ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи збільшення швидкості передачі даних в сучасних мобільних мережах в надзвичайних умовах»

на здобуття освітнього ступеня магістра

зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Артем РЕШОДЬКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-63
Артем РЕШОДЬКО

Керівник: Любов БЕРКМАН

Рецензент: _____

Київ – 2024

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра	Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма	Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Решодьку Артему Петровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Методи збільшення швидкості передачі даних в сучасних мобільних мережах в надзвичайних умовах»,
керівник кваліфікаційної роботи Любов БЕРКМАН, д.т.н., професор,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 15.10.2024 р. №320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Загальні особливості 4G LTE та антен технології MIMO.
   2. Канал зв'язку 4G LTE стандарту: завади які виникають при розповсюдженню радіосигналу в каналах зв'язку.
   3. Методи підвищення ефективності каналів зв'язку в сучасних мобільних мережах.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Впровадження результатів, отриманих при встановленні вимог до якості послуг, що надаються.

2. Розробка методики розрахунку потужності за результатами проведених робіт.
3. Оцінка ефективності застосування розробленої ІТ-методології
4. Реалізація методів боротьби з згасанням та завмиранням в каналах зв’язку.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	26.10.24	Викон.
2.	Аналіз технічного завдання	29.10.24	Викон.
3.	Створення математичної моделі з урахуванням багатопроменевої структури приймальної антени	01.12.24	Викон.
4.	Створення моделі для проведення експерименту на базі програми Matlab	02.11.24	Викон.
5.	Аналіз отриманих розрахунків	11.12.24	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	25.12.24	Викон.
7.	Розробка презентації	26.10.24	Викон.

Здобувач вищої освіти Артем РЕШОДЬКО
(підпис) *(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи Любов БЕРКМАН
(підпис) *(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Решодька Артема Петровича

на тему: «Методи збільшення швидкості передачі даних в сучасних мобільних мережах в надзвичайних умовах»

Актуальність:

Швидкісна передача даних у мобільних мережах є невід'ємною частиною сучасного суспільства, забезпечуючи комунікацію, доступ до інформації та інтеграцію новітніх технологій у різні сфери життя. Розвиток стандартів LTE, MIMO та 5G відкрив нові можливості для передачі великих обсягів даних із мінімальними затримками, що є критичним для підтримки цифрової економіки. У надзвичайних умовах, таких як стихійні лиха чи техногенні катастрофи, мобільні мережі стають основою для організації ефективного управління, координації рятувальних операцій і забезпечення життєво важливого зв'язку.

Тому, тема магістерської роботи, є актуальною. Запропонована тема має практичне значення та є доцільною і своєчасною.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показала високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. Робота охоплює базові сценарії надзвичайних умов (стихійні лиха, техногенні катастрофи), але не розглядає детально специфічні виклики, наприклад, у військових конфліктах чи під час кібератак.

2. У роботі недостатньо акцентовано на методах оптимізації енергоспоживання мобільних базових станцій, що критично важливо у надзвичайних умовах через обмежені ресурси живлення. Моделювання роботи мереж у кризових умовах є важливим аспектом, але в роботі бракує деталізації щодо сценаріїв екстремального перевантаження.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «добре», а здобувач Решодько Артем Петрович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр електронних комунікацій та радіотехніки».

Рецензент: _____

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Решодько А.П. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Методи збільшення швидкості передачі даних в сучасних мобільних мережах в надзвичайних умовах

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

В.о. директора ННІТ _____ Катерина НЕСТЕРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Решодько Артем Петрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Решодька Артема Петровича на оцінку «добре» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Любов БЕРКМАН
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Решодько А.П.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 98 стор., 51 рис., 9табл., 25 дж.

Мета роботи – розробка нових методів та вдосконалення існуючих підходів до збільшення швидкості передачі даних у сучасних мобільних мережах, особливо в умовах надзвичайних ситуацій.

Об'єкт дослідження - мобільні мережі сучасних стандартів LTE, Massive MIMO і 5G.

Предмет дослідження – методи збільшення швидкості передачі даних у мобільних мережах за умов надзвичайних ситуацій.

Короткий зміст роботи: В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

1. У першому розділі виконано огляд сучасних мобільних мереж, їх технологічних особливостей, таких як агрегація носіїв, beamforming, MIMO та інтеграція супутникових систем. Розглянуто типові проблеми у надзвичайних ситуаціях: зниження пропускної здатності та втрата покриття.

2. У другому розділі проаналізовано характеристики каналів зв'язку стандарту LTE, включаючи багатопроменеве поширення та ослаблення сигналу. Виявлено вплив земної поверхні на стабільність передачі даних і визначено ключові перешкоди.

3. У третьому розділі розроблено математичну модель каналу для LTE та методи боротьби з перешкодами, такі як кореляція в системах MISO і компенсація ефекту Доплера.

4. У четвертому розділі створено імітаційну модель каналу, проведено експериментальну оцінку продуктивності з урахуванням згасань і завмирань сигналу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОБІЛЬНІ МЕРЕЖІ, LTE, 5G, MASSIVE MIMO, BEAMFORMING, АГРЕГАЦІЯ НОСІЇВ, ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ, РОЗПОДІЛ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА, СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ, ЗГАСАННЯ СИГНАЛУ, ПЕРЕШКОДИ, ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ, АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ, СТАБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, MATHCAD.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 98 pages, 51 pictures, 9 table, 25 sources.

The purpose of the work - to develop new methods and improve existing approaches for increasing data transmission speeds in modern mobile networks, especially under emergency conditions.

Object of research – mobile networks of modern standards such as LTE, Massive MIMO, and 5G.

Subject of research – methods for increasing data transmission speeds in mobile networks under emergency conditions.

Summary of the work: The master's thesis has achieved the following results:

1. The first chapter provides an overview of modern mobile networks and their technological features, such as carrier aggregation, beamforming, MIMO, and the integration of satellite systems. Typical problems under emergency conditions are examined, including reduced bandwidth and coverage loss.
2. The second chapter analyzes the characteristics of LTE communication channels, including multipath propagation and signal attenuation. The impact of terrain on data transmission stability is identified, and key interference factors are determined.
3. The third chapter develops a mathematical model of the LTE channel and methods for mitigating interference, such as correlation in MISO systems and compensation for the Doppler effect.
4. The fourth chapter presents a simulation model of the channel and an experimental performance evaluation, considering signal fading and degradation.

KEYWORDS: MOBILE NETWORKS, LTE, 5G, MASSIVE MIMO, BEAMFORMING, CARRIER AGGREGATION, DATA TRANSMISSION SPEED, EMERGENCY CONDITIONS, SPECTRUM ALLOCATION, SATELLITE SYSTEMS, SIGNAL FADING, INTERFERENCE, NETWORK OPTIMIZATION, ADAPTIVE TRAFFIC MANAGEMENT, STABLE CONNECTION, SIMULATION MODELING, MATHCAD.

Зміст

Вступ ... 10
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ ... 19
1.1. Технологічні особливості стандартів 4G LTE і 5G ... 19
1.2 Принципи створення радіоінтерфейсу з використанням технології LTE ... 22
1.3 Типові проблеми в умовах надзвичайних ситуацій. Зниження пропускної здатності, втрата покриття. ... 26
1.4 Технології забезпечення швидкості передачі даних ... 28
1.5 Технологія MIMO в LTE ... 37
1.5.1. Передача та прийом різноманітності ... 38
1.5.2. Beamforming ... 39
1.5.3. Просторове мультиплексування в LTE ... 40
1.5.4. Загальні вимоги до режиму розгортання для розгортання режимів LTE/MIMO ... 42
РОЗДІЛ 2 КАНАЛИ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE. ПЕРЕШКОДИ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ ПОШИРЕННІ РАДІОСИГНАЛУ В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ ... 44
2.1. Модель багатопроменевого поширення ... 48
2.2. Ослаблення радіосигналів під час розповсюдження ... 50
2.3. Вплив земної поверхні на поширення сигналу в каналі зв'язку ... 54
РОЗДІЛ 3 Покращення продуктивності каналу зв’язку для стандарту LTE ... 61
3.1. Розробка математичної моделі каналу для LTE ... 61
3.2 . Методи боротьби з перешкодами в радіоканалі. Методи рознесення в LTE ... 65
3.3 Кореляція в системі MISO ... 67
3.4 Доплерівський зсув ... 72
РОЗДІЛ 4 Застосування методів боротьби із загасанням і завмиранням сигналу в каналі спілкування ... 77
4.1. Канальні моделі з ослабленням ... 77
4.2 Розробка імітаційної моделі каналу для експериментальної оцінки продуктивності каналу ... 80
ВИСНОВОК ... 95
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ... 97
ДЕМОНСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ ... 100

Вступ

Актуальність теми. Швидкісна передача даних у мобільних мережах є невід'ємною частиною сучасного суспільства, забезпечуючи комунікацію, доступ до інформації та інтеграцію новітніх технологій у різні сфери життя. Розвиток стандартів LTE, MIMO та 5G відкрив нові можливості для передачі великих обсягів даних із мінімальними затримками, що є критичним для підтримки цифрової економіки. У надзвичайних умовах, таких як стихійні лиха чи техногенні катастрофи, мобільні мережі стають основою для організації ефективного управління, координації рятувальних операцій і забезпечення життєво важливого зв'язку. Швидкісний мобільний зв’язок дозволяє екстреним службам працювати з даними в реальному часі, а також забезпечує населенню можливість отримання інформації та зв’язку з близькими. Проте сучасні мережі стикаються з викликами у вигляді перевантаження, пошкодження інфраструктури або недостатнього покриття у кризових зонах. У таких ситуаціях інноваційні технології, зокрема інтеграція мобільних і супутникових систем або використання мобільних базових станцій, можуть суттєво покращити якість зв’язку. Потреба у вдосконаленні швидкості передачі даних викликана не лише технічними, а й соціальними та економічними факторами. У світі, де обмін інформацією є критично важливим, розвиток нових підходів до управління мобільними мережами стає необхідністю. Розробка таких рішень дозволить покращити стійкість зв’язку, що має значення для глобальної безпеки та реагування на надзвичайні ситуації.

Бездротові телекомунікації, які починаються з 1893 року, коли Тесла вперше представив свій план, у якому детально описуються принципи першого у світі радіозв'язку, продовжують швидко розвиватися сьогодні. Сьогодні ми бачимо, що кількість стільникових телефонів значно перевищує кількість звичайних телефонів. Це явище пояснюється кількома причинами: низька вартість, швидкість доставки, широкий функціонал для передачі даних, телефонії, потокового відео тощо. Розвиток бездротового зв'язку супроводжується постійним технологічним розвитком. Зараз людство перебуває на перехідному етапі генерації мобільного

зв’язку від відомої технології 3G до 4G з розширеними можливостями. Крім того, очікується, що технологія 5G з’явиться на ринку в 2020 році. Глобальний саміт відбувся 24-26 червня 2013 року, щоб обговорити деякі вимоги до виробничих мереж 5G. Очікувані результати мережі п'ятого покоління:

- збільшити максимальну швидкість передачі даних в кілька разів;
- Доступ до Інтернету зі швидкістю 1 Гбіт/с будь-де;
- міграція до хмарних інфраструктур SDP та SDN;
- скористатися перевагами масштабованої та економічно ефективної транспортної мережі;
- забезпечення гарантованої якості обслуговування всіх видів послуг [1].

В Україні технологія 4G LTE активно розвивається та надається кількома основними телекомунікаційними операторами. До цих установ входять:

Київстар: Найбільший оператор мобільного зв'язку в Україні. Станом на листопад 2024 року, 4G-покриття Київстар охоплює понад 95,6% населення на підконтрольній Україні території. Оператор забезпечує 4G-зв'язок у всіх обласних центрах, великих містах та багатьох сільських населених пунктах. Зокрема, у 2024 році 4G-покриття з'явилося в 15 нових населених пунктах Івано-Франківської області, 36 — у Львівській та 38 — у Вінницькій областях. Найвищі показники покриття 4G у Київській — 99% та Дніпропетровській області — 98%.

Vodafone Україна: Один із провідних операторів, який активно розширює 4G-покриття по всій країні. Станом на 2024 рік, Vodafone забезпечує 4G-зв'язок у більшості обласних центрів та великих міст, а також у значній кількості менших населених пунктів. Оператор продовжує інвестувати в розширення мережі, зокрема вздовж основних автошляхів та у віддалених регіонах.

lifecell: Третій за величиною оператор мобільного зв'язку в Україні. lifecell надає 4G-послуги в обласних центрах, великих містах та багатьох інших населених пунктах. Оператор активно працює над збільшенням покриття та покращенням якості зв'язку, зокрема в сільській місцевості та вздовж транспортних коридорів.

Завдяки зусиллям цих операторів, більшість населення України має доступ до швидкісного мобільного інтернету 4G LTE, що сприяє розвитку цифрової інфраструктури та забезпечує сучасні комунікаційні послуги для громадян.

Розробка системи LTE прискорилася з появою більш досконалих технологій генерації сигналу з використанням множинного доступу, модуляції та ортогонального частотного кодування (OFDMA). Проект партнерства третього покоління (3GPP) і Європейський інститут стандартів телекомунікацій (ETSI) розробили нову версію системи мобільного зв'язку версії 8, яка включає магістральну мережу SAE, мережу електронного радіодоступу UTRAN і систему LTE. . Також тривають подальші дослідження, зокрема:

- фізичний рівень радіоінтерфейсу (спосіб забезпечення гнучкого використання каналів зі змінною смугою пропускання сигналів передачі/приймання до 20 МГц, впровадження нової технології доступу OFDMA та нової технології багатопроменевої антенної системи MIME);

- канальний і мережевий рівні радіоінтерфейсу (оптимізація процесів сигналізації);

- Архітектура мережі радіодоступу UTRAN (оптимізація архітектури мережі). Деякі з найбільших мобільних операторів були створені, щоб зосередити свої зусилля на збільшення швидкості передачі даних, був створений альянс який займається розробкою стандартів LTE. Ініціатива організації отримала назву NGMN (Next Generation Mobile Networks).

Основною метою альянсу є забезпечення надання послуг наступного покоління в 2010 році. Наприклад, японська компанія NTT DoCoMo зараз тестує технології, що забезпечують швидкість передачі даних до 100 Мбіт/с у мобільному та 1 Гбіт/с у фіксованому зв’язку в стаціонарному режимі [2]. Наразі робочі групи проекту 3GPP завершили роботу над мережею радіодоступу E-UTRAN і високорівневою архітектурою базової мережі SAE (System Architecture Evolution) системи LTE. Результати дослідження представлені в технічних характеристиках версії 8.9. Робочі групи проекту 3GPP розпочали роботу над технічною

специфікацією Release 10, спрямованою на вдосконалення параметрів системи LTE (створення передової системи LTE).

Таким чином, в даній роботі представляє основні поняття, структурну схему та технічні характеристики LTE. Однак метою даної магістерської роботи єрозробка нових методів та вдосконалення існуючих підходів до збільшення швидкості передачі даних у сучасних мобільних мережах. Одним із ключових завдань є створення рішень, які можуть бути ефективно застосовані в умовах надзвичайних ситуацій, коли зв'язок є критично важливим для порятунку життя та мінімізації наслідків лиха. Для досягнення поставленої мети необхідно провести глибокий аналіз існуючих технологій, таких як агрегація носіїв, beamforming, Massive MIMO, і оцінити їхній потенціал для адаптації до кризових умов. Ще одним завданням є розробка алгоритмів динамічного управління трафіком і розподілу ресурсів, які дозволять оптимізувати роботу мережі навіть за умови перевантаження. Важливим аспектом є також інтеграція мобільних мереж із супутниковими системами для забезпечення зв’язку у важкодоступних або пошкоджених зонах. Крім того, передбачається моделювання запропонованих методів у середовищах, що імітують надзвичайні умови, для перевірки їхньої ефективності. Завдання включають також оцінку економічної доцільності впровадження таких рішень, оскільки мобільні оператори мають обмежені ресурси. Особлива увага приділяється можливостям інтеграції запропонованих методів із майбутніми стандартами зв’язку, такими як 6G. Таким чином, робота має на меті зробити внесок у розвиток мобільних технологій, підвищуючи їхню ефективність і надійність у кризових ситуаціях. Тому ми обговоримо різноманітні проблеми, з якими стикаються дослідники під час роботи з сучасними цифровими мережами зв’язку, а також як вирішити ці проблеми.

Важливим поняттям в теорії комунікації є канал комунікації. Загалом канал зв’язку відноситься до частини системи зв’язку, яка включає джерело інформації, пристрій кодування та модуляції, пристрій передачі, фізичний канал (засіб розповсюдження сигналу), приймач із пристроями обробки інформації та джерело інформації. . приймач [3]. Аналіз каналу зв'язку враховує бюджет каналу

(розрахунок втрат енергії сигналу, пов'язаних з фізичними процесами, що відбуваються в пристроях і в середовищі розповсюдження). Бюджет — це метод оцінки, який використовується для визначення надійності передачі комунікаційної системи. Середовище розповсюдження або шлях електромагнітного зв'язку, що з'єднує передавальний і приймальний пристрої, називається каналом. Каналами можуть бути провідники, коаксіальні кабелі або оптичні волокна, хвилеводи, атмосфера, іоносфера або будь-яке інше середовище, через яке поширюються радіохвилі. У другому випадку мова йде про радіоканалі.

Одним із головних завдань створення сучасних цифрових мереж зв'язку є створення високошвидкісних каналів. Вирішення цієї проблеми в системах бездротового зв'язку стикається з багатьма труднощами, оскільки в радіодіапазоні все ще не вистачає виділеної смуги частот і існують обмеження для збільшення потужності випромінювання.

В даний час рішенням такої проблеми, як створення швидкісних каналів, є використання антен MIMO, які використовуються в стандарті LTE. Теоретичні дослідження та практичні результати, отримані за останні роки, показали, що вона дуже висока. Ефективність використання багатоантенних систем передачі в системах зв'язку та пприймальні конструкції, коли між передавачем і приймачем встановлено кілька просторових каналів з великою кількістю входів і виходів [4-6]. Це системи MIMO. Покращена продуктивність систем зв’язку MIMO досягається завдяки тому, що канали MIMO можуть забезпечувати значні прирости енергії, пов’язані з одночасною передачею, прийомом або рознесеністю передавання та прийому. Особливістю цих радіосистем є те, що виграш у збільшенні швидкості передачі інформації досягається лише в умовах багатопроменевого каналу, для моделювання якого використовуються різноманітні за формою та змістом математичні моделі. Тому розробка математичної моделі каналу для технології MIMO з урахуванням усіх недоліків існуючих моделей є актуальною задачею. Також дуже важливо проаналізувати канал зв’язку в системі LTE та розглянути та реалізувати методи підвищення ефективності каналу зв’язку.

Тому метою магістерської роботи є розробка заходів, які дозволять підвищити ефективність стандартного каналу зв’язку LTE.

Критерій продуктивності в цьому дослідженні буде оцінюватися як необхідне відношення сигнал/шум каналу зв'язку для забезпечення заданої ймовірності бітової помилки системи.

Для цього необхідно вирішити наступні завдання:

- аналіз існуючих оцінок параметрів багатоколійних кабелів в системі LTE, характеристик використовуваних каналів;

- вибір каналів з характеристиками, що найкраще відповідають даній системі;

- оцінка ефективності використання окремих каналів в системі LTE;

- обґрунтування практичних рекомендацій щодо використання обраних моделей;

- розробка канальної імітаційної моделі системи LTE для експериментальної оцінки ефективності обраних каналів.

Для вирішення дослідницьких завдань ми використовуємо теорію випадкових процесів, теорію ймовірності та математичну статистику, теорію електричного зв'язку та принципи статистичної радіотехніки.

