це дозволяє отримати значно чіткіші зображення сигнальних точок. На рисунку 2.8 можна сказати, що наявність релеєвських замирань, зумовлених інтерференцією сигналів, що прийшли в точку прийому різними шляхами, і відсутність прямої видимості призводить до істотних змін амплітуди та фази сигналу, що приймається.

У цій моделі використовується просторове мультиплексування (spatial multiplexing). Тобто з кожної антени передаються незалежні подпотоки даних (рис. 2.9). Число підтоків дорівнює числу антен. Необхідне збільшення ОСШ

при використанні більшої кількості антен пов'язане з різницею енергетики у цих підпотоках. Отже, збільшення потужності передавача відбувається у тих напрямках, у яких коефіцієнт передачі більше [7]. У зв'язку з чим у напрямках з низьким коефіцієнтом передачі ймовірність бітової помилки істотно зростає. Звідси випливає, що для забезпечення прийнятної середньої ймовірності помилки біта необхідно збільшувати ОСШ.

2.4 Висновки

1 Розроблено імітаційну модель LTE-системи зв'язку

2 Розроблено імітаційну модель MIMO-каналу зв'язку для різних каналів.

3 Встановлено, що зі збільшенням числа антен відбувається значний виграш у швидкості (майже двічі). Недоліком є зниження завадостійкості зі збільшенням числа антен. Ця обставина компенсується завадостійким турбокодуванням, що передуює скремблювання.

4 Встановлено, що властивості каналу істотно впливають на якість передачі. Найкращими показниками має канал з АБГШ та конфігурацією MIMO 2x2.

5 Встановлено, що наявність релеївських замирань, зумовлених інтерференцією сигналів, що прийшли в точку прийому різними шляхами, і відсутність прямої видимості призводить до істотних змін амплітуди та фази сигналу, що приймається.

6 Встановлено, що у напрямках з низьким коефіцієнтом передачі ймовірність бітової помилки значно зростає. Звідси випливає, що для забезпечення прийнятної середньої ймовірності помилки біта необхідно збільшувати ОСШ.

3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

В цьому проекті розроблена імітаційна модель МІМО каналу зв'язку. У економічному розділі розраховуються одноразові капітальні витрати на розробку моделі.

3.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку імітаційної моделі МІМО каналу зв'язку

3.1.1 Визначення трудомісткості розробки моделі

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

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

де tmz – тривалість складання технічного завдання на впровадження методу;

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

ta – тривалість розробки моделі;

tnp – тривалість модулювання віртуального аналога каналу зв'язку;

$tonp$ – тривалість опрацювання здобутих характеристик;

$t\partial$ – тривалість підготовки технічної документації.

Вихідні дані для визначення трудомісткості створення моделі приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Тривалість розробки моделі

$t_{mз}$, год	$t_{в}$, год	$t_{а}$, год	t_{np} , год	t_{onp} , год	t_{∂} , год
40	45	60	25	20	30

Розрахуємо трудомісткість розробки моделі за формулою (3.1):

$$t = 40+45+60+25+20+30=200 \text{ [год]}.$$

3.1.2 Розрахунок витрат на розробку моделі

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

$$K_{пз} = З_{зп} + З_{мч}[\text{Грн}] \quad (3.2)$$

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

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

де t – трудомісткість створення моделі;

Зпр дорівнює 60 грн/год.