Зі зростанням числа нових мобільних пристроїв та додатків до них зростає кількість мобільних абонентів у бездротових мережах. Зростає навантаження на мережу та на кожну базову станцію. Стоїть проблема у збільшенні пропускної спроможності при високій якості обслуговування користувачів [1]. Пропускна здатність мережі збільшується при розширенні частотної смуги або збільшенні потужності передавача та приймача. Однак дані шляхи збільшення швидкості передачі мають свої межі. Смуги частотних діапазонів, які виділяються стандартами, обмежені, і вартість окремих каналів зв'язку дуже висока, а рівень потужності обмежений вимогами біологічного захисту і, як правило, теж не може бути значно збільшений. У той же час, щоб, наприклад, зменшити ймовірність помилки в 10 разів за умов релеєвських завмирань сигналів, потужність має бути збільшена на 10 дБ [2]. Таким чином, завдання збільшення швидкості передачі

даних у бездротових системах зв'язку необхідно вирішувати в умовах строгих обмежень на частотну смугу сигналів та потужність передаючих пристроїв. Найбільш перспективним шляхом її вирішення є використання кількох антенних решіток як на приймальному, так і на передавальному кінцях лінії зв'язку, MIMO-системи.

MIMO (Multiple-InMultiple-Out-множинний вхід, множинний вихід) антени дозволяють більш ефективно використовувати потужність передавача і боротися із завмираннями сигналів. Під технологією MIMO розуміється одночасна передача в одному фізичному каналі кількох незалежних повідомлень. З метою реалізації дії MIMO застосовують багатоантенні системи: на стороні, що передає, є NTr передаючих антен, а на приймальній стороні NR приймальних.

Історія MIMO-технології відносно нетривала: перший патент на використання цієї технології був зареєстрований у 1984 р., а перша стаття опублікована у 1985 р. Тому MIMO-технологія стала одним із об'єктів для вивчення та розвитку в галузі бездротових телекомунікацій. У MIMO-системах використовуються такі підходи до поділу сигналів як просторово-часове, просторово-частотне, просторово-поляризаційне кодування.

Багатопроменеве завмирання, коли існує більш ніж один шлях поширення радіохвилі між MS і BTS і до приймача приходить більш ніж один сигнал, впливає на якість та надійність бездротової системи. Крім того, обмеження, що накладаються на потужність і дефіцитне використання смуги частот, роблять завдання досягнення високих швидкостей передачі даних і високої надійності систем бездротового зв'язку надзвичайно складною. Технологія MIMO є проривом у системі бездротового зв'язку щодо вирішення даних питань.

Актуальність роботиполягає у бездротовій технології – один з сегментів, що швидко зростають у комунікаційній сфері. Число користувачів інтернету та мобільного зв'язку у світі та в нашій країні безперервно зростає, а, отже, збільшується обсяг споживаного трафіку. Останнім часом виникає проблема у телекомунікаційній сфері, викликана зростанням обсягу трафіку порівняно з отримуваним обсягом доходів. Таким чином, оператори зв'язку все більше повинні

економити та раціонально використовувати частотні ресурси. Ефективним вирішенням цієї проблеми є використання MIMO-антен.

Швидкісна передача даних у мобільних мережах є невід'ємною частиною сучасного суспільства, забезпечуючи комунікацію, доступ до інформації та інтеграцію новітніх технологій у різні сфери життя. Розвиток стандартів LTE, MIMO та 5G відкрив нові можливості для передачі великих обсягів даних із мінімальними затримками, що є критичним для підтримки цифрової економіки. У надзвичайних умовах, таких як стихійні лиха чи техногенні катастрофи, мобільні мережі стають основою для організації ефективного управління, координації рятувальних операцій і забезпечення життєво важливого зв'язку. Швидкісний мобільний зв’язок дозволяє екстреним службам працювати з даними в реальному часі, а також забезпечує населенню можливість отримання інформації та зв’язку з близькими. Проте сучасні мережі стикаються з викликами у вигляді перевантаження, пошкодження інфраструктури або недостатнього покриття у кризових зонах. У таких ситуаціях інноваційні технології, зокрема інтеграція мобільних і супутникових систем або використання мобільних базових станцій, можуть суттєво покращити якість зв’язку. Потреба у вдосконаленні швидкості передачі даних викликана не лише технічними, а й соціальними та економічними факторами. У світі, де обмін інформацією є критично важливим, розвиток нових підходів до управління мобільними мережами стає необхідністю. Розробка таких рішень дозволить покращити стійкість зв’язку, що має значення для глобальної безпеки та реагування на надзвичайні ситуації.

Мета роботи даної магістерської роботи є розробка нових методів та вдосконалення існуючих підходів до збільшення швидкості передачі даних у сучасних мобільних мережах. Одним із ключових завдань є створення рішень, які можуть бути ефективно застосовані в умовах надзвичайних ситуацій, коли зв'язок є критично важливим для порятунку життя та мінімізації наслідків лиха.

Об’єкт дослідження - є мобільні мережі сучасних стандартів, які включають LTE, Massive MIMO і 5G. Ці технології є основою сучасного зв’язку, забезпечуючи високу пропускну здатність, низьку затримку та можливість обслуговування

великої кількості підключень. Особливий інтерес становить їхня здатність адаптуватися до динамічних умов у зоні лиха або перевантаження. Предметом дослідження є методи збільшення швидкості передачі даних у таких мережах за умов надзвичайних ситуацій. Це включає як аналіз існуючих підходів, так і розробку нових технологій, здатних забезпечити стабільний зв'язок навіть за відсутності частини інфраструктури. Дослідження фокусується на технічних аспектах, таких як оптимізація використання спектра, ефективне управління ресурсами та інтеграція супутникових і наземних систем. Предметом є також алгоритми, що забезпечують динамічну адаптацію мережі до змінних умов і потреб користувачів. Особлива увага приділяється питанням енергоефективності, адже в умовах надзвичайних ситуацій ресурси, як правило, обмежені. Вивчення об’єкта і предмета дозволяє зробити висновки щодо можливостей та обмежень сучасних мереж, а також напрямків їх подальшого вдосконалення.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

1.1. Технологічні особливості стандартів 4G LTE і 5G

Бездротові технології є одним із найбільш швидкозростаючих сегментів ринку телекомунікацій. Поява нових сервісів і вдосконалення технічних можливостей пристроїв означають, що обсяг трафіку в мобільних мережах і попит споживачів на швидку передачу даних зростатимуть безпрецедентними темпами. Наприклад, трафік даних від мобільних широкосмугових послуг зростає майже експоненціальна. Обсяг трафіку мобільних даних перевищив голосовий трафік. Таким чином, передача даних стала домінуючим трафіком у мобільних мережах.

Мобільні мережі повинні забезпечувати передачу трафіку в запланованих обсягах і оперативно задовільняти зростаючий попит користувачів на високу швидкість передачі даних. Досягнення цієї мети значною мірою залежить від вибору оптимальної технології. На сьогоднішній день існує кілька технологічних рішень, які можуть допомогти вирішити цю задачу.

Можливість розвитку технології мережі 3G/WCDMA на основі технології HSPA (високошвидкісний пакетний доступ – високошвидкісна пакетна передача даних). На даний момент у світі існує понад 330 мобільних мереж із підтримкою HSPA, які обслуговують понад 375 мільйонів абонентів. Реалістичні послуги передачі даних коштують близько кількох Мбіт/с, але найсучасніша специфікація HSPA наразі підтримує пікові швидкості передачі даних до 80 Мбіт/с. HSPA продовжує розвиватися і залишатиметься високоефективною та конкурентоспроможною технологією радіодоступу.

Разом із технологією HSPA стандарти консорціуму 3GPP були уніфіковані за допомогою технології LTE (Long Term Evolution), а вимоги 4G були повністю виконані.

Основними завданнями мережі LTE можна визначити збільшення потенціалу систем швидкого мобільного зв'язку, зниження витрат на передачу даних і можливість надавати широкий спектр економічних послуг. 3G через LTE

пропонує більшу пропускну здатність, краще використання частотного спектру та меншу затримку, яка у випадку невеликих пакетів може становити лише 5 мс. Підвищення швидкості передачі даних також означає якість надання послуг і сприяє їх поширенню. Сучасні мультимедійні сервіси (соціальні мережі, багатокористувацькі ігри, інтерактивні веб-програми, відеоконференції, відеодзвінки тощо).

LTE — це технологія на основі модуляції OFDM, яка підтримує масштабовану смугу пропускання до 20 МГц і забезпечує вдосконалену передачу з кількома антенами

Формування променя та просторове мультиплексування до чотирьох передавальних антен у низхідній лінії зв’язку.

LTE включає вдосконалену пакетну систему (EPS), яка складається з розширеної наземної мережі радіодоступу UMTS (E-UTRAN) і вдосконаленого центру комутації пакетів, який забезпечує високу пропускну здатність, низьку швидкість передачі інформації та більшу пропускну здатність у спрощеній мережі. . . Архітектура IP. LTE також пропонує мобільним операторам послуги бездротового широкосмугового доступу нового покоління за нижчою ціною за мегабіт. Крім того, LTE був спеціально розроблений для бездоганної роботи з усіма існуючими мережами як перспективна технологія, яка допоможе операторам мобільного зв’язку трансформувати свої мережі відповідно до майбутніх потреб зв’язку. Це забезпечить більш ефективну та якісну послугу передачі голосу та даних. LTE має багато особливостей і переваг перед попередніми стандартами стільникового зв’язку [3]. Серед них:

1. високі максимальні швидкості (порівняння показано на малюнку 1.1):

- 100 Мбіт/с (20 МГц, 2 × 2 MIMO);
- 50 Мбіт/с до (20 МГц, 1 × 2);

2. обслуговує щонайменше 200 активних користувачів голосової послуги на частоті 5 МГц;

3. короткі затримки <5 мс;

4. пропускна здатність посилання. 4G пропонує в 4 рази більшу пропускну здатність, ніж існуючі системи 3G;

5. підвищити спектральну ефективність. Спектральна ефективність означає ступінь використання смуги пропускання на рівні доступу бездротової мережі. Покращене значення дозволяє передавати більше інформації в цій смузі пропускання, одночасно збільшуючи кількість користувачів і послуг. Ви можете надіслати в 2-4 рази більше інформації, ніж у попередній версії. На рисунку 1.2. LTE порівнюється з HSPA;

6. підвищені швидкості провідності на краю клітини. Спектральну ефективність було покращено не лише на вежах, але й на краях осередків. Швидкості збільшені в 2-3 рази в порівнянні з попереднім стандартом;

7. немає різниці між передачею голосу та даних на центральному рівні. Вся мережа почала передачу по одному IP-каналу;

8. підтримка якості обслуговування абонентів.

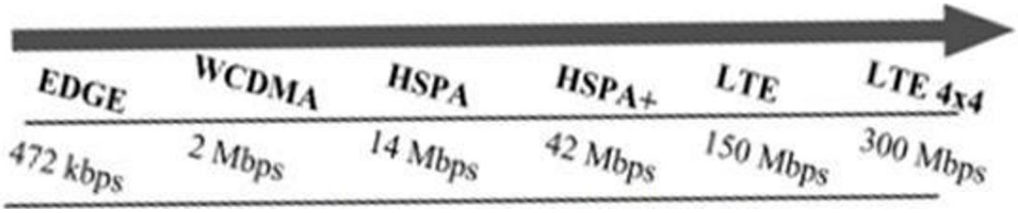


Рис. 1.1. – Максимальна швидкість передачі даних стандарті в стільникового зв’язку 10



Рис. 1.2. – Характеристики мережі LTE

1.2 Принципи створення радіоінтерфейсу з використанням технології LTE

LTE (Long Term Evolution) – продовження розвитку мобільних мереж, сумісних зі стандартами UMTS/CDMA. LTE – це перехідна технологія до мережі 4G, яка покращує якість і швидкість передачі даних шляхом заміни існуючих мереж. LTE використовує SAE (System Architecture Evolution) – плоска архітектура, розроблена для оптимізації продуктивності, підвищення ефективності витрат і спрощення запуску послуг на основі технології мультиплексування операторів IP і ортогонального OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним розподілом) і багатоантенні системи MIMO (кілька входів, кілька виходів). LTE дозволяє масштабувати частотні діапазони (від 450 МГц до 4,9 ГГц) і працювати в широкому діапазоні частот (від 1,5 МГц до 20 МГц) [7]. Архітектура LTE зменшує кількість вузлів, дозволяє гнучко конфігурувати мережу та гарантує високу доступність послуг. Він також забезпечить підключення LTE, 2G/3G (GSM, UMTS/HSPA, TD-SCDMA, CDMA2000).

Технологія LTE пропонує швидкість передачі даних від 100 Мбіт/с (швидкість передачі даних 173 Мбіт/с (downlink) і 58 Мбіт/с (uplink)). Технологія LTE базується на «плоскій» мережевій архітектурі, в якій базові станції (або eNodeB в термінології LTE) підключаються безпосередньо до Enhanced Packet Core (EPC). З’єднання встановлюється з обслуговуючим шлюзом (SGW) на стороні користувача та з системою підтримки мобільності (MME) на стороні керування (рис. 1.3) [8].

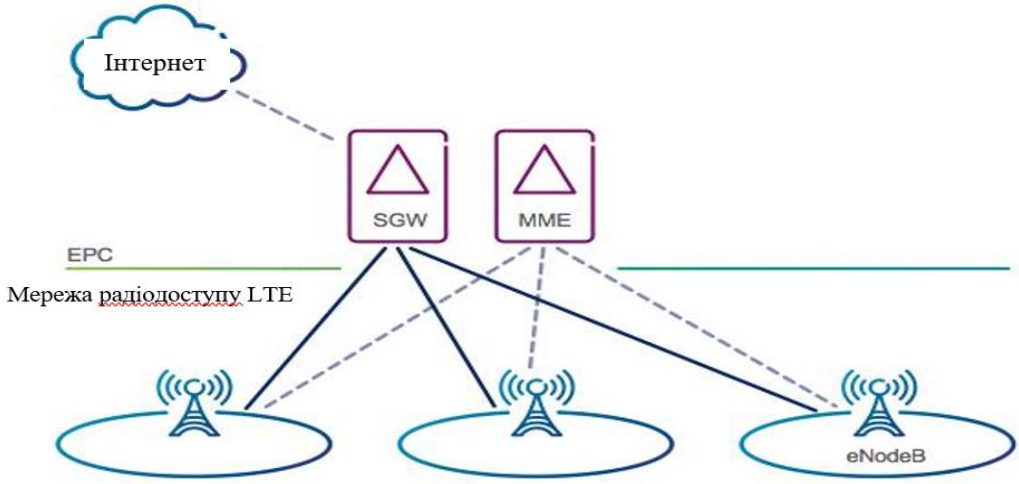


Рис. 1.3. – Архітектура LTE

Діапазони частот для FDD і TDD. LTE можна використовувати як у зв’язаній (FDD), так і в незв’язаній (TDD) частинах спектру (рис. 1.2) [9]. Перші продукти від великих постачальників підтримуватимуть обидві дуплексні схеми. Загалом, FDD забезпечує більшу ефективність і представляє більший потенціал для використання пристроїв та інфраструктури; Наприклад, TDD може бути гарним доповненням для заповнення прогалин. Щоб отримати додаткові відомості, перегляньте короткий посібник із FDD і TDD (нижче). Оскільки обладнання LTE практично ідентичне в додатках FDD і TDD (за винятком фільтрів), оператори, які починають із створення мереж TDD, можуть отримати вигоду від економії на масштабі, яка згодом призведе до широкого впровадження продуктів FDD.

Усі системи мобільного зв’язку сьогодні використовують FDD, і понад 90% частот, що використовуються системами мобільного зв’язку в усьому світі, є набором парних діапазонів частот. У FDD трафік висхідної та низхідної лінії зв’язку доставляється одночасно в різних діапазонах частот. Передача в системах TDD рух каналу вгору та вниз не є безперервним, що дозволяє використовувати той самий частотний діапазон для приведення в порядок каналу. Наприклад, якщо ви розділите час 1:1 між вищою та нижчою передачами, вища передача використовуватиметься лише половину часу.

Середня потужність кожного сеансу зв'язку також становить половину максимальної потужності. Тому що пікова потужність обмежена регулятором, то

як наслідок, за такої ж максимальної продуктивності TDD забезпечує нижче покриття, ніж FDD.

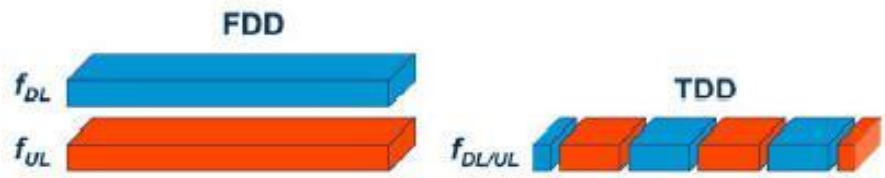


Рис 1.4. – Частотно-часовий розподіл каналів

Крім того, оператори часто хочуть присвятити більше половини своїх ресурсів низхідній лінії зв’язку (щоб збільшити максимальну пропускну здатність низхідної лінії зв’язку). Якщо співвідношення DL/UL становить 3:1, впровадження мережі TDD потребуватиме на 120% більше сайтів, ніж впровадження мережі FDD.

OFDM **(** мультиплексування з ортогональним частотним поділом) – техніка OFDM використовується в LTE, оскільки вона забезпечує високу пропускну здатність і стійкість до перешкод, викликаних відбиттям і перешкодами. Схема доступу змінюється зверху вниз. Множинний доступ OFDMA використовується для низхідної лінії зв'язку і Вихідний канал використовує SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access).

Користувачам LTE виділяються блоки ресурсів, що складаються з 12 суміжних піднесучих x 1 підкадр (рис. 1.5) [9]. 1 вихідний блок = 12 піднесучих іх 14 символів OFDM = 168 вихідних елементів. Об'єднання піднесучих у пару в вихідному блоці 180 кГц зменшує кількість пілотних піднесучих для оцінки каналу на стороні прийому. У режимі низхідної лінії зв'язку 2x2 MIMO 16 із 168 доступних позицій у кожному блоці ресурсів зарезервовано для драйверів (частка драйверів становить 9,5%). У верхньому та нижньому рядках розмір ресурсного блоку однаковий: 168 елементів ресурсу. У висхідній лінії зв'язку за підлеглими пілотами закріплено 36 позицій (21,4%). Таким чином, частка пілотних піднесучих в LTE зменшується в 1,5 рази, порівняно з WiMax.

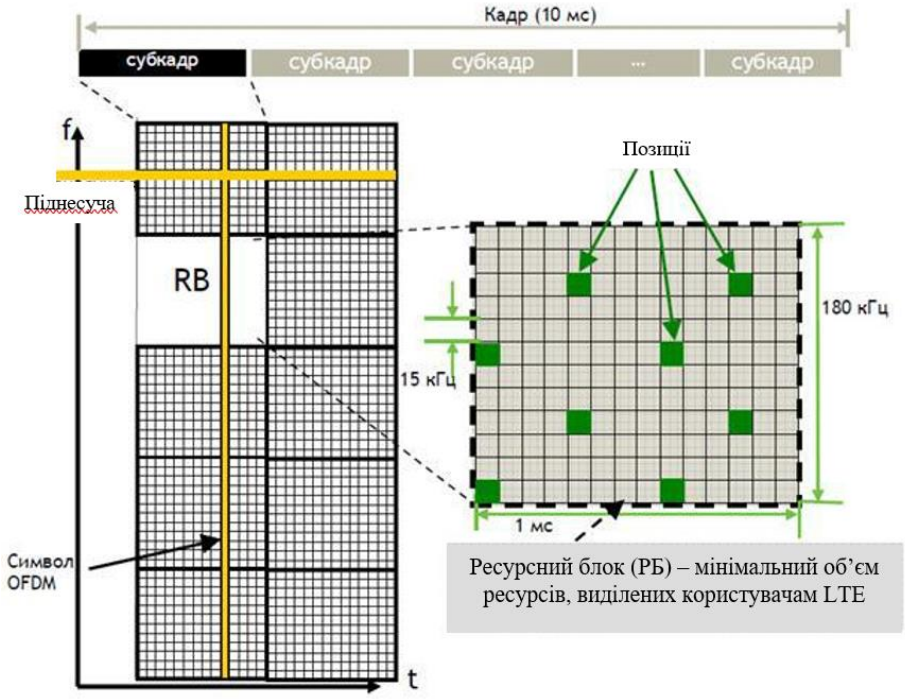


Рис. 1.5. – Блоки ресурсів частотного каналу LTE

MIMO (Multiple Input Multiple Output) була основною проблемою в старих телекомунікаційних системах сигналізації. Компонент сигналу, який досягає приймальної антени різними шляхами,різні часові інтервали, що призводить до зниження якості сигналу. Завдяки технології MIMO цей недолік перетворюється на перевагу. MIMO використовує кілька антен (антенних решіток) для оцінки різних антен шляхи сигналу. Матриця також вловлює підключені компоненти сигналу, покращуючи якість сигналу. Зараз великою популярністю користуються матриці 2x2 (найпростіші в реалізації).

SAE (System Architecture Evolutionary) – архітектура має змінити систему через вимоги до високої та низької затримки LTE. Одна зі змін передбачає зменшення кількості функцій, за які раніше відповідала базова мережа. Їх переселили на околицю. Завдяки цьому структура мережі була спрощена, що гарантує менші затримки та більш ефективну маршрутизацію [10].

Існуючі системи GSM і WCDMA/HSPA інтегровані в систему LTE за допомогою стандартизованих інтерфейсів між SGSN і магістралью LTE. Очікується, що ініціатива інтеграції доступу CDMA також підтримуватиме мобільність між мережами CDMA та LTE. Така інтеграція також має забезпечити

як дворежимну, так і одномодову переадресацію викликів, забезпечуючи гнучкий перехід від мереж CDMA до мереж LTE [7].

1.3 Типові проблеми в умовах надзвичайних ситуацій. Зниження пропускної здатності, втрата покриття.

Мобільні мережі відіграють критично важливу роль у надзвичайних ситуаціях, забезпечуючи комунікацію між рятувальними службами, державними органами та постраждалим населенням. Проте в екстремальних умовах виникають серйозні проблеми, що впливають на якість та стабільність зв'язку. Основними з них є зниження пропускної здатності та втрата покриття. Зниження пропускної здатності:

Перевантаження мережі**:** Під час надзвичайних ситуацій кількість користувачів мобільних мереж значно збільшується. Люди масово телефонують родичам, викликають екстрені служби або намагаються отримати актуальну інформацію. Це призводить до перевантаження базових станцій, що знижує швидкість передачі даних.

Обмежені ресурси спектра**:** Частотний спектр є обмеженим ресурсом. У надзвичайних ситуаціях зростає конкуренція за доступ до нього, особливо в густонаселених районах.

Зниження ефективності роботи мережевих протоколів: При великій кількості запитів у мережі спостерігається збільшення часу затримки (latency) та зменшення швидкості обміну даними між користувачами.

Пошкодження інфраструктури**:** Навіть часткове пошкодження інфраструктури може знизити пропускну здатність мережі, зокрема через зменшення кількості доступних каналів зв'язку.

Обмеження енергоресурсів**:** У разі відключення електроенергії базові станції переходять на резервні джерела живлення, що часто обмежує їх роботу.

Втрата покриття: Фізичне пошкодження базових станцій**:** У разі стихійних лих (землетрусів, повеней, ураганів) або техногенних аварій (вибухів, пожеж) можливе

пошкодження або знищення обладнання, яке забезпечує зв’язок. Погіршення умов поширення радіохвиль**:** Об’єкти, зруйновані під час надзвичайної ситуації (будівлі, дерева), створюють додаткові перешкоди для поширення радіосигналу, що впливає на зону покриття.

Руйнування транспортної інфраструктури**:** переривання оптоволоконних кабелів, які є основними транспортними каналами для базових станцій, призводить до втрати покриття у великих зонах. Збої в роботі енергомереж**:** відсутність електроживлення може призвести до вимкнення базових станцій, особливо тих, які не оснащені резервними джерелами живлення.

Погана організація мережевих ресурсів**:** неправильна конфігурація передачі сигналу між сусідніми базовими станціями ускладнює утримання покриття, особливо в умовах аварійного перемикання. Використання мобільного обладнання в незвичних умовах**:** Наприклад, розгортання тимчасових мобільних станцій у зонах лиха часто не покриває великої території або працює нестабільно.

Зниження пропускної здатності та втрата покриття є ключовими проблемами, які знижують ефективність мобільних мереж у надзвичайних умовах. Для їх вирішення необхідно впроваджувати інноваційні технології, такі як beamforming, агрегація носіїв, інтеграція мобільних і супутникових систем, а також використання мобільних базових станцій. Розробка ефективних методів усунення цих проблем має вирішальне значення для забезпечення безперервного зв’язку у кризових ситуаціях.

Режим MIMO в LTE, проблеми в надзвичайних ситуаціях**.** Слід додати, що в LTE MIMO конфігурації антен часто виражаються як схеми типу [M,N]; де M – кількість елементів передавальної антени, N – кількість елементів приймальної антени. Залежно від конфігурації антени, LTE розрізняє різні режими MIMO (рис. 1.4) [11]:

- SISO (Single Input Single Output) - нормальний звичайний режим (без змін);
- SIMO (Single Input Multiple Output) – передавач і кілька приймальних антен (рознесений прийом);

- MISO (Multiple Input Single Output) – кілька передавальних антен і одна приймальна антена (рознесена передача);

- MIMO (множинні входи, багаторазові виходи).

Крім того, в LTE для MIMO доступні два інших режими (рис. 1.5):

- ON MIMO (Single User MIMO) – Реалізація MIMO по відношенню до одного користувача;

- MU MIMO (Multi-User MIMO) – передача багатьох користувачів MIME.

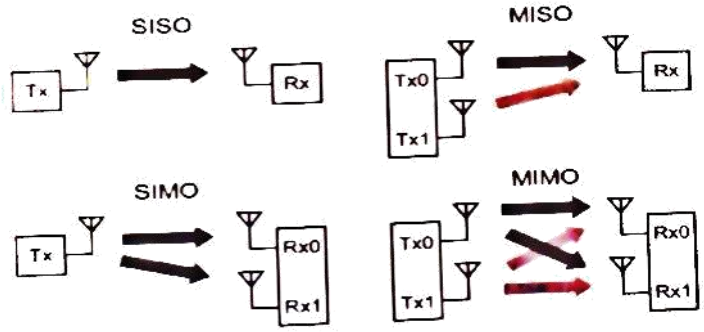


Рис. 1.6. – Режим MIMO в LTE

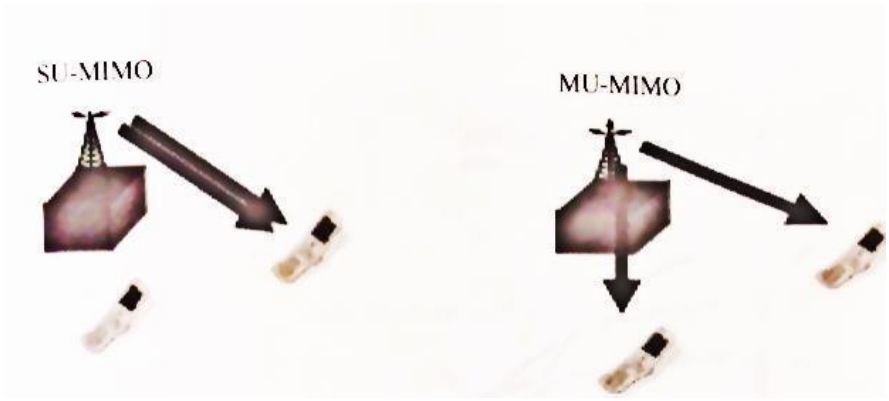


Рис. 1.7. – Режими SU-MIMO та MU-MIMO в LTE

1.4 Технології забезпечення швидкості передачі даних

У сучасних мобільних мережах швидкість передачі даних є критично важливим параметром, особливо в надзвичайних умовах, коли зв’язок має бути стабільним, швидким і доступним. Задля досягнення високої ефективності

використовуються різноманітні технології, серед яких особливу увагу приділяють розподілу частотного спектра та інтеграції мобільних і супутникових систем.

Динамічний розподіл частотного спектра дозволяє ефективно використовувати наявний спектр залежно від поточних потреб. У випадках, коли один діапазон перевантажений, система автоматично перенаправляє трафік на менш завантажені частоти. Це забезпечує стабільну швидкість передачі даних навіть у критичних ситуаціях. LTE та 5G використовують технологію агрегації носіїв, яка дозволяє об'єднувати кілька частотних діапазонів у єдиний канал для передачі даних. Це збільшує загальну пропускну здатність мережі, що є особливо важливим у надзвичайних умовах, коли зростає кількість користувачів. У сучасних мобільних мережах застосовуються як низькочастотні (700 МГц), так і високочастотні (28 ГГц) діапазони. Низькі частоти забезпечують широкий радіус покриття, а високі – високу пропускну здатність у густонаселених зонах. У мережах 5G активно використовується DSS, що дозволяє динамічно розподіляти частотний спектр між 4G і 5G залежно від потреб користувачів. Це знижує затримки та збільшує швидкість передачі даних. Когнітивне радіо (Cognitive Radio) ця технологія дозволяє пристроям аналізувати доступний спектр у реальному часі та використовувати найоптимальніші частотні діапазони. Це знижує ймовірність перевантаження мережі та підвищує ефективність передачі даних.

Теоретичні основи MIMO - заснований на розташуванні паралельних просторових каналів у спільній смузі частот за допомогою багатоканальних антен, що дозволяє розподіляти енергію між цими каналами (з точки зору) – «Транслюйте» SNR і уникайте насичення смуги пропускання. В ідеалі енергія, що розсіюється, буде приблизно однаковою в точці прийому всіх просторових каналів, а загальна пропускна здатність буде пропорційна кількості потоків, що передаються паралельно, як якщо б ширина каналу збільшилася на однакову величину. Однак у реальних умовах відношення сигнал/шум кожного просторового каналу може бути різним. Ця різниця призводить до порушення «енергетичної симетрії» просторових каналів і, як наслідок, до зменшення радіусу дії в каналах з низьким SNR.

Через зазначені вище умови кількість переданих паралельних потоків не може перевищувати фактичну кількість переданих (або отриманих) антен MIMO. Загальною вимогою до вибору кількості r потоків даних, що передаються паралельно, є наступне правило

$$r_{max} = \min [M, N], \qquad (1.1)$$

де M, N відповідно кількість передавальних і приймальних антен MIMO.

Параметр r називається в літературі MIMO порядком просторового мультиплексування.

Різне співвідношення між розміром зони радіопокриття та загальною швидкістю передачі даних у просторових каналах у конфігурації 4x4 MIMO якісно представлено на малюнку 1.6 [12].



Рис. 1.8. – Вплив ступеня просторового мультиплексування в конфігурації 4x4 MIMO

Потік даних (r = 1) у конфігурації 4x4 MIMO дозволяє досягти найвищої загальної швидкості передачі даних на невеликій території. Перший випадок може відповідати процедурі передачі рознесеності TxDiv або формування променя, другий випадок – просторовому мультиплексуванню. Таким чином, Beamforming найкраще підходить для краю комірки, а MIMO з просторовим мультиплексуванням найкраще підходить для центру комірки. Комбінація цих процедур реалізована в технології MIMO, яка використовується в системах LTE.

Теоретичне представлення MIMO базується на визначенні згаданих моделей просторового каналу. При поясненні цих моделей враховується, що незважаючи на різноманітність антен MIMO, в реальних умовах існує певна кореляція між каналами. Це Цей зв’язок значною мірою залежить від комбінації факторів, зокрема:

- ступінь багатопроменевості – «сильніші» відображення сигналу додатково прикрашають просторові канали; Вони найкраще підходять для програм MIMO;

- засоби розповсюдження сигналу (різноманітні перешкоди на шляху розповсюдження, підвищені відбиття сигналу, але при цьому зниження його енергії в місці прийому);

- втрати на шляху поширення сигналу;

- просторова поляризація сигналу, що передається;

- конфігурація передавальної та приймальної антен (відстань між елементами багатоканальної антени, напрямок поляризації кожного елемента антени тощо).

У загальному випадку взаємозв'язки між просторовими каналами визначаються за допомогою певної матриці H (1.2), елемент якої h_{ij} визначає зв'язок i-ї передавальної антени з j-ю приймальною антеною і називається канальним коефіцієнтом. (Малюнок 1.7). Матриця H називається канальною і має розмірність MxN; де M – кількість передавальних антен, а N – кількість приймальних антен. Кількість переданих паралельних потоків даних r визначається умовою (1.1) і обмежена розміром матриці H.

$$H = \begin{matrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2N} \\ . & . & . & . \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{matrix} \qquad (1.2)$$

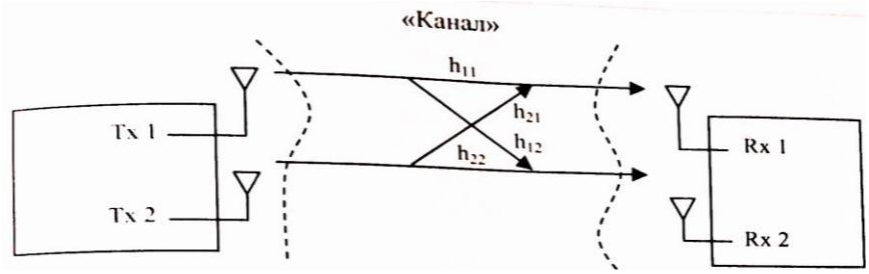


Рисунок 1.9. – Модель каналу 2x2 MIMO

У системах MIMO масив каналів повністю визначає канал поширення сигналу між усіма передавальними та приймальними антенами. Існують різні моделі його визначення, як детерміновані, так і стохастичні [13]. З урахуванням цих зауважень сигнал Y в матричному вигляді на вході всіх приймальних антен буде виглядати так:

$$Y = Hx+n, \qquad (1.3)$$

де x - матриця сигналу, що передається;

$n = I\sigma_n^2$ – матриця білого гаусового шуму з нульовим математичним сподіванням і розподілом σ_n^2 на вході приймача; I - є матрицею ідентичності.

Алгоритми прийому такого сигналу можуть бути різними [14], але всі вони базуються на інформації канальної матриці H, яка є результатом оцінювання прийнятого сигналу під час його обробки в приймачі (1.4). З відомою матрицею H, тобто оцінка сигналу x_i, що передається на і-ту антену, визначається як мінімальна відстань у просторі, правильний фундамент

$$\bar{x}_i = \operatorname{argmin} \| y - H_{X_i} \| \qquad (1.4)$$

Кореляційні зв'язки між каналами визначаються недіагональними елементами матриці H, що дозволяє нам оцінити, чи можна компенсувати існуючу кореляцію.

Слід підкреслити, що реалізація такого алгоритму на приймачі включає операції обчислення матриці та вимагає додаткових ресурсів обчислення в апаратному забезпеченні, як з точки зору швидкості, так і обсягу обчислень, залежно від конфігурації MIMO.

Для отримання Н-матриці на приймачі з урахуванням реальних умов необхідно знати стан просторових каналів. Щоб оцінити це, кожна антена повинна передавати певні, відомі ортогональні сигнали приводу до приймача. Результати цієї оцінки використовуються для обробки сигналу після його прийому, а також надсилаються на передавач через зворотний канал, щоб згодом адаптувати формат переданих потоків даних. Використовуючи відомі коефіцієнти матриці Н на передавачі, можна визначити асиметрію потоків даних і, якщо можливо, формат передачі можна відрегулювати шляхом застосування бажаної схеми модуляції та кодування до відповідного простору каналу. Для цієї процедури потрібен канал зворотного зв'язку (MIMO із замкнутим циклом). Тестові або еталонні сигнали RS (Reference Signal) використовуються як тренувальні сигнали, згадані в LTE. І тут варто зауважити, що через тимчасову різницю між отриманням оцінок у приймачі та передачею їх результатів на сторону, що передає, можуть спостерігатися суттєві помилки. Крім того, помилки можуть виникати в частотних діапазонах періодичного дуплексного FDD через некорельований стан радіоканалів. У цьому сенсі в загальному випадку технологію MIMO можна оцінити згідно з теоремою Шеннона за допомогою наступного співвідношення [15]

А тут слід лише помітити, що через тимчасову різницю між отриманням оцінок у приймачі та передачею їх результатів на сторону, що передає, можуть спостерігатися суттєві помилки. Крім того, помилки можуть виникати через некорельованість стану радіоканалів у рознесених дуплексних смугах частот FDD. У цьому сенсі технологія MIMO для загального випадку може бути оцінена на основі теореми Шеннона за допомогою відповідного співвідношення [15]

$$I = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log_2 p_i \qquad (1.5)$$

де I – кількість інформації; N – кількість можливих подій; p_i – ймовірність окремих подій.

Розглянемо ще одну важливу процедуру технології MIMO. Ця процедура необхідна для правильного розподілу переданих даних між антенами MIMO; Це знижує рівень взаємодії каналів, забезпечуючи крутість потоків, що передаються. Ця процедура, за своєю функціональною суттю, називається попереднім

кодуванням і спрямована на те, щоб якимось чином перетворити модульовані сигнали в передавачі у форму сигналів x, що передаються на кожну антену MIMO (1.3), тобто

$$x = F(s), \qquad (1.6)$$

де F(s) є певною функцією перетворення, а місце процедури в усьому процесі генерації сигналу в MIMO показано на рисунку 1.8 [12].

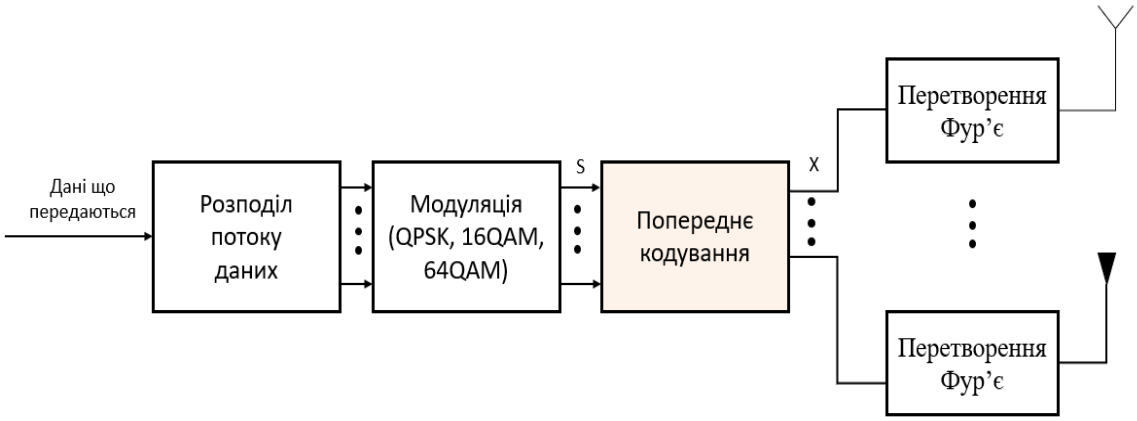


Рис. 1.10. – Попереднє кодування LTE/MIMO

Слід зазначити, що термін «попереднє кодування» охоплює клас різних схем передачі даних і не вказує на конкретну схему, а лише на процедуру. Однак усі схеми реалізують лінійне блокове кодування та визначаються масивом кодових слів MxLW, де M– кількість передавальних антен MIMO, L – кількість сигналів, закодованих у кожному потоці у часовій або частотній області. Відповідно до (1.8) матриця кодового слова позначає функцію перетворення F(s) у процесі де набір паралельних модульованих символів множиться на матрицю W. По суті, існує «зважене» перетворення кожного символу з заданою вагою w. У теорії та практиці MIMO використовуються різні методи попереднього кодування. Таким чином, при формуванні променя символ одного переданого потоку даних множиться на ваговий вектор w, щоб налаштувати фази сигналу на кожній антені; це необхідно для отримання необхідної форми і напрямку променя випромінювання;

$$X = WS_i = \begin{vmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \ddot{W}_M \end{vmatrix} S_i \qquad (1.7)$$

У просторовому мультиплексуванні, у його найпростішій формі, коли кожна антена передає модульований символ паралельно того самого потоку даних (при диференціальній передачі), число Аламуті використовується для попереднього кодування. Цей код названо на честь автора Siavash Alamouti, який запропонував новий підхід до розділення сигналів MIMO на стороні приймача [16]. Код Alamouti — це блоковий код, представлений матрицею кодового слова 2x2W, у якій сигнал перетворюється як [12]

$$X = WS = \begin{vmatrix} S_1 & S_2 \\ S_2^* & S_1^* \end{vmatrix} \quad (1.8)$$

Де: s^* - комплексно-спорядженний сигнал(символ)

Цей метод кодування належить до класу STBC ортогонального просторово-часового блокового кодування. Відповідно до (1.10) вихідні сигнали після початкового кодування математично можна представити наступним чином.

$$X_{1i} = S_1 = S_{1c} + jS_{1c}$$
$$S_{2i} = -S_2^* = -(S_c - jS_{2s}) \quad (1.9)$$
$$X_{1(i+1)} = S_2 = S_{2c} + jS_s$$
$$X_{2(i+1)} = S_1^* = S_{1c} - jS_{1s}$$

Де s_C і s_S – синфазна та квадратурна складові модульованого сигналу.