Розрахуємо заробітну платню проектувальника за формулою (3.3):

$$Z_{zn} = 200 \cdot 60 = 12000 \text{ [грн]}.$$

Вартість машинного часу на ПК визначається за формулою:

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

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

Вартість 1 години машинного часу ПК визначається за формулою:

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

де P_e – встановлена потужність ПК;

t – трудомісткість створення моделі;

C_e – енерговитрати;

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

H_a – річна норма амортизації на ПК;

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

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

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

Енерговитрати розраховуються за формулою:

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

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

Розрахунок витрат на розробку моделі зводимо в таблицю 3.2

Таблиця 3.2 – Розрахунок витрат на розробку моделі

P_e , кВт	$C_{кВт}$ кВт·год	$\Phi_{перв}$, грн	$На$, частка одиниці	$К_{лнз}$, грн	$На_{лз}$, частка одиниці	F_p , год
1,3	1,60	19500,00	0,4	6500,00	0,4	1920,00

Тоді за формулою (3.6) отримаємо розмір енерговитрат:

$$C_e = 1,3 \cdot 1,60 = 2,08 \text{ [грн/год]}.$$

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

$$На = 2/T \cdot 100\% \quad (3.7)$$

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

Розрахуємо річну норму амортизації за формулою (3.7):

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

Строк корисного використання ліцензійного програмування дорівнює 5 років.

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

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

Ліцензійне програмне забезпечення, яке використовується в даному випадку Microsoft Windows 7 Professional. Його вартість 6500,00 грн.

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

$$C_{мч} = 1,3 \cdot 200 \cdot 1,60 + \frac{19500 \cdot 0,40}{1920} + \frac{6500 \cdot 0,40}{1920} = 421,41 \text{ [грн/год]}$$

Розрахуємо вартість машинного часу за формулою (3.4):

$$Z_{мч} = (60+25+20+30) \cdot 421,41 = 56835,00 \text{ [грн]}.$$

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

$$K_{пз} = 12000 + 56835,00 = 68835,00 \text{ [грн]}.$$

3.1.3 Розрахунок капітальних витрат

Загальні капітальні витрати на розробку визначаються за формулою:

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

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

K_n - Витрати на встановлення обладнання та налагодження системи.

Дані о витратах на розробку моделі зводимо в таблицю 3.3

Таблиця 3.3 – Витрати на розробку моделі

$K_{пз}$, грн	$K_{навч}$, грн	K_n , грн
68835,00	5800,00	1250,00

Отже, капітальні витрати становлять:

$$KЗ = 68835,00 + 5800,00 + 1250,00 = 75885,00 \text{ [грн]}.$$

3.2 Висновки

В економічному розділі було розраховано:

- 1 Трудомісткість розробки імітаційної моделі МІМО каналу зв'язку – 200 год;
- 2 Заробітна платня проектувальника – 12000 ,00 грн;
- 3 Витрати на розробку моделі – 68835,00 грн;
- 4 Капітальні витрати на розробку моделі – 75885,00 грн.

ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі отримані наступні результати:

- 1 Розроблена імітаційна модель LTE-системи зв'язи
- 2 Розроблена імітаційна модель MIMO-канала зв'язи для різних каналів.
- 2 Установлено, що при збільшенні числа антен відбувається значительний *выигрыш в скорости* (почти в два раза). Недостатком является *снижение помехоустойчивости* при збільшенні числа антен. Это обстоятельство компенсируется помехоустойчивым турбо-кодированием, предшествующим скремблированию.
- 4 Установлено, что свойства канала оказывают существенное влияние на качество передачи. Лучшими показателями обладает канал с АБГШ и конфигурацией MIMO2x2.
- 5 Установлено, что наличие рэлеевских замираний, обусловленных интерференцией сигналов, пришедших в точку приема различными путями, и отсутствие прямой видимости приводит к существенным изменениям амплитуды и фазы принимаемого сигнала.
- 6 Установлено, что в направлениях с низким коэффициентом передачи вероятность битовой ошибки существенно возрастает. Отсюда следует, что для обеспечения приемлемой средней вероятности битовой ошибки необходимо увеличивать ОСШ.