Принцип кодування Alamouti полягає в тому, щоб розділити послідовність символів для передачі на пари x_1 і x_2 (тобто суміжні парні та непарні символи). Для передачі таких пар необхідні дві антени та два інтервали передачі і-й і (i+1)-й дальності передачі. Тому виходячи з (1.8) та (1.9) в першому (і-му) інтервалі часу передавальна антена 1 передасть сигнал із символом x_{11} , а антена 2 – сигнал x_{21} . У наступному часовому інтервалі антена 1 передасть символ сигналу $x_{1(i+1)}$ і антена 2 – $x_{2(i+1)}$.

Зверніть увагу на цікаву особливість цього типу кодування. Легко перевірити, чи є сигнали x_{1i} і x_{2i} протифазними (протилежними за знаком) і ортогональними (комплексними) на першому інтервалі часу.

У разі сполучення та сама пара сигналів $x_{1(i+1)}$ і $x_{2(i+1)}$ буде у фазі та перпендикулярі у другому часовому інтервалі . Ця функція буде повторюватися

тим самим змінюючи напрямок випромінювання антени на180^0, створюючи ефект, схожий на «мерехтіння антени». Метою цього ефекту є зменшення кореляції між просторовими каналами за рахунок декореляції відбитих сигналів у кожному каналі через різні напрямки випромінювання.

Інший підхід до просторово-часового кодування полягає в мультиплексуванні сигналів за допомогою методу магічного квадрата (альтернативи методу Аламуті), описаного в [16]. Не вдаючись у детальні пояснення, згадаймо, що магічний квадрат порядку n — це масив із n × n квадратів, заповнений цілими числами від 1 до n^2 . Сума чисел у кожному рядку, у кожному стовпчику та на двох головних діагоналях однакова. Для попереднього кодування даних, що передаються через MIMO, числа магічного квадрата перетворюються за модифікацією 4, за винятком випадків, коли X_{mod} 4 = 4 (рисунок 1.9) [16].

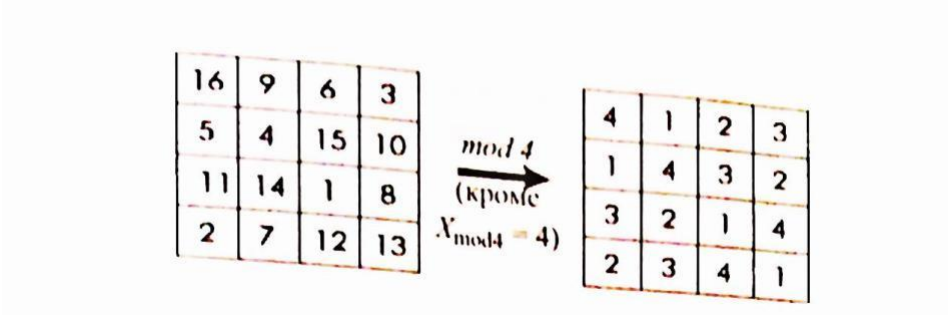


Рис. 1.11. – Перетворення магічного квадрата для багаточастотного кодування

Відповідає числам x_1 , x_2 , x_3 і x_4. У цьому випадку рядки таблиці відповідають передавальним антенам, а стовпці – інтервалам часу передачі.

Підсумовуючи, можна зазначити, що розглянута початкова процедура кодування може залежати як від ситуації, так і від ситуації радіоканал і не пов'язаний з ним. Прикладом незалежного попереднього кодування є формування променя. В іншому випадку вибір того чи іншого методу кодування визначається наявністю точної інформації про стан каналу від передавача. Одним із визначальних факторів у цьому випадку є ступінь мобільності абонентського терміналу, що ускладнює відстеження динамічних змін у каналі через швидке

старіння даних у каналі. Отже, може бути встановлена матриця попереднього кодування W; попередньо згенеровані та розраховані під час сеансу зв’язку. У публікаціях набір матричних констант W отримала назву кодова книга (Codebook) це істотно полегшує канал зворотного зв'язку, через який абонентський термінал повинен передавати інформацію про результати оцінки інших просторових каналів на базову станцію. У мережі може бути створено кілька кодових книг, з яких абонентський термінал може вибрати найбільш підходящу матрицю W для прийому. При двонаправленому FDD частота буде розраховуватися під час сеансу зв'язку, тому має сенс використовувати фіксовану матрицю. недійсний через велику різницю частот між просторовими каналами низхідної та висхідної лінії зв’язку. Однак у дуплексному TDD зручніше використовувати розрахункову матрицю.

1.5 Технологія MIMO в LTE

Технологію MIMO можна віднести до нетрадиційного застосування фазованих антенних решіток. У цьому розділі обговорюватимуться функції MIMO, які використовуються в системах LTE. Основною особливістю цієї специфіки є те, що концепція MIMO в системах LTE трактується більш широко і охоплює весь спектр розглянутих застосувань фазованих антенних решіток. Ця концепція включає просторову передачу та прийом, формування променя та просторове мультиплексування, які раніше розуміли як технології передачі MIMO. Ця специфіка є результатом широкого використання методів передачі, перелічених у LTE. Це означає, що в LTE один із цих методів адаптивно вибирається на основі умов радіоканалу під час передачі. На рисунку 1.10 показано дерево рішень для реалізації технології MIMO в системах LTE [17].

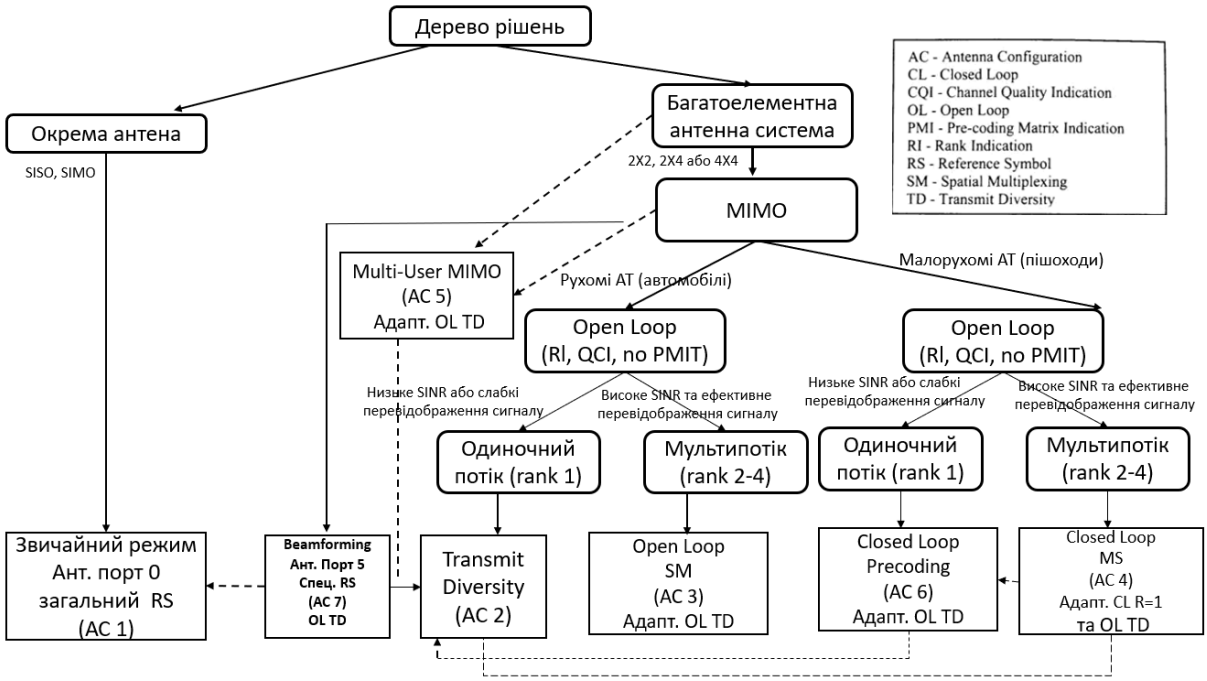


Рис. 1.12. – Структура MIMO в LTE (Rel’8)

Надаємо короткий опис методів передачі даних у системі LTE MIMO, зображених на рисунку 1.12.

1.5.1. Передача та прийом різноманітності

Передача та прийом TxDiv (Transmit Diversity, TD) відбувається, коли на стороні передачі або прийому використовується кілька просторово розподілених антен. При цьому завдяки цим антенам однакові потоки даних передаються паралельно (дублюються) як на одній частоті, так і на різних частотах. Це покращує якість прийому на краю комірки, де відношення сигнал/шум (SNR) низьке. Крім того, цей тип передачі використовує кодування даних, які надсилаються кількома антенами. Відповідно до цього типу процесу кодування ми розрізняємо різні режими рознесення в LTE: рознесена передача з просторово-часовим блоковим кодуванням STBC (просторово-часові блокові коди), рознесена передача з просторово-частотним блоковим кодуванням SFBC (просторово-часові блокові коди). . і FSTD (Frequency Switched Transmission Diversity), передача рознесеності шляхом комутації (комутації) радіочастот.

Спеціальний код під назвою Alamouti використовується для просторово-часового кодування STBC в LTE. Тут більш детально пояснюється, як працює

блочне кодування простору-часу з використанням цього коду. Закодований за допомогою цього коду, той самий потік даних передається різними антенами, але він кодується по-різному, як показано на малюнку 1.11 [18]. Це дозволяє отримати енергію від просторово розділеної передачі в умовах повторного відбиття сигналу.

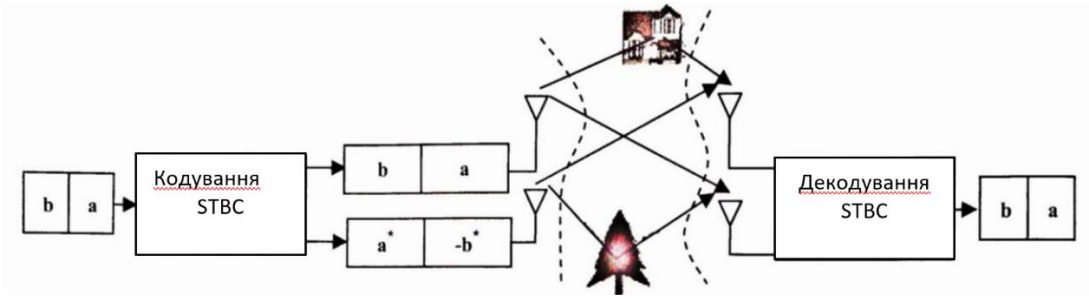


Рисунок 1.13. – Просторово-часове кодування з використанням 2x2 MIMO

Замість того, щоб передавати пару сигналів у двох послідовних часових інтервалах, вони можуть передаватися одночасно на двох ортогональних (окремих) частотах. Цей режим рознесеної передачі буде відповідати режиму SFBC. Узагальненням цього методу в LTE є комбінація MIMO-OFDM, в якій схема кодування Alamouti дозволяє отримати код просторової частоти. Відповідно до цього коду група частот піднесучих сигналів OFDM може бути використана для передачі кожної послідовності символів, як показано на малюнку 1.12 [18].

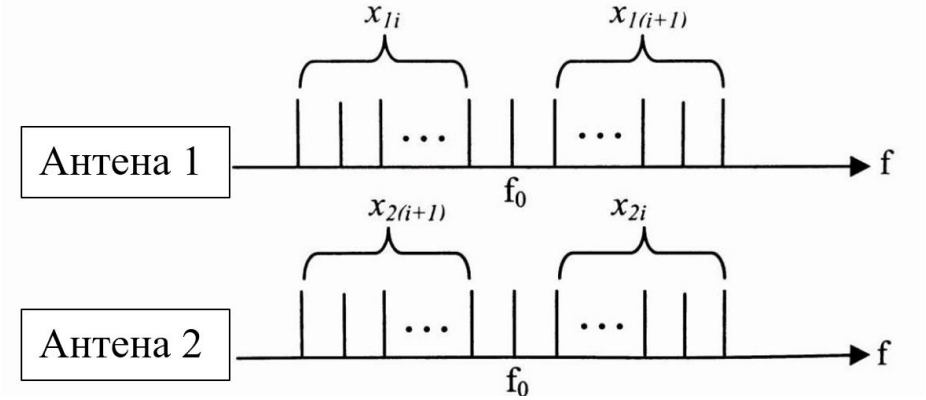


Рисунок 1.14. – Багаточастотне кодування Alamouti

1.5.2. Beamforming

Beamforming - Формування променя, тобто просторовий розподіл каналів SDMA (просторово розділеного множинного доступу), досягається шляхом адаптивного формування вузьких просторових пучків характеристик

випромінювання антени. Збільшує пропускну здатність каналу на краю комірки, забезпечуючи просторово вибіркову передачу даних для одного або кількох абонентів. Антени з такими характеристиками називаються адаптивними (розумними). Теоретичною основою роботи адаптивних антен є добре розроблена теорія просторово-часової обробки сигналів (STSP) [19]. Технологія SDMA (Beamforming) може бути реалізована за допомогою антени на абонентському терміналі (стандарт 3GPP Rel'5/6).

1.5.3. Просторове мультиплексування в LTE

Метод просторового мультиплексування в LTE має ряд принципових відмінностей від диференціальної передачі TxDiv. Це дозволяє паралельно передавати декілька потоків даних, збільшуючи тим самим максимальну швидкість передачі на кожному з'єднанні. Ще одна відмінність

Позитивне використання ефективності багатопроменевого поширення сигналу в радіоканалі. Як показано нижче

Чим потужніше багатопроменевість, тим ефективніше просторове мультиплексування, таке як MIMO; Можна виділити дві основні переваги:

- підвищити надійність радіоканалів в умовах багатопроменевого поширення. Використання MIMO призводить до значного покращення якості каналу зв'язку, що забезпечує більш стабільну та надійну передачу даних.

Умови відбиття сигналу. У системі LTE спостерігається деяке погіршення якості передачі трафіку при швидкості абонентського трафіку від 3 км/год до 120 км/год;

- підвищити спектральну ефективність і стільникову пропускну здатність мережі LTE завдяки можливості одночасної передачі багатьох незалежних потоків даних (рисунки 1.13 - 1.14) [20].

Завдяки MIMO підсилення максимізується в густонаселених міських районах, де сигнал багаторазово відбивається та коливається вздовж свого шляху поширення. Рисунок 1.15 показує результати моделювання, характеризується

підвищенням спектральної ефективності при використанні багатоканальних MIMO антен [21].

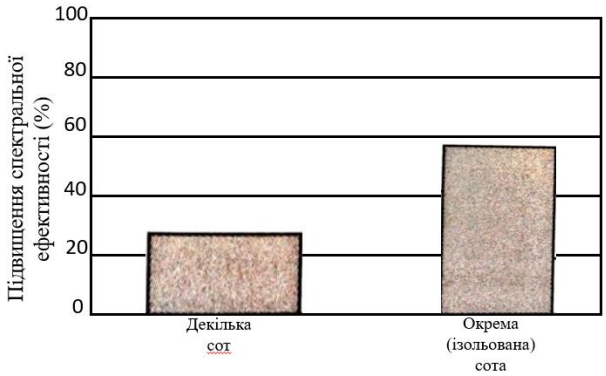


Рис. 1.15. – Підвищення спектральної ефективності з MIMO (2x2) порівняно з SIMO (1x2)

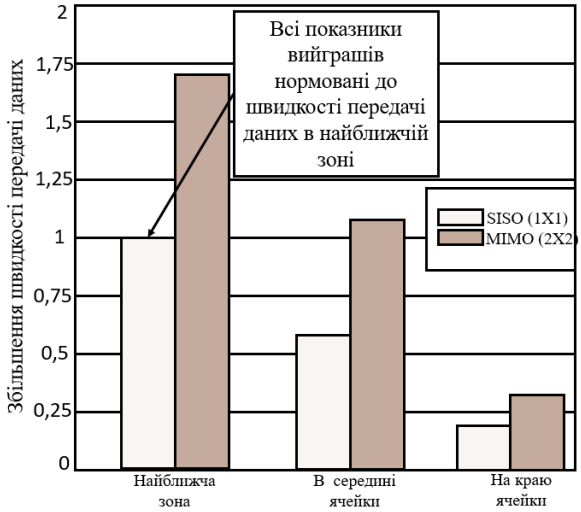


Рис. 1.16. – Збільшення швидкості передачі даних за допомогою MIMO (2x2) і SISO (1x1) в ізольованій комірці

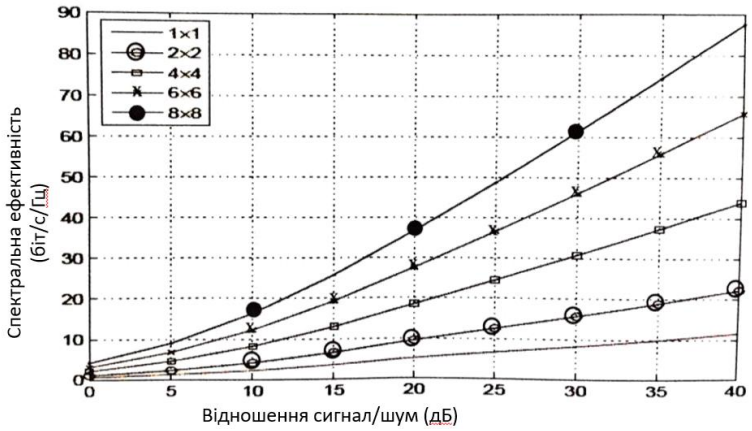


Рис. 1.17. – Залежність спектральної ефективності від співвідношення сигнал/шум для MIMO

Як показують наведені вище результати, ефективність MIMO, або просторового мультиплексування, значною мірою залежить від співвідношення сигнал/шум, яке дозволяє терміналу користувача розрізняти просторові канали та декодувати отримані дані. Таким чином, MIMO є більш ефективним для малих клітин. Серйозним недоліком просторового мультиплексування є погіршення якісних характеристик при відсутності відображень сигналу в радіоканалі. Це відбувається на відкритих територіях з розкиданими будівлями, вздовж автомагістралей, уздовж річок, а також коли антена базової станції розташована набагато вище рівня даху. У таких випадках ефективніше використовувати адаптивні антени з технологією формування променя.

1.5.4. Загальні вимоги до режиму розгортання для розгортання режимів LTE/MIMO

Загальні вимоги до реалізації розглянутих вище технологій як режимів MIMO та їх порівняльна характеристика наведені в таблиці 1.1.

У коментарях до таблиці можна відзначити дві ситуації.