7 На основании расчетов, выполненных в экономической части, получена величина капитальных затрат на разработку имитационной модели, которая составляет 75885,00 грн.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Крейнделин, В.Б. Технологии беспроводных сетей передачи данных: методические указания по дисциплине/ В.Б. Крейнделин, Л.А. Варукина, Е.Н. Воронков. - М.: МТУСИ, 2011. - 45 с.
2. Вишневский, В.М. Энциклопедия WiMax. Путь к 4G/ В.М. Вишневский, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. - М.: Техносфера, 2009. - 472 с.
3. Per Beming. LTE-SAE architecture and performance/ Per Beming, Lars Frid // Ericsson Review. - 2007. № 3. - P.98 - 104.
4. Тихвинский, В.О. Сети мобильной связи LTE: технология и архитектура/ В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. - М.: Эко - Трендз, 2010. - 284с.
5. EzioBiglieri. MIMO Wireless Communication/ EzioBiglieri, Robert Calderbank, Anthony Constantinides. - Cambridge University Press, 2007. - 343 p.
6. Ворошилин, Е.П. Моделирование процессов и явлений в системах связи: методическое пособие. - Томск: ТУСУР, 2012. - 86 с.
7. Ермолаев, В.Т. Адаптивная пространственная обработка сигналов в системах беспроводной связи/ В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман. - Нижний Новгород, 2006. - 99 с.
8. Волков, Л.Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учебное пособие/ Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков. - М.: Эко - Трендз, 2005. - 392 с.
9. Метод оценки канальной импульсной характеристики для MIMO систем с применением фильтра Калмана: материалы IV региональной научно-практической конференции "Проблемы передачи информации в

телекоммуникационных системах"/ А.О. Пасюк, Е.С. Семенов. - Волгоград, 2011. - С.8 - 10.

10. Кетков, Ю.Л. MATLAB 7: программирование, численные методы/ Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков, М.М. Шульц. - СПб.: БХВ - Петербург, 2005. - 752 с.

11. Гельгор, А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учебное пособие/ А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - 204 с.

12. 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and Modulation (Release 10)", 3GPP TS 36.211 v10.0.0 (2010-12).

13. ITU-R M.1225 International Telecommunication Union, 'Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000', 1997.

14. Крейнделин, В.Б. Оценивание параметров канала в системах связи с ортогональным частотным мультиплексированием: учебное пособие / В.Б. Крейнделин, А.В. Колесников А.В. - М.: МТУСИ, 2010. - 29 с.

15. 3GPP TS 36.141. "Base Station (BS) conformance testing." 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA).

16. 3GPP, TR 36.211 V8.7.0, "Physical Channels and Modulation," Release 8, May 2009.

17. Скрынников, В.Г. РадиоподсистемыUMTS/LTE. Теория и практика - М.: Спорт и Культура - 2000, 2012. - 864с.

№	Формат	Найменування	Кількість листів	Примітки
<i>Документація</i>				

ДОДАТОК А. Відомість матеріалів дипломної роботи

1	A4	Реферат		
2	A4	Список умовних скорочень		
3	A4	Зміст		
4	A4	Вступ		
5	A4	Стан питання. Постановка задачі		
6	A4	Спеціальна частина		
7	A4	Економічний розділ		
8	A4	Висновки		
9	A4	Перелік посилань		
10	A4	Додаток А		
11	A4	Додаток Б		
12	A4	Додаток В		
12		Матеріали дипломної роботи на оптичному носії		Оптичний диск

ДОДАТОК Б. Відгук керівника економічного розділу

Керівник розділу

к.е.н., доцент

(підпис)

Романюк Н.М.

(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК В Відгук керівника дипломної роботи
ВІДГУК
на магістерську дипломну роботу

Студента(ки)

_____ гр.

_____ (прізвище, ім'я)

на тему: _____

Актуальність теми _____

Повнота розкриття теми _____

Теоретичний рівень _____

Практична значущість _____

Самостійність виконання роботи _____

Якість оформлення, загальна та спеціальна грамотність _____

Переваги та недоліки роботи _____

Загальна оцінка роботи та висновок щодо рекомендації до захисту в ДЕК _____

Науковий керівник

к.ф.-м.н., професор

(посада)

(підпис)

Гусєв О.Ю.

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.