По-перше, конфігурація антени та її відстань повинні бути адаптовані до конкретної технології. Дуже близьке розташування антен (зазвичай половина довжини переданої хвилі) відповідає технології адаптивного формування променя, одному з режимів MIMO LTE. Просторове розділене розташування антен або їх ортогональна поляризація відповідає MIMO, що означає просторове мультиплексування (SM).

По-друге, існують фундаментальні функціональні відмінності між режимами Beamforming і SM. Перший режим полягає в забезпеченні передачі та прийому в інтерактивному сенсі відновлюваних джерел енергії; Адаптивні алгоритми для цього працюють таким чином, що на цій RES створюється максимальна пелюстка, а не невдача («нуль») спроби RES в діаграма напрямку. Завдяки спрямованій передачі енергії технологія Beamforming забезпечує більший коефіцієнт посилення антени, ніж SM. Це відповідає прибутку у сфері послуг.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика режимів передачі даних у системі MIMO

Вимоги і показники	MIMO (просторове мультиплексування	Beamforming	Рознесена Передача/ отримання
Вимоги щодо взаємному рознесення антен	>10λ* (для діапазону частот 2,1 ГГц – від 1,5 до 2 метрів)	λ/4-λ/2	>10λ
Ступінь просторової кореляції	Низька (за рахунок застосування антен з ортогональною поляризацією та рознесення в просторі антен з збігається поляризацією)	Висока (на боці передавача через близьке розташування антен з однаковою поляризацією)	Низька (за рахунок рознесення антен у просторі та ортогональної поляризації)
Ефективність	Підвищення спектральної ефективності та пікової швидкості передачі в умовах перевідображення сигналу	Підвищення пропускної спроможності, покращення якості прийому на краю осередку	Поліпшення якості прийому на краю осередку (при малих відносинах сигнал/шум)
Недоліки	Зниження ефективності у стаціонарних каналах, ускладнення обладнання	Жорсткі вимоги до рознесення елементів антени	Низька ефективність по швидкості передачі даних

*λ – довжина хвилі сигналу, що передається

Експертні оцінки показують, що в порівнянні з традиційною системою просторової диверсифікації або мультиплексування,

Технологія формування променя може зменшити кількість базових станцій, необхідних у мережі, до 40%. Важливо, що енергетичне випромінювання, спрямоване на окремих абонентів, значно знижує рівень перешкод у сусідніх осередках мережі. Основним завданням антен MIMO є зменшення негативного ефекту багатопроменевого поширення в радіоканалі за рахунок рознесення (або спрямованості) сигналів передачі та прийому, а також збільшення максимальної швидкості передачі даних шляхом організації незалежних просторових каналів. .

Результати проведених досліджень свідчать про ефективність одночасного використання цих двох режимів у MIMO.

Інтеграція мобільних і супутникових систем забезпечує безперервний зв’язок у надзвичайних умовах, особливо у віддалених районах, де відсутня наземна інфраструктура. Супутники можуть використовуватись як резервні канали передачі даних або для розширення зони покриття. Стандарти, такі як DVB-S2X та 5G NTN (Non-Terrestrial Networks), дозволяють інтегрувати супутникові та мобільні системи, забезпечуючи високу швидкість і стабільність передачі даних. Гібридні мережі, які поєднують наземні мобільні станції та супутникові системи, забезпечують адаптивне керування трафіком. Наприклад, у разі втрати сигналу від базової станції дані можуть передаватись через супутник без втрати якості зв’язку.

Супутники можуть забезпечити зв’язок під час стихійних лих або техногенних аварій, коли наземна інфраструктура зруйнована. Це гарантує надійність комунікацій для рятувальних служб і постраждалого населення. Багато сучасних IoT-пристроїв здатні працювати як з мобільними, так і з супутниковими системами. Це дозволяє отримувати критично важливі дані (наприклад, про стан навколишнього середовища) навіть у найскладніших умовах. Використання адаптивного спрямування сигналу (beamforming) дозволяє супутникам концентрувати енергію сигналу на конкретних зонах або користувачах, що підвищує якість передачі даних та зменшує інтерференцію. Розподіл частотного спектра та інтеграція мобільних і супутникових систем є ключовими технологіями для забезпечення високої швидкості передачі даних у сучасних мобільних мережах.

Вони дозволяють ефективно використовувати ресурси мережі, адаптуватись до змінних умов та забезпечувати стабільний зв’язок навіть у надзвичайних ситуаціях. Це підвищує не лише продуктивність мережі, а й гарантує її надійність у критичних умовах.

РОЗДІЛ 2 КАНАЛИ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE. ПЕРЕШКОДИ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ ПОШИРЕННІ РАДІОСИГНАЛУ В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ

Покращення якості мобільного зв’язку в сучасних мережах є актуальною задачею, яка забезпечує стабільність, швидкість і надійність передачі даних. У контексті надзвичайних умов, такі методи стають особливо важливими, оскільки якісний зв’язок є ключовим для координації дій і оперативного реагування. Основні підходи, що використовуються для покращення мобільного зв’язку, мають свої переваги та недоліки. До основних методі покращення можна віднести:
використання багатошарових архітектур мережі (HetNet) -багатошарові мережі, що поєднують макро-, мікро-, піко- та фемтосоти, дозволяють збільшити пропускну здатність і зменшити перевантаження базових станцій. З переваг це зменшення інтерференції., покращення покриття у густонаселених районах та адаптація до зростаючого навантаження від користувачів. Також є і недоліки які впливають на високі витрати на розгортання додаткових вузлів а також необхідність складного управління ресурсами мережі.

Beamforming (формування спрямованого сигналу). Ця технологія дозволяє спрямовувати сигнал у бік користувача, зменшуючи втрати і підвищуючи ефективність передачі даних. Вона надає покращення якості сигналу,знижує інтерференції і ефективно використовує спектр. Але ця техннологія потребує складного апаратного забезпечення та може впливати на можливі затримки при обробці сигналів у реальному часі.

Використання ШІ для управління мережею дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів і виявляти потенційні проблеми у реальному часі. Автоматизація управління мережею, ефективне прогнозування перевантажень, покращення якості обслуговування користувачів. ШІ – потребує високу складність впровадження та необхідність великих обсягів даних для навчання систем.

Динамічні алгоритми для перенаправлення трафіку між різними сегментами мережі дозволяє уникати перевантажень – це гнучке управління трафіком, зниження затримок у мережі та підвищення загальної пропускної здатності.
Динамічні алгоритми це складність реалізації в умовах високої динаміки мережі а також вони мають можливість до втрат даних при несправності системи.

Існуючі методи покращення якості мобільного зв’язку є комплексними рішеннями, спрямованими на підвищення ефективності роботи мережі. Кожен підхід має свої переваги, що забезпечують стабільність зв’язку, та недоліки, які потребують вдосконалення або адаптації до конкретних умов. Розвиток технологій, таких як MIMO, beamforming, штучний інтелект та багатошарові архітектури, дозволяє значно покращити якість мобільного зв’язку, особливо в критичних ситуаціях. Успішне впровадження цих методів забезпечує стабільність і надійність мереж, що є життєво необхідним в умовах надзвичайних ситуацій.

Просторовий канал — це фізичне середовище, яке використовується для передачі сигналів від передавача до приймача. Незалежно від каналу, він завжди певною мірою спотворює передані символи: замість одного переданого символу на приймальну антену може потрапити багато символів, форми яких можуть відрізнятися один від одного і від оригіналу імпульсу. Канал також може створювати перешкоди. Тому характеристики каналів мають величезний вплив на якість передачі інформації і їх знання має велике значення при побудові систем зв'язку.

Стандарт LTE (Long-Term Evolution) є однією з найпоширеніших технологій мобільного зв’язку четвертого покоління, що забезпечує високу швидкість передачі даних, низьку затримку і оптимальне використання спектра. Канали зв’язку LTE поділяються на два основні типи: висхідного зв’язку (Uplink) та низхідного зв’язку (Downlink). Канали висхідного зв’язку забезпечують передачу даних від мобільного пристрою до базової станції, тоді як низхідний зв’язок передає інформацію від базової станції до пристрою користувача.

Для низхідного зв’язку LTE використовує технологію OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), яка забезпечує поділ частотного спектра на підканали, що дозволяє одночасно обслуговувати багатьох користувачів із мінімальною інтерференцією. Для висхідного зв’язку застосовується SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), що знижує енергоспоживання мобільних пристроїв і забезпечує ефективну передачу даних.

Канали LTE також поділяються на фізичні, логічні та транспортні. Фізичні канали здійснюють передачу даних безпосередньо через радіоінтерфейс. Основними фізичними каналами є PDSCH (для низхідного зв’язку), PUSCH (для висхідного зв’язку), PDCCH (канал управління) та PHICH (канал підтвердження повторної передачі). Логічні канали організовують трафік, зокрема розподіляючи сигнали між користувачами, а транспортні канали відповідають за взаємодію між фізичними і логічними рівнями.

Перешкоди, що виникають при поширенні радіосигналу в каналах зв’язку. Радіосигнал у каналах зв’язку LTE зазнає впливу численних перешкод, що можуть знижувати якість зв’язку, швидкість передачі даних та стабільність мережі.

Основні типи перешкод:

- Мультипутеве поширення (Multipath Propagation) - Сигнал досягає приймача кількома шляхами через відбиття від будівель, землі, інших об’єктів. Це призводить до:

Інтерференції між шляхами (Inter-Symbol Interference, ISI) — накладання сигналів, що викликає спотворення.

Затримки сигналу — різні траєкторії викликають різницю у часі прибуття сигналу до приймача.

- Згасання сигналу (Fading) можна віднести: релейне згасання — викликане взаємодією між відбитими сигналами а також згасання через перешкоди — зменшення амплітуди сигналу через поглинання будівлями, деревами тощо.

- Шум і інтерференція включає в себе:

Шум базових станцій та пристроїв, які працюють на близьких частотах.

Інтерференція між каналами (Co-Channel Interference, CCI) — виникає, коли кілька пристроїв використовують одну частотну смугу.

Інтерференція між сусідніми каналами (Adjacent Channel Interference, ACI) — перешкоди через "витік" сигналу у сусідні частоти.

Дифракція та затінення сигналу - коли сигнал проходить через об’єкти (гори, будівлі), виникають дифракція та затінення, що знижує потужність сигналу.

Швидкий рух абонентів - унаслідок ефекту Доплера частота сигналу змінюється, що впливає на якість зв’язку при високих швидкостях руху (наприклад, в автомобілях чи поїздах).

2.1. Модель багатопроменевого поширення

Визначення параметрів радіоканалу має принципове значення при розробці систем мобільного радіозв'язку. Характеристики каналу, спотворення і перешкоди, що виникають, а також допустима ширина спектру сигналу, що передається, визначають максимальну швидкість передачі даних при певному рівні надійності передачі інформації.

УВЧ-радіосигнали, які використовуються в системах мобільного стільникового зв'язку, досягають точки прийому численними шляхами (радіусами) різної довжини через численні відбиття від вхідних перешкод канали розподілу. Уявімо такий сигнал: $S_{ізл}(t)$

$$S_{ізл}(t) = Res_{ізл}(t),$$

аналітичний сигнал $S_{ізл}(t)$ має вигляд

$$S_{ізл}(t) = F_{ізл}(t)\, e^{j\omega 0t} \qquad (2.1)$$

М різної довжини, що відповідає сигналу, що досягає антени мобільної станції $S_{пр}(t)$, буде представлено таким чином: [22]

$$S_{пр}(t) = \sum_{k=1}^{M} S_{пр}^{(k)}(t) \qquad (2.2)$$

Кожен з аналітичних сигналів $S_{пр}^{(k)}(t)$ k-го приймального променя відповідає сумі N сигналів, що є результатом дифузії та відбиття в безпосередній близькості від мобільної станції. Тоді з урахуванням

$$S_{пр}^{(k)}(t) = \sum_{k=1}^{N} \alpha_{ki}\, F_{ізл}(t - \tau_{ki}) e^{j(\omega_0 | \omega_{\vartheta ki})(t-\tau_{ki})} \qquad (2.3)$$

де і – відповідно α_{ki} - ослаблення $\omega_{\vartheta ki}$ і-го сигналу в k-му промені та доплерівський зсув частоти .

Аналізуючи складні огинаючі отриманих сигналів, можна:

затримки сигналів, що досягають $\tau_{ki}(i = 1.\ldots.N)$ k-го променя приймача, майже рівні і дорівнюють середній затримці τ_{ki}.

Крім того, для реальних значень доплерівських зсувів частоти 100-200 Гц і максимальні значення в кілька мікросекунд. Його розміри не перевищують 1-2 градусів. Отже, згідно з (2.3) маємо приблизно [22]

$$S_{пр}^{(k)}(t) = F_{ізл}(t - \tau_k)e^{j\omega_0 t}\sum_{i=1}^{N}\alpha_{ki}\, e^{j\omega_0\tau_{ki}}e^{j\omega_0\tau_{ki}t},$$

З цієї причини

$$S_{пр}(t) = F_{пр}(t)e^{j\omega_0 t}, \qquad (2.4)$$

де комплексна обвідна прийнятого сигналу має вигляд:

$$F_{пр}(t) = \sum_{k=1}^{M} F_{пр}^{k}(t) = \sum_{k=1}^{M} P_k(t)F_{ізл}(t - \tau_k), \qquad (2.5)$$

і комплексні вагові коефіцієнти $P_k(t)$рівні

$$P_k(t) = \sum_{i=1}^{N}\alpha_{ki}\, e^{j\omega_0\tau_{ki}}e^{j\omega_0\tau_{ki}t} \qquad (2.6)$$

Як видно, модель аналізованого багатопроменевого радіоканалу може бути представлена у вигляді лінії затримки (ЛЗ) з відводами, що відповідає кожному з M променів прийому, зважуванням відповідно до коефіцієнтів $P_k(t)$і подальшого підсумовування (Рисунок 2.1).

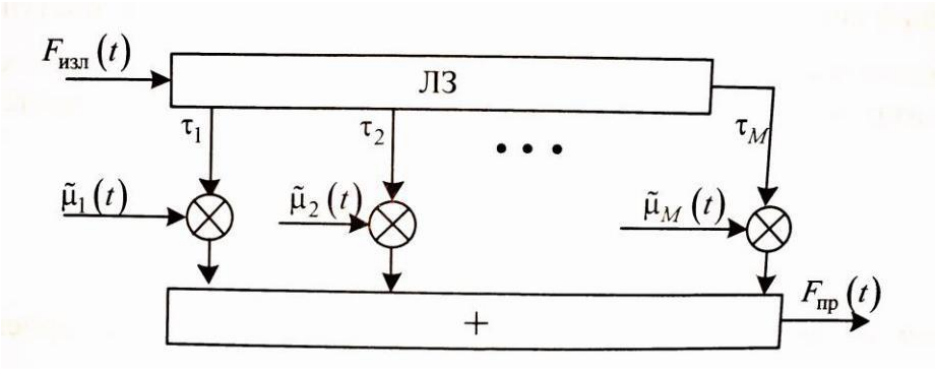


Рис. 2.1 – Модель багатопроменевого радіоканалу

Як від середніх значень затримок сигналу в різних приймальних променях, так і від значень параметрів α_{ki}, $\omega_{\vartheta ki}$, τ_{ki}і коефіцієнтів $P_k(t)$ залежять час, обумовлений переміщенням приймальної станції і пов'язаною з цим зміною морфоструктури поля в приймальній точці. Крім того, у зв'язку з випадковим розташуванням об'єктів, що викликають відображення і розсіювання сигналів, в

безпосередній близькості від точки прийому, всі згадані параметри виявляються випадковими величинами.

При досить великій кількості N розсіяних і відбитих сигналів, яка виникає при прийомі сигналів над дуже пересіченою місцевістю і в міських районах, згідно з моделлю Кларка [23], коефіцієнти $P_k(t)$ можна розглядати як випадкові процеси, дійсна та уявна частини яких статистично незалежні та розподілені за нормальним законом із математичним сподіванням, рівним нулю тотожні відмінності. Отже, коли його випромінює передавач нечастотно модульованих гармонійних коливань, сигнал, отриманий вздовж ω_nk-го променя згідно з моделлю Кларка, є вузькосмуговим процесом Гауса, огинаюча якого визначається законом Релея і рівномірно розподілена в інтервалі фаз (0, 2π).

Як показано в (2.3), процес $s_{\text{пп}}^{(k)}(t)$є сумою багатьох сигналів з різними Доплерівськими зсувами $\omega_{n..}$. Це призводить до розширення спектру прийнятого сигналу вздовж кожного k-го променя порівняно зі спектром переданого сигналу, який описується функцією δ в моделі Кларка. Як показує аналіз, відповідна Доплерівська спектральна густина потужності G(ω) становить:

$$G(\omega)=\frac{A}{\sqrt{\omega_{Dmax}^2-(\omega-\omega_0)^2}},\ |\omega-\omega_0|\le\omega_{Dmax} \qquad (2.7)$$

и G(ω)=0, $|\omega-\omega_0|>\omega_{Dmax}$значення A визначається середнім сила прийнятого сигналу і ω_{Dmax}максимальне значення доплерівського зсуву частоти.

2.2. Ослаблення радіосигналів під час розповсюдження

Одним із наслідків явища багатопроменевості, розглянутого вище, є збільшення ослаблення середнього рівня потужності сигналу зі збільшенням відстані від передавального пристрою порівняно з ослабленням у вільному просторі. У другому випадку, як відомо, середня потужність прийнятого сигналу обернено пропорційна квадрату цієї відстані, тоді як у системах мобільного зв'язку в залежно від умов поширення цей показник може досягати 3-5.

Неможливо отримати достатньо точні аналітичні оцінки величини втрат енергії при поширенні сигналу в різних умовах. Тому при проектуванні сучасних систем використовуються різні статистичні моделі цих втрат, отримані в результаті аналізу та узагальнення великої кількості експериментальних результатів.

Модель Окамура. Це одна з найпростіших і часто використовуваних моделей. Середня втрата потужності сигналу L при поширенні від базової станції на відстань R (км) оцінюється наступним чином (всі значення в децибелах):

$$L = L_0 + A(f_0, R) + G\left(h_{\text{БС}_{\text{эфф}}}\right) + G(h_{MC}), \qquad (2.8)$$

де – $L_0 = (\frac{\lambda_0}{4\pi R})^2$ втрати при поширенні коливань з довжиною хвилі в порожньому просторі; $A(f_0, R)$ - втрати в містах пов'язані з втратою вільного простору під час активації антени BS , а $h_{\text{БС}_{\text{еф}}} = 200$ м, висота антени MC .

Поправочний коефіцієнт $G\left(h_{\text{БС}_{\text{эфф}}}\right)$ $G(h_{MC})$ враховує відхилення значень h_{MC} L_0

$h_{\text{БС}_{\text{еф}}}$ (м) від 200 м і корегуючий коефіцієнт праховує відхилення величени (м) від значення 3м. Не включено для заданої частоти сигналу між 150 і 1920 МГц всі значення в (2.8) походять з графіків великої кількості

На жаль, модель Окамури піддається значним помилкам у сільській місцевості, особливо у випадку передачі великих часток.

Модель Окамура-Хата. Ця модель є модифікацією моделі Окамури, яка передбачає використання емпіричних співвідношень, що апроксимують емпіричні графіки Окамури. Тому в регіонах із типовою міською забудовою діапазон між 150 і 1500 МГц. Якщо ефективна висота антени BS становить від 30 до 200 м, $L_{\text{гар}}$ середня втрата потужності сигналу (в децибелах) оцінюється наступним чином:

$$L_{\text{гар}} = 66{,}55 + 26{,}16 \lg f_0 - 13{,}83 \lg h_{\text{БС}_{\text{эфф}}} - \alpha(h_{\text{МС}}) + \left(44{,}9 - 6{,}55 \lg h_{\text{БС}_{\text{эфф}}}\right) \lg R \qquad (2.9)$$

Коефіцієнт поправки $\alpha(h_{\text{МС}})$ залежить від висоти антени MC і розраховується за формулою в діапазоні від 1 до 10 м.

$$\alpha(h_{\text{МС}}) = (1{,}11 g f_0 - 0{,}7) h_{\text{МС}} - (1{,}5 \lg f_0 - 0{,}8). \qquad (2.10)$$

Звіт про збитки у великому місті

$$\alpha(h_{\text{МС}}) = 8{,}29(\lg 1{,}54h_{\text{МС}})^2 - 1{,}1 \text{ Для } f_0 \leq 400\text{МГц}, \quad (2.11)$$

$$\alpha(h_{\text{МС}}) = 3{,}2(\lg 11{,}75h_{\text{МС}})^2 - 4{,}97 \text{ Для } f_0 > 400\text{МГц}.$$

У приміських районах втрати описуються таким виразом:

$$L_{\text{пригор}} = L_{\text{гор}} - 2(\lg(\frac{f_0}{28}))^2 - 5{,}4, \quad (2.12)$$

На відкритій місцевості

$$L_{\text{откр}} = L_{\text{гор}} - 4{,}78(\lg f_0)^2 + 18{,}33l \lg f_0 - 40{,}94. \quad (2.13)$$

Описана вище модель задовільно описує середні втрати потужності на відстані понад 1 км і в діапазоні частот до 1,5 ГГц.

Виявляється, реальне загасання сигналу в діапазоні частот від 1,5 до 2 ГГц набагато вище, ніж спостерігається в цій моделі. Модель COST231-Error (Cooperative for Scientific and Technical Research, COST) і модель COST231-Walfesch-Ikeham були розроблені спеціально для цього частотного діапазону.

Моделі COST231-Hata і COST231-Walfisch-Ikegami. На відміну від моделі Окамури-Хата, загасання в цій моделі оцінюється за формулою, наведеною нижче.

$$L = 46{,}3 = 33{,}9 \lg f_0 - 13{,}82 \lg h_{\text{БС}} - \alpha(h_{\text{МС}}) + (44{,}9 - 6{,}55 \lg h_{\text{БС}}) \lg R + C. \quad (2.14)$$

Формула справедлива для висоти антени БС від 30 до 200 м, висоти антени МС від 1 до 10 м і відстані між БС і МС від 1 до 20 км для діапазону частот у цьому випадку від 1,5 до 2 ГГц, постійна С приймає значення С = 0 для приміських районів із помірною та середньою рослинністю. С = 3 для міст.

Якщо антена БС розташована на меншій висоті, ця формула можлива лише в тому випадку, якщо найближчі будівлі розташовані нижче розташування антени. Модель COST231-Walfisch-Ikegami звільнена від цих обмежень. У цій моделі загальна середня втрата потужності сигналу L представлена як сума трьох компонентів поширення у вільному просторі $L_{\text{св}}$, дифракційні втрати, напр. дисперсія $L_{\text{д}}$ і багаторазові дифракційні втрати на дахах будівель ряди будівель $L_{\text{мнп}}$

Розглянуті моделі не дозволяють врахувати специфічні умови місцевості, де розташована комунікаційна мережа (поверховість будинку, ширина дороги тощо). Ця специфіка дозволяє розглядати модель Ксія-Бертоні.

Модель Ксіа-Бертоні. Ця модель базується на рівняннях хвильової оптики та враховує різні механізми поширення радіохвиль у міському середовищі, а саме поширення у вільному просторі, дифракцію на краях дахів будівель та відбиття від стін будівель. Промені, що рухаються різними шляхами, заважають один одному в точці прийому, створюючи загальний сигнал.

Якщо антена БС розташована над середнім рівнем даху будівель (рис. 2.2), то на вході в МС сигнали випромінюються двома пучками: один виникає внаслідок дифракційного ефекту на краю даху будівлі, зокрема після відбиття від протилежної стіни будівлі.

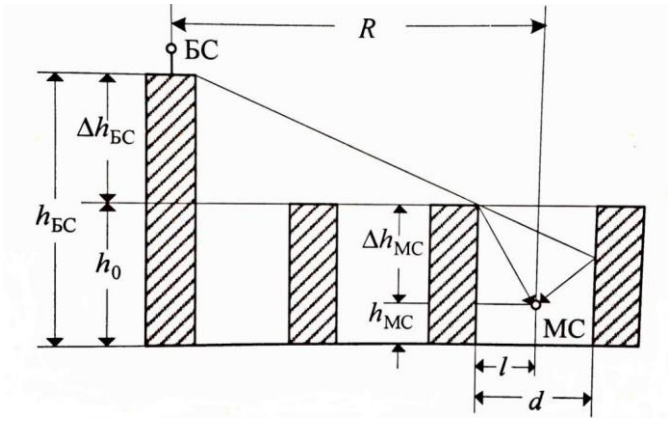


Рис. 2.2 – Інтерференція променів у точці прийому

Так, у місті з 4-поверховим будинком (висота землі бл. 3 м), частоти ослаблення сигналу $h_0 = 12$ м, $h_{МС} = 1{,}5$ м, $d = 30$ м (МГц) і дальності R (км) f_U можна знайти з формули

$$L = 38\lg - 18\lg(\Delta h_{БС}) + 21\lg f_U + 81.5 \qquad (2.15)$$

В передмісті з 2-поверховою забудовою при h_0 = 12м, $h_{МС}$ = 1,5 м, d=50м, затухання сигналу розраховується по формулі

$$L = 38\lg R - 18\lg(\Delta h_{БС}) + 21\lg f_U + 71.7 \qquad (2.16)$$

Аналіз останніх двох тверджень показує наступне:

- При збільшенні відстані між БС і МС в 10 разів середня потужність сигналу зменшується на 38 дБ;

- При збільшенні несучої частоти в 10 разів середня потужність сигналу зменшується на 21 дБ;

в Підняттям антени БС вище середнього рівня будівлі всередня сила сигналу в точці прийому збільшується на 5,4 дБ;

- Втрати енергії на дорозі будівель у передмісті приблизно на 10 дБ нижчі, ніж у місті.

Аналіз тверджень, які відповідають моделі Ксія-Бертона, показує, що: навіть якщо висота антени MS подвоїться в межах $h_{MC} < 3$м втрата енергії зменшується приблизно на 3дБ, а в межах $h_{MC} > 3$м – на 6 дБ.

Модель Ксіа-Бертоні також дає можливість оцінити середній рівень втрат у випадках, коли антена БС розміщується на рівні даху або навіть нижче рівня даху (ці прийоми використовуються, коли необхідно «підсвітити» обмежену локальну територію). Незважаючи на те, що модель не враховує низку важливих параметрів (тип будівельного матеріалу, орієнтація вулиці тощо), вона дозволяє простим і корисним способом отримати попередні оцінки середнього рівня втрат у каналі зв’язку. .

2.3. Вплив земної поверхні на поширення сигналу в каналі зв'язку

Бездротова передача сигналу здійснюється за допомогою радіохвиль, що випромінюються в космос антенами. Такі антени називають передавальними. Радіохвилі поширюються в просторі в усіх напрямках. Хвиля, яка зустрічає приймальну антену, збуджується.

Він містить струм високої частоти, зафіксований приймальним пристроєм. Оскільки амплітуда хвилі при поширенні з різних причин слабшає, струм в приймальній антені може бути дуже малим. У багатьох книгах розглядається найпростіший приклад передачі сигналу за допомогою радіохвиль у вільному просторі; Це простий приклад, який не враховує багато інших факторів, що впливають на передачу сигналу в бездротових каналах зв'язку [25]. В основному ми будемо мати справу з явищем багатопроменевого (або багатопроменевого) поширення сигналу. Це явище виникає при передачі сигналу в міському середовищі, посилаючи його через іоносферу або тропосферу.

Давайте спочатку розглянемо двонаправлене поширення гармонічного сигналу. Така ситуація виникає, коли передавальна і приймальна антени підняті над землею і розділені на досить велику відстань. Відповідна діаграма передачі сигналу показана на малюнку 2.3, де видно, що два сигнали надходять до точки прийому двома різними шляхами : прямий сигнал долає відстань R0, а відбитий від земної поверхні сигнал долає відстань ($R1 + R2$) .

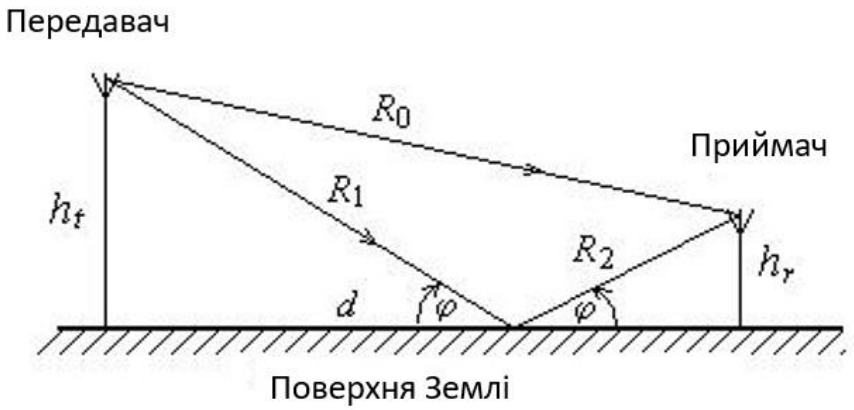


Рис. 2.3 - Двопроменевий канал зв'язку

Вважаємо, що коефіцієнт відбиття Френеля від землі дорівнює -1.

Це стосується будь-якої хвилі поляризації, якщо кут відводу φ достатньо малий.

Ми припускаємо, що амплітуди прямого і відбитого сигналів рівні, але насправді амплітуда відбитого сигналу завжди трохи менша, з одного боку, тому що відстань (R1+R2) більша за відстань R_0, а з іншого боку, тим менша відстань (R1+R2) . відстані кут φ є результатом поглинання землею частини енергії потужної хвилі, то ця гіпотеза точніша. Єдине, на що потрібно звернути увагу, це те, що фаза відбитого від землі сигналу змінюється в залежності від фази прямого сигналу.

Отже, суму прямого і відбитого сигналів можна виразити так:

$$s(t) = s_0(t)\left[1 - \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\right)\right], \qquad (2.17)$$

де $\Delta = [(R_1 + R_2) - R_0]$ – різниця ходу променя.

Інтенсивність прийнятого сигналу $P_г = |s(t)|$ можна написати

$$P_r = P_0\left|1 - \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\right)\right|^2 = 4P_0\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda}\Delta\right), \quad (2.18)$$

де $P_0 = |s_0(t)|^2$ – потужність сигналу, спрямованого на вхід програми.

Величина різниці шляху Δ визначається як функція відстані d і висоти h_t і hr передаючої та приймальної антен. Відповідно до рисунка 2.1

Визначити це не складно

$$R_0 = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}, \qquad R_1 + R_2 = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2}. \quad (2.19)$$

Перетворюючи (2.3), отримуємо такі вирази

$$R_0 = d\sqrt{1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{d^2}}, \qquad R_1 + R_2 = d\sqrt{1 + \frac{(h_t + h_r)^2}{d^2}}. \quad (2.20)$$

$d^2 >> (\text{години}_t + \text{години}_r)^2$. Це дозволяє спростити формулу (2.4) і отримати такі наближені рівняння:

$$R_0 \approx d\left(1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{2d^2}\right), \qquad R_1 + R_2 \approx d\left(1 + \frac{(h_t + h_r)^2}{2d^2}\right). \quad (2.21)$$

З (2.5) дізнаємося, що різниця ходу дорівнює:

$$\Delta = (R_1 + R_2) - R_0 \approx \frac{(h_t + h_r)^2 - (h_t - h_r)^2}{2d} = \frac{2h_t h_r}{d}. \quad (2.22)$$

Це дозволяє представити (2.2) у такому вигляді:

$$P_r = 4P_0\sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_t h_r}{d}\right). \quad (2.23)$$

P_0 залежить від параметрів системи за рівнянням:

$$P_r = \frac{P_t G_t S_r}{4\pi d^2} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}, \quad (2.24)$$

Рівняння (2.24) отримано для вільного простору. Використовуючи (2.24), перетворимо (223) у

$$P_r = 4P_tG_tG_r\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_th_r}{d}\right) \quad (2.25)$$

Можна констатувати, що у випадку двопроменевої моделі каналу інтенсивність прийнятого сигналу складним чином залежить від параметрів системи та відстані d між приймальною та передавальною антенами. Більш конкретно, існує множник, який часто називають множником затухання на землі.

$$g = \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_th_r}{d}\right), \quad (2.26)$$

функція g як функція відстані d показана на рисунку 2.4 для λ = 0,33 м (f = 900 МГц), h_t = 20 м, h_r = 2 м.

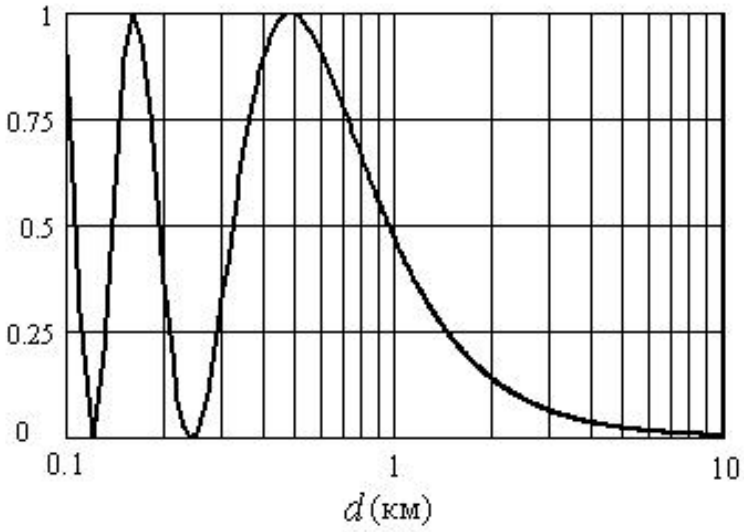


Рис. 2.4 – Земельний множник g(d)

В g(d) можна розділити на дві зони. Одна з них - це зона інтерференції прямого і відбитого сигналів, де інтенсивність прийнятого сигналу є періодичною, інша - зона регулярного ослаблення сигналу, де інтенсивність сигналу постійно зменшується з відстанню. Вважається, що межею між цими зонами є відстань, на якій у разі руху спостерігатиметься перший максимум функції g(d) напрямок зменшення відстані d. Коли ця умова виконується

$$\frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_t h_r}{d} = \frac{\pi}{2}.$$

(2.27)

З цього ми бачимо, що межа між цими зонами може бути визначена таким виразом:

$$d_{\text{гр}} = \frac{4h_t h_r}{\lambda}.$$

(2.28)

інтервал d_{gr} лінійно залежить від частоти. Коли відстань до приймача набагато більша за відстань dgr,

Аргумент синуса стає набагато меншим за одиницю, і наближене рівняння $\sin x \approx x$ вірне . У цій області коефіцієнт ослаблення ґрунту (2.10) можна записати простіше.

$$g \approx \left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_t h_r}{d}\right)^2.$$

(2.29)

Тепер цілком можливо спростити формулу (2.3.9). Отже, бачимо, що потужність на вході приймача дорівнює:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2}\right)^2.$$

(2.30)

Важливий висновок, який можна зробити з (2.30), полягає в тому, що сила прийнятого сигналу зменшується з відстанню обернено пропорційно четвертому ступені ($Pr \sim d^{-4)}$. Це значно сильніше залежить від ослаблення сигналу, ніж у ситуації вільного поля, де потужність прийнятого сигналу зменшується з відстанню обернено пропорційно другій потужності. Оскільки йому дали владу сигнал пропорційний квадрату напруженості електричного поля на приймальній антені, тому напруженість поля зменшується з відстанню і обернено пропорційна другій силі. Ця модель ослаблення поля була вперше створена академіком Введенським і називається формулою квадрата Введенського.

Формула (2.30) дає ще один важливий результат. Це означає, що потужність прийнятого сигналу у формулі Веденського не залежить від несучої частоти.

В області, де коефіцієнт ослаблення ґрунту є періодичним і спостерігаються мінімуми та максимуми. Коли прямі та відбиті від землі сигнали додаються в протифазі, потужність отриманого сигналу є мінімальною. Максимальна потужність спостерігається, коли ці сигнали складаються в фазі. Якщо абонент поміщається в мінімальний простір, підключення може погіршитися або значно погіршитися. Під час руху абонента рівень сигналу на вході приймача може періодично змінюватися, тобто спостерігатися ослаблення або ослаблення сигналу.

Умови передачі сигналу, описані вище, спрощуються, тому що земля вважається гладкою рівною поверхнею.

Насправді на поверхні Землі є пагорби, долини та рослинність. У містах багато будівель різної висоти. Все це сприяє більш складним умовам поширення сигналу. Такі явища, як відбивання хвиль і дифракція, спричиняють потрапляння кількох сигналів до точки прийому. Це явище називається багатопроменевим поширенням сигналу.

У таких випадках потужність прийнятого сигналу оцінюється статистичними методами, оскільки детермінованими методами неможливо детально врахувати всі фактори, що впливають на рівень сигналу. Крім того, проводиться багато експериментальних досліджень для вимірювання потужності сигналу в міських і сільських районах. Такі експерименти дозволяють моделювати бездротові канали зв'язку. Ці моделі засвідчені спеціальними документами (стандартами), завдяки яким розробники систем зв'язку можуть використовувати єдині дані.

Подібна модель міських умов була вперше розроблена в Японії в 1968 році на основі вимірювань Окумари. Ця модель була розроблена в 1980 році Hata [24]. Ослаблення середнього рівня сигналу, що відповідає моделі Окумари-Хата, порівняно з рівнем, який спостерігався б у вільному просторі, показано на малюнку 2.5. Наведені дані відповідають вертикальній поляризації та висоті передавальної та приймальної антен: $h_t = 100$ м і $h_r = 3$ м.

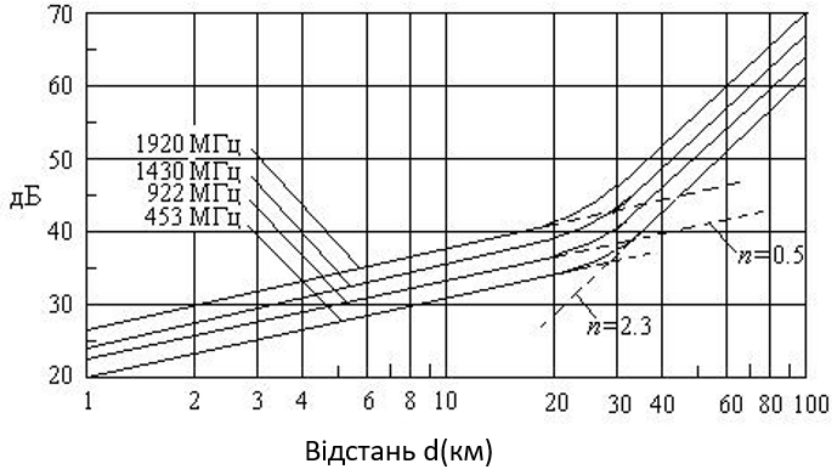


Рис. 2.5 – Загасання сигналу відповідно до моделі Окумари – Хата

Як правило, моделі бездротових каналів зв'язку враховують залежність потужності прийнятого сигналу від відстані в межах модуля.

Відповідно до моделі Окумари-Хата, є дві області з різними моделями ослаблення сигналу. Перша зона простягається на 10-15 км. Для n = 0,5 у (2.31) це α = 3. Друга зона простягається від 15-20 км до 100 км і більше. При цьому α = 6,6, що означає, що зі збільшенням відстані спостерігається досить швидке ослаблення інтенсивності сигналу.

Якість інформації, яку отримує абонент, залежить не тільки від рівня потужності сигналу на вході приймача. Потужність прийнятого сигналу слід порівнювати із середнім шумом і потужністю перешкод на вході приймача. Якщо перешкод немає, ймовірність помилки в переданій інформації залежить від значення SNR.

Нормовану потужність природного шуму на вході приймача можна записати:

$$P_{noise} = N_{noise} k_B T_0 W \qquad (2.31)$$

де N_{noise}- коефіцієнт шуму, що характеризує якість приймача (коефіцієнт шуму);

$k_B = 1{,}38 \cdot 10{-}23$ Вт/Гц/градус – стала Больцмана;

T_0 - температура навколишнього середовища, виражена в градусах Кельвіна (зазвичай стандартна температура $T_0 = 290$ градусів),

W - смуга пропускання приймача.

Аналізуючи це твердження, можна зробити висновок, що збільшити радіус дії системи зв'язку за рахунок збільшення потужності передавача важко. Наприклад, подвоєння потужності передавача призведе лише до збільшення діапазону в 1,19 рази; на 19%. Більш ефективне рішення полягає у збільшенні висоти передавальної та/або приймальної антени. Тому рекомендується піднімати антени базових станцій (БС) на висоту 20-30 метрів і більше над землею. Крім того, якщо мобільний абонент знаходиться на краю стільника і йому важко підключитися через слабкий сигнал, рекомендується знайти місце вище землі. Цікаво, що дальність зв'язку не залежить від несучої частоти.

РОЗДІЛ 3 Покращення продуктивності каналу зв’язку для стандарту LTE

3.1. Розробка математичної моделі каналу для LTE

Статистика каналу MIMO. Канали радіозв'язку цих систем зазнають складних перешкод і спотворень. Перш за все, необхідно враховувати ефект багатопроменевості, викликаний наявністю відображень на шляху поширення радіохвилі. У діапазоні коротких довжин хвиль багато відображень спричинені нерегулярностями в іоносфері. У УКВ (дециметровому) діапазоні хвиль впливають на відбиття від будівель, нерівності місцевості (при організації зв'язку на відкритих майданчиках), відбиття від стін і конструкцій (при спілкуванні всередині будівель).

Основна ідея технології MIMO показана на малюнку 3.1. Передавальна частина системи складається з N передавачів з передавальними антенами , а приймальна частина включає N r приймачів і приймальних антен. Вважається, що ослаблення викликане розсіюючим середовищем H під час поширення радіосигналу. Стрілки на малюнку показують, що сигнал від будь-якого передавача може потрапити на вхід будь-якого ослабленого приймача.

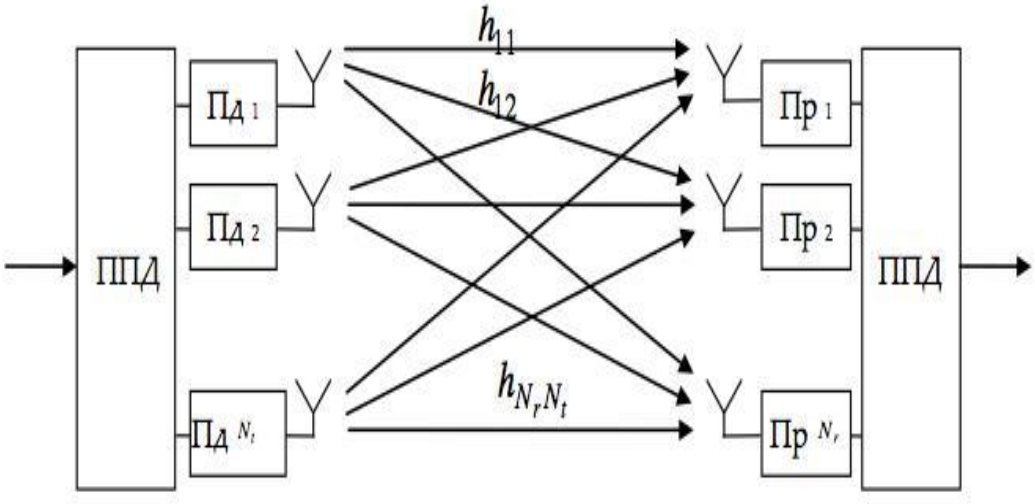


Рис. 3.1 – Блок-схема MIMO

Матриця посилення каналу

$$H = \begin{Vmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2N_T} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \dots & h_{3N_T} \\ . & . & . & \dots & . \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & h_{N_R2} & \dots & h_{N_R N_T} \end{Vmatrix}$$

Це ключова функція MIMO. Аналіз систем ПВК di н базується на апріорній гіпотезі, що цей канал є квазістаціонарним. Частина монографії [3] присвячена аналізу статистичних властивостей багатошляхових каналів мобільного зв'язку; Тут ми бачимо, що зниження відношення сигнал/шум в діапазоні 1-2 ГГц відбувається через завмирання сигналу. Це описується моделлю Релея.

Слід також зазначити, що кожен фактор h_{ij} у матриці каналу (1) може складатися з більш ніж одного променя (рисунок 3.2).

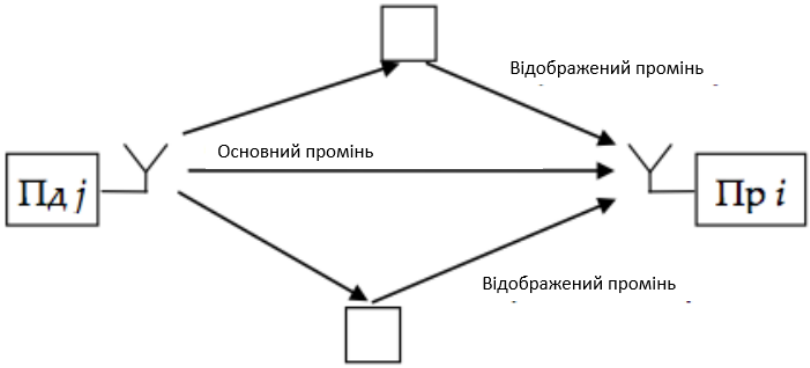


Рис. 3.2. – Модель розповсюдження багатопроменевого радіосигналу

Крім того, коефіцієнти передачі не є незалежними. Це пояснюється тим, що приймальна антенна система має специфічну конфігурацію. Для цього розгляньте прийом сигналу через N-елементну антенну решітку (AR).

Прийом гармонійного сигналу з плоским хвильовим фронтом**.** Припустимо, що елементи NAR розташовані вздовж осі x наступним чином.

Це показано на малюнку 3.3.

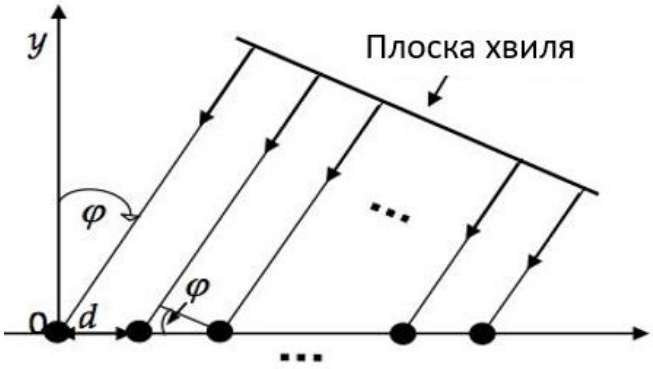


Рис. 3.3. - Геометрія еквідистантних лінійних елементів ANR і плоскої падаючої хвилі.

Початкова точка вибирається в позиції крайнього лівого елемента. Відстань між елементами позначається літерою d. Припустимо монохроматична плоска хвиля одиничної амплітуди досягає RA під кутом φ відносно осі y. Хвиля викликає гармонійні електричні коливання в кожному елементі системи, t = 0. Це початок зворотного відліку, фаза коливань дорівнює 0 у першому елементі системи.

Отже, виконавши серію перетворень, ми отримаємо сигнал, який описує коливання всіх елементів АР і рівномірно описує всі ці сигнали, а якщо додати вектор комплексних амплітуд S і вектор сигналу s (t) , то отримуємо

$$\vec{s}(t) = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ . \\ . \\ s_N(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ . \\ . \\ S_N \end{pmatrix} \exp(j\omega_0 t) = \vec{S} \exp(j\omega_0 t)$$

, (3.1)

де j — уявна одиниця, $\omega_0 = 2\pi f_0$ — циклічна частота, а f_0 — частота коливань, виражена в герцах.

Розробка математичної моделі каналу MIMO. Поширеною моделлю радіоканалу є модель багатопроменевого поширення. Основні моделі, які визначають багатошляховий канал, є випадково структурованими моделями каналів. Модель багатопроменевого каналу чітко представлена як дискретна багатопроменева модель каналу.

Антенний елемент R_{th} можна представити так:

$$z_r(t) = \sum_{l=1}^{L}\sum_{n=1}^{N}[h_{cln}u_x(t-(n-1)T-\tau_l) + h_{sln}u_x(t-(n-1)T-\tau_l) + \xi(t)], (0 < t < \infty),$$

(3.2)

де h_{cln} , h_{sln} – відповідні випадкові фазова та квадратична складові коефіцієнта пропускання в l-му промені n-го елемента передавальної антени, L – загальна кількість променів у каналі , τ_l – час затримки сигналу в l-му промені , ux – відомі застосування прийому сигналу, x (0,1,..., M=1) – порядок інформаційних символів, M – кількість позицій маніпуляції, T – тривалість елементів сигналу, що передається, ξ сумарний випадковий шум типу BGN.Будемо вважати, що довжина шляху

поширення сигналу зазвичай у кілька разів перевищує довжину хвилі несучого радіосигналу. Це ігнорує конфігурацію системи передавальної антени. Тому можна припустити, що всі сигнали передаються з однієї точки простору. Крім того, враховуючи лінійність моделі (3) і конфігурацію приймальної антенної решітки, можна показати на малюнку комплексний коефіцієнт передачі матриці H між r-ою приймальною антеною і n-ю передавальною антеною.

Дана модель дозволяє врахувати конфігурацію приймально-антенної системи, багатопроменевість і координати розташування перешкод на шляху поширення сигналу у вигляді кутів приходу головного і відбитого променів.

Тому була розроблена математична модель каналу для технології MIMO з урахуванням структурних особливостей приймальної антени та напряму приходу сигналів уздовж основного та відбитого променів. Розроблена модель канальної системи дозволить оптимізувати багатопроменеву структуру та конфігурацію системи приймальної антени.

3.2. Методи боротьби з перешкодами в радіоканалі. Методи рознесення в LTE

Зниження рівня сигналу, пов'язане з ослабленням електромагнітних хвиль під час розповсюдження в умовах прямої видимості, можна компенсувати прямим збільшенням потужності переданого сигналу. У той же час компенсація втрат енергії через загасання та спотворення, викликані ефектами багатопроменевого поширення, вимагає інших технічних рішень. Одним із методів, який зараз використовується для досягнення цієї компенсації, є визнання різноманітності . Основні види сортового споживання наступні:

- просторовий (просторова різноманітність);
- частота (частотне рознесення);
- скроневий (скроневий різновид);
- мультитрековість (різноманітність треків);
- поляризація (поляризаційне різноманіття).

Просторове рознесення досягається відповідною обробкою сигналів, отриманих щонайменше від двох просторово розділених антен. У цьому випадку відстань між антенами має становити принаймні половину довжини хвилі прийнятих коливань, щоб гарантувати, що ослаблення сигналу в різних гілках диверсифікації не корелюється. Цей метод прийому зазвичай використовується на базових станціях і відноситься до методів рознесення приймача (рис. 3.4) [25]. При цьому ідея просторової диверсифікації також може бути реалізована за допомогою методу рознесення передавача (рис. 3.5) [25], коли базова станція БС передає сигнал одночасно через дві просторово розділені антени.

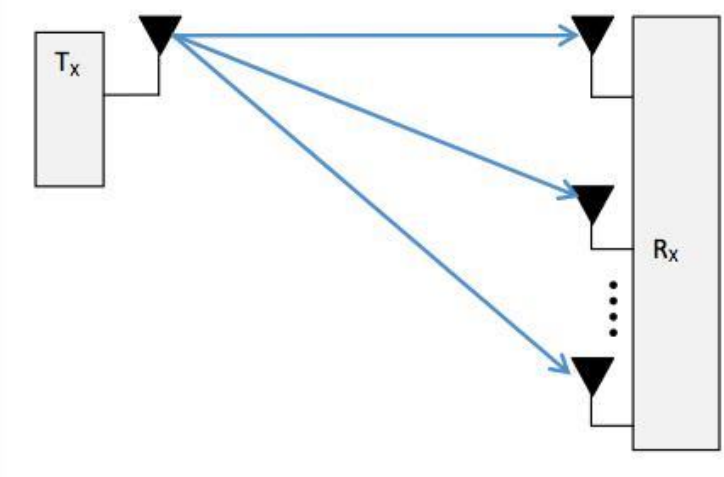


Рис. 3.4. – Структура рознесення прийому

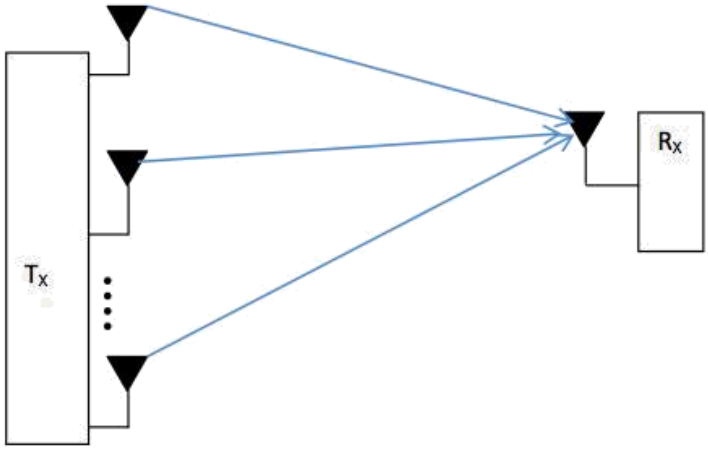


Рис. 3.5. – Структура диверсифікації дистрибуції

Обробка сигналу просторового рознесення виконується одним із трьох методів:

- автоматичний вибір сигналу з найбільшим співвідношенням сигнал/шум

(Комбінований підбір);

- оптимальна зважена сума сигналів (Maximum Ratio Pooling), коли сигнали з різних рознесених гілок вирівнюються по фазі, зважуються за їхніми рівнями та додаються;

- Об’єднання рівного підсилення передбачає додавання прогресивних сигналів без урахування різниці рівнів. Частотне рознесення відноситься до методів передачі та диверсифікації

Це передбачає паралельну передачу тих самих сигналів на різних частотах, і величина різниці частот повинна гарантувати, що отримані сигнали не будуть корелювати між різними гілками рознесеності.

Тимчасова рознесеність, яка також називається технікою рознесення через трансляцію, бореться зі швидким завмиранням шляхом багаторазового повторення телевізійних сигналів з інтервалами часу, довшими за період завмирання. Цей тип варіації також включає метод з використанням автоматичного запиту на повторну передачу блоку символів (автоматичний запит на повторення, ARQ).

Багатошляхове рознесення, з точки зору методів рознесення прийому, складається з оптимально зваженої суми результатів обробки вхідних сигналів уздовж багатьох променів розповсюдження. Виявляється, що це можливо за допомогою широкосмугових сигналів, час автокореляційної функції яких не перевищує затримки між сигналами від сусідніх приймальних променів.

Можна використовувати різні типи рознесення (наприклад, поляризаційне, кутове тощо), а також комбінації різних типів.

Крім того, у наступному розділі будуть застосовані розглянуті методи обробки збурень у Matlab.

3.3 Кореляція в системі MISO

Завадостійкість в системах MISO може бути досягнута шляхом підвищення спектральної ефективності. Підвищення спектральної ефективності може залежати від багатьох інших факторів: середньої потужності прийнятого сигналу, теплового шуму приймача, міжканальних перешкод і завмирання. Потім розрахувати

Стійкість системи до перешкод повинна враховувати просторову кореляційну картину, яка впливає на характеристики переданого сигналу.

Просторово-часова кореляційна модель передачі каналом зв’язку – це математична модель, яка дає змогу описати характеристики поширення сигналу в просторі з урахуванням ефекту просторової кореляції та крос-кореляції сигналів, закодованих за допомогою просторово-часових кодів. . Завдяки кореляційній моделі передачі каналу можна оцінити коефіцієнт ймовірності помилки для цифрової системи зв'язку з характеристиками, максимально наближеними до реальних систем радіозв'язку.

Кореляційна модель оцінюється на основі припущення, що кореляція між приймальними антенами не залежить від кореляції між передавальними антенами. Тобто ми припускаємо, що лише антени, розташовані близько одна до одної, впливають одна на одну і не впливають на кореляцію між антенами на іншому кінці радіолінії. Це припущення враховує різні умови розповсюдження сигналу, такі як щільно структуровані умови [10].

Для каналу MIMO з плоским завмиранням просторова кореляція згідно з [13] визначається виразом:

$$RH = E[vec(H)vec(H)H], \qquad (3.3)$$

де vec(H) — вектор розмірності $N_r \times N_t$, що складається зі стовпців матриці H; $№_r$ – кількість приймальних антен; Nt – кількість передавальних антен; H – Матриця відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму в розмірах Nr × Nt.

Коефіцієнт кореляції сигналів на двох сусідніх антенах . За типових умов поширення сигналу радіохвилі досягають приймача з певним відхиленням по азимуту. Цей багатопроменевий розподіл потужності визначається функцією p(θ); де θ – азимутальний кут. Дуже важливим параметром поширення сигналу, який визначає коефіцієнт дисперсії, є кутова дисперсія Λ, яка виражається формулою [.

$$\Lambda = \sqrt{1 - \frac{|F_1|^2}{|F_0|^2}}, \qquad F_n = \int_0^{2\pi} p(\theta)\exp(jn\theta)d\theta \ , \tag{3.4}$$

де Fn - n-й комплексний коефіцієнт Фур'є функції p(θ) . Кутовий розподіл Λ приймає значення від 0 до 1; де 0 означає промінь, отриманий в одному напрямку, а 1 означає рівномірний розподіл потужності в усіх напрямках прийому.

Визначення кутової дисперсії Λ має важливе практичне значення, оскільки воно безпосередньо пов’язане з ослабленням сигналу в локальній області [9]. Середньоквадратичне значення швидкості зміни ослаблення R в каналі Релея пов’язане з кутовим розподілом за формулою:

$$E\left\{\left(\frac{dR}{dd}\right)^2\right\} = \frac{k\ \Lambda^2}{4} E\{R^2\}, \tag{3.5}$$

де k - хвильове число; d – відстань; $E\{R^2\}$ – середньоквадратичний коефіцієнт загасання в локальній зоні. Ця формула дозволяє зробити висновок про швидкість розпаду зменшується, коли сигнал зосереджений в одному напрямку.

Квазіортогональна просторово-часова кореляція код .Ступінь кореляції між переданими сигналами залежить від ступеня поділу між переданими кодовими словами (носіями сигналу). Найменша кореляція сигналу досягається за допомогою методів ортогональної передачі. За визначенням, ортогональні сигнали – це сигнали, які змінюються незалежно та мають нульову кореляцію.

Ортогональність коду досягається за допомогою техніки кодування Alamouti з використанням 2 передавальних антен. ON: Інші передавальні антени використовують інші ортогональні коди. і з затримкою. Ортогональність досягається зниженням швидкості коду.

Оцінка ймовірності помилки для окремих випадків. Для системи MISO з n передавальними антенами для кожного каналу передачі Релея із завмиранням розраховується модель кореляції каналу для кожної антени, беручи до уваги

просторову кореляцію між r TX антенами та враховуючи неортогональність STBC будь-якого просторово-часовий код (rSTBC).

А Автори також оцінили ймовірність помилки для окремих конкретних випадків; Потім вони розглянули модель каналу для 2, 4 і 8 антен і створили наступні графіки.

Імовірність помилки для антенної системи 2 становить:

$$p_{\text{ош2}} = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{1+r_{\text{TX}}}{2r_{\text{TX}}}\sqrt{\frac{(1+r_{\text{TX}})h_{\text{S}}^2}{(1+r_{\text{TX}})h_{\text{S}}^2+4}} + \frac{1-r_{\text{TX}}}{2r_{\text{TX}}}\sqrt{\frac{(1-r_{\text{TX}})h_{\text{S}}^2}{(1-r_{\text{TX}})h_{\text{S}}^2+4}}\right]. \quad (3.6)$$

Функціональні графіки, створені за формулою (3.3.1) (показані пунктирною лінією на малюнку 3.6), показують, що існує значне погіршення стійкості до перешкод зі збільшенням просторової кореляції для системи MISO з двома передавальними антенами. Отже, з імовірністю помилки 10-2, для системи з коефіцієнтом просторової кореляції $r_{TX} = 1$, є втрата 2 дБ у відношенні сигнал/шум порівняно з системою з коефіцієнтом просторової кореляції. кореляція $r_{TX} = 0{,}5$. Для тієї ж імовірності помилки зменшення коефіцієнта просторової кореляції з $r_{TX} = 0{,}5$ до $r_{TX} = 0$ призводить до втрати лише 0,1 дБ у відношенні сигнал/шум.

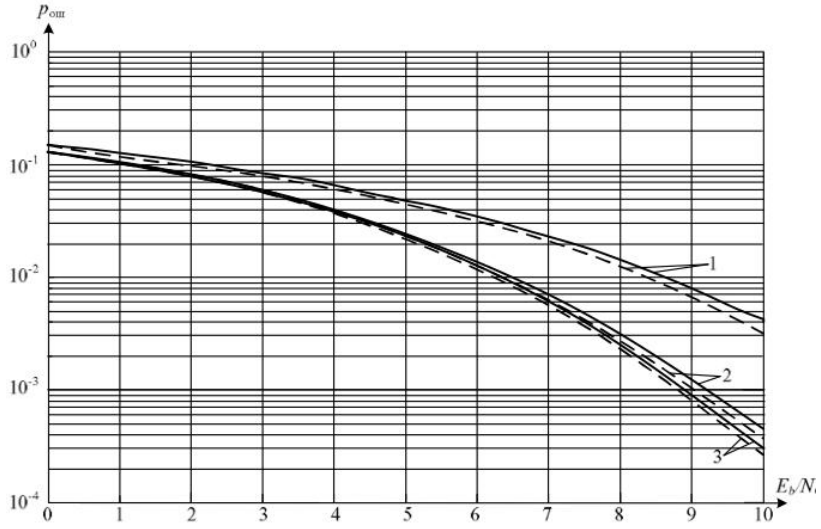


Рис. 3.6. - Залежнітьс вірогідності помилки Eb /N0 для 2-антенної системи MISO з кодом Alamouti та модуляцією BPSK просторові коефіцієнти кореляції r TX = 1 (крива 1); 0,5 (крива 2); 0 (3 криві)

Для системи з 4 антенами (Рисунок 3.7):

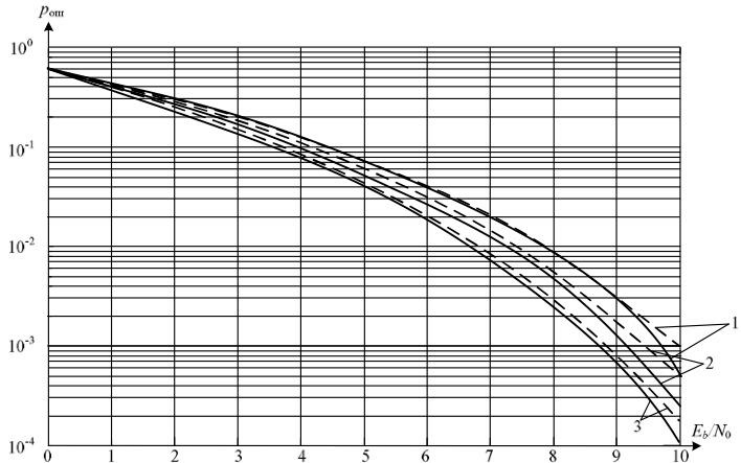


Рис. 3.6. - Залежнітьс вірогідності помилки E b / N 0 для 4-антенної системи MISO з квазіортогональним кодуванням коефіцієнтів просторова кореляція r TX = 1 (криві 1); 0,5 (крива 2); 0 (криві 3) та кодовий коефіцієнт кореляції r STBC = 0,5

На відміну від системи MISO з двома передавальними антенами, тут просторова кореляція має значний вплив лише на сусідні антени. У цьому випадку просторово-часове кодування зменшує втрати відношення сигнал/шум системи r TX = 1 порівняно з системою або $T_X = 1$ за рахунок більш ефективного розділення детектованого і обробленого векторів сигналу в сигналі між антенами. Система з r $T_X = 0{,}5$ Від 2 дБ у системі з двома антенами до 0,5 дБ у системі з чотирма антенами з імовірністю помилки 10-2.

Для систем з 8 або більше антенами (Рисунок 3.8):

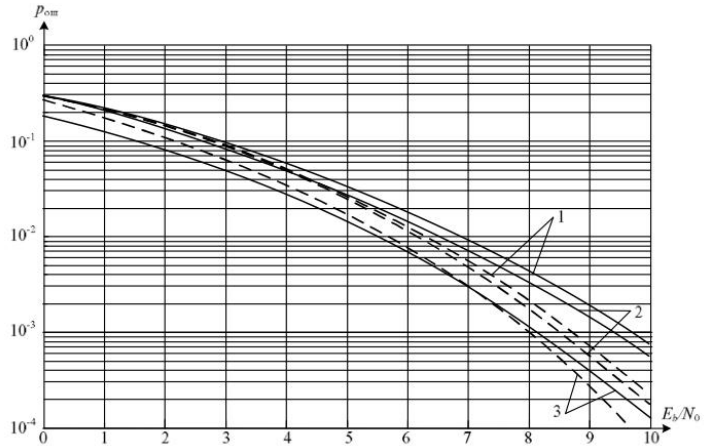


Рис. 3. 8. - E_b/N_0 для 8-антенної системи MISO з квазіортогональним кодуванням коефіцієнтів просторова кореляція $r_{TX} = 1$ (криві 1); 0,5 (крива 2); 0 (криві 3) та кодовий коефіцієнт кореляції $r_{STBC} = 0,5$

З 8 передавальними антенами ефект просторової кореляції можна ще більше зменшити (порівняно з системами з 2 і 4 антенами) завдяки великій кількості антен і, відповідно, більш ефективному розподілу векторів сигналу між антенами, які одночасно виявляються та обробляються. Таким чином, графіки завадостійкості системи з $r_{TX = 1}$ і $r_{TX = 0,5}$ відрізняються на 0,1 дБ з імовірністю помилки $10^{-2.}$ цей результат припускає, що збільшення кількості антен у системі MISO з використанням майже ортогонального кодування є ефективним методом боротьби з просторовою кореляцією.

Отримано універсальну модель кореляції каналів для будь-якого каналу передачі для системи MISO з N передавальними антенами втрати за Релеєм, розраховані для кожної антени Ні $_{2Просторова кореляція}$ rTX між антенами , а також неортогональність (rSTBC) можливого просторово-часового коду STBC. На основі отриманої матриці аналітично визначено вирази ймовірності помилки для 2, 4 та 8 антенних систем .

3.4 Доплерівський зсув

Доплерівський зсув для кожного шляху сигналу зазвичай різний. Вплив на прийнятий сигнал зазвичай проявляється доплерівським розширенням частоти переданого сигналу, а не зсувом. Зверніть увагу, що доплерівське розширення fd і час когерентності T_0 обернено пропорційні (в межах постійного коефіцієнта) ; Це дозволяє записати наступне приблизне співвідношення між цими двома параметрами.

$$T_0 = \frac{1}{f_d} \qquad (3.7)$$

Тому доплерівське розширення fd (або 1/ T0) приймається як нормальна швидкість затухання в каналі. Раніше T0 визначався як часовий інтервал, протягом якого відгук каналу на синусоїду повинен залишатися суттєво незмінним . Якщо ми визначимо T0 точніше як часовий інтервал, у якому відгуки каналу на синусоїди мають кореляцію щонайменше 0,5, співвідношення між T і fd буде приблизно таким .

$$T_0 = \frac{9}{16\pi f_d} \tag{3.8}$$

T_0 середнім геометричним рівнянь (3.7) і (3.4.2). Це призводить до наступного

$$T_0 = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_d^2}} = \frac{0{,}423}{f_d} \tag{3.9}$$

На малюнку 3.9 показано типовий вплив загасання Релея на огинаючу амплітуди сигналу для мобільного радіозв'язку в діапазоні 900 МГц. це залежить від погоди. На малюнку видно, що відстань, пройдена мобільним пристроєм в інтервалі часу, що відповідає двом сусіднім нулям (дрібномасштабне завмирання), λдорівнює половині довжини хвилі (λ/2). Тому на рисунку 3.9 показано час, необхідний для цього відстань λ(приблизно дорівнює часу когерентності) буде наступним

$$T_0 = \frac{\lambda/2}{V} = \frac{0{,}5}{f_d} \tag{3.10}$$



Рис. 3.9. – Типовий профіль огинаючої для демпфування Релея на 900 МГц.

Отже, відстань між періодами загасання приблизно дорівнює, вираз $\lambda/2$ T0, отриманий у рівнянні (3.10), близький до середнього геометричного, наведеного в рівнянні (3.9). З рівняння (3.10), використовуючи параметри, представлені на рисунку 3.9 (швидкість - 120 км/год, несуча частота - 900 МГц), отримуємо, що час когерентності каналу становить приблизно 5 мс, а доплерівське розширення (швидкість загасання каналу) - приблизно 100 Гц. Тому, якщо цей приклад показує, що канал передає цифрову мову з типовою швидкістю 10^4 символ/с, швидкість завмирання. згасання відбувається набагато повільніше, ніж швидкість символу. За цих умов на каналі буде видно ефекти повільного затухання. Варто згадати апсиду на малюнку 2. Коли 3.8 відкалібровано в одиницях довжини хвилі, а не в одиницях часу, відображені характеристики ослаблення будуть однаковими для будь-якої радіочастоти та n будь-якої швидкості антени.

В області доплерівського зсуву розглядаються категорії погіршення продуктивності через нестаціонарний характер каналу.

Ts (приблизно дорівнює швидкості сигналу) або ширина смуги частот W) менше , ніж коефіцієнт екстинкції

1/ T0 (приблизно дорівнює fd), тобто швидкий розпад характеризується наступними співвідношеннями

$$W<fd \qquad (3.11)$$

або

$$T > T0 \qquad (3.12)$$

І навпаки, якщо швидкість передачі сигналу перевищує швидкість завмирання, канал завмирає повільно. Таким чином, щоб уникнути погіршення сигналу, спричиненого швидким завмиранням, необхідно створити канал, який буде повільно завмирати, що досягається завдяки швидкості передачі сигналу, вищій за швидкість завмирання.

$$W > fd \qquad (3.13)$$

або

$$T_S < T_0 \qquad (3.14)$$

Смуга пропускання когерентності f0 встановлює верхню межу швидкості передачі сигналу, при якій частотно-селективні спотворення не виникають. Подібним чином рівняння (3.13) показує, що швидкість завмирання каналу f_d, що є результатом доплерівської дисперсії, визначає нижню межу швидкості передачі сигналу, при якій не виникають спотворення зі швидким завмиранням . У високочастотних системах зв'язку, якщо телетайп або повідомлення азбукою Морзе передається з низькою швидкістю, канали часто демонструють характеристики швидкого завмирання. При цьому більшість сучасних наземних мобільних радіоканалів найчастіше можна охарактеризувати як канали з завмиранням.

Рівнянь (3.13) і (3.14) недостатньо для опису бажаної поведінки каналу. Найкращий спосіб визначити вимоги, яких слід уникати

Це може бути швидке згасання $W >> f_d$(або $T_s << T_0$). Якщо ця умова не виконується, випадкова частотна модуляція (FM), викликана різними доплерівськими зсувами, значно погіршить продуктивність системи. Ефект Доплера часто викликає критичні помилки, які неможливо компенсувати простий ріст E_b / N_0. Часта поява цих критичних помилок особливо помітна в будь-якій схемі передачі з використанням фазової модуляції несучої. Окремий відбитий доплерівський тракт (без елементів розсіювання) записує миттєві дані

розраховується наступним чином $f_d = V/\lambda$: Яка комбінація Рефлекторна і багатопроменева складові призводять до досить складної тимчасової залежності миттєвої частоти Флуктуації частоти, які значно перевищують час, коли інформація відтворюється детектором миттєвої частоти (який є нелінійним пристроєм) На малюнку 3.10 показано, як це відбувається. Внаслідок руху мобільного пристрою в момент часу $\pm V/\lambda$t1 відбитий вектор повертається на кут θ, а повний вектор повертається під кутом ϕприблизно в чотири рази більшим θ. Швидкість зміни фази поблизу певного періоду ослаблення приблизно дорівнює швидкості зміни фази відбитого доплера, помноженій на 4 частота $d\phi/dt$ буде в 4 рази більше відбитого доплерівського зсуву. Створення гострих піків миттєвих змін частоти в моменти, близькі до різкого спаду, схоже на появу характерного «тикання» або «сплеску» в FM-сигналі. Рисунок 3.11 показує серйозність цієї проблеми. На малюнку показаний частотний графік

Поява однорозрядних помилок E_b/N_0при передачі сигналу з модуляцією DQPSK на частоті $\pi/4$ f0 = 850 МГц для різних імітованих швидкостей портативного пристрою [39]. Має бути очевидно, що на високих швидкостях крива продуктивності падає до рівнів помилок, які можуть бути неприйнятно високими. В ідеалі когерентний демодулятор, який фіксує та відстежує інформаційний сигнал, усуває вплив такого шуму частотної модуляції і таким чином усуває ефекти доплерівського зсуву. Однак для високих значень fd відновлення несучої важко здійснити, оскільки схеми фазової автопідстроювання частоти (PLL) повинні бути створені з дуже високою пропускною здатністю (порівняно зі швидкістю передачі даних). Для додатків голосового зв'язку з частотою помилок від 10^{-3} до 10^{-4} розглядається високе значення Доплера.

Тому, щоб уникнути спотворень, викликаних швидким завмиранням і частим виникненням критичних помилок, викликаних ефектом Доплера , швидкість передачі сигналу повинна перевищувати ×коефіцієнт завмирання 100-100 в -100-100 Вт [22]. Точне значення залежить від типу модуляції сигналу, конструкції приймача та необхідного рівня помилки. Даваріан показав, що система

відстеження швидкості за допомогою диференціального кодування з мінімальним зсувом (DMSK) може зменшити (але не усунути) виникнення фатальних помилок у системах мобільного зв'язку.

Може спричинити коливання частоти понад $\pm v/\lambda$.

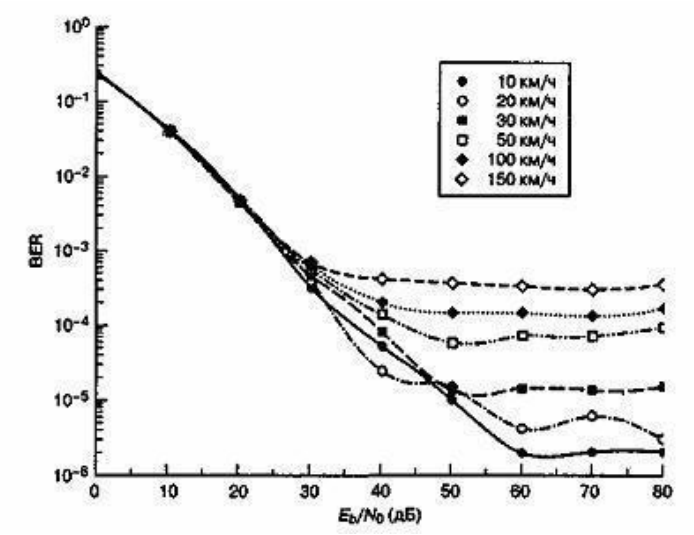


Рис. 3.10 – Імовірнісна залежність частоти помилок

Для E_b/N_0 схеми $\pi/4$ DQPSK при різних швидкостях руху: fc = 850 МГц, Rs = 24×10^3 символ/с

РОЗДІЛ 4 Застосування методів боротьби із загасанням і завмиранням сигналу в каналі спілкування

4.1. Канальні моделі з ослабленням

Багатопроменевість затухання в каналі виникає через те, що сигнал відскакує на своєму шляху, розсіюється, уникає перешкод, а потім досягає приймача з деякою затримкою. Ці канали є відносно швидкими і тому відповідають за короткочасні сигнали. Існують різні моделі, що описують статистичну поведінку багатопроменевого каналу в залежності від природи середовища поширення радіохвиль. Канали Релея та Райса є найбільш часто використовуваними статистичними моделями для представлення маломасштабного затухання.

Канал Релея Розподіл Релея є найбільш часто використовуваним розподілом для опису результуючого розподілу значень огинаючої. Модель завмирання каналу Релея передбачає, що всі компоненти прийнятого сигналу відбиваються або розсіюються, тобто переданий сигнал не йде по прямому шляху від передавача до приймача (рис. 4.1).

Розподіл Релея зазвичай використовується для опису отриманого сигналу або окремого багатопроменевого елемента, властивості якого змінюються з часом. У багатопроменевому каналі Рейля збуджується певна амплітуда, яка підкоряється закону поширення Рейля.

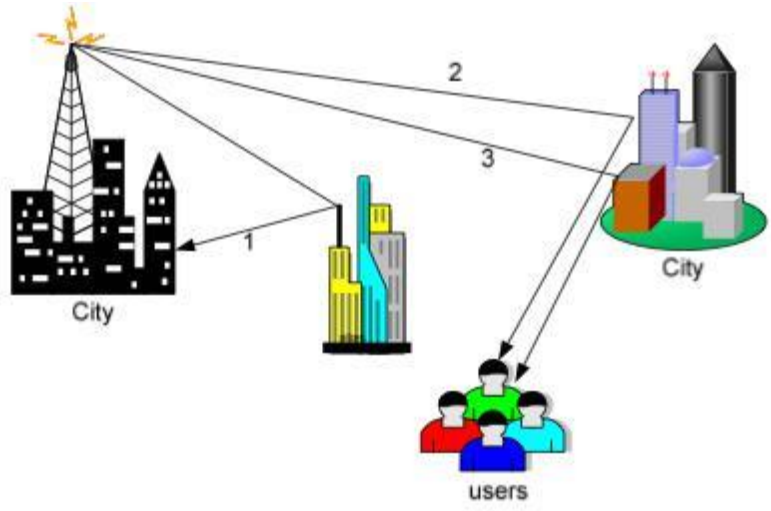


Рис. 4.1. – Канал Релея

Коли імпульсна характеристика каналу моделюється за допомогою процесу Гауса, сигнал завжди підкоряється закону Релева. Розподіл Релея для прийнятих відбитих сигналів має вигляд z(t)= x(t)

$$p_z(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)} \qquad (x \geq 0) \tag{4.1}$$

де $E\{x^2\} = 2\sigma^2$ $x \geq 0$, (4.2)

де σ - ефективне значення середньоквадратичної напруги игналу;

σ^2 – середнє значення потужності прийнятого сигналу.

Ми знаємо, що огинаюча, що складається із суми двох гаусових шумових сигналів, описується розподілом Релея. Цей розподіл можна пояснити наступним чином:

- представляє найгірший тип каналу, оскільки ми не можемо взяти до уваги лінію прямої видимості (LOS);

- викликаний гаусовим шумом із доплерівським зсувом;

- сила сигналу експоненціально розподілена.

Це найпоширеніша модель сигналу в бездротовій системі.

Райсовий канал. на клітинному рівні, крім сигналів, відбитих між передавачем і приймачем, існує також домінуючий сигнал прямої видимості (LOS)

При цьому відбитий сигнал послаблюється і накладається на сигнал, що проходить уздовж прямої видимості. Амплітуда результуючого сигналу відповідає розподілу Райса, причому співвідношення прямої видимості відбитого сигналу вказується коефіцієнтом Райса K. Доплерівський зсув із загасанням Райса, розподіл Гауса та лінія прямої видимості ' ТХ антена до приймальної антени . Латунний канал показаний на малюнку 4.2.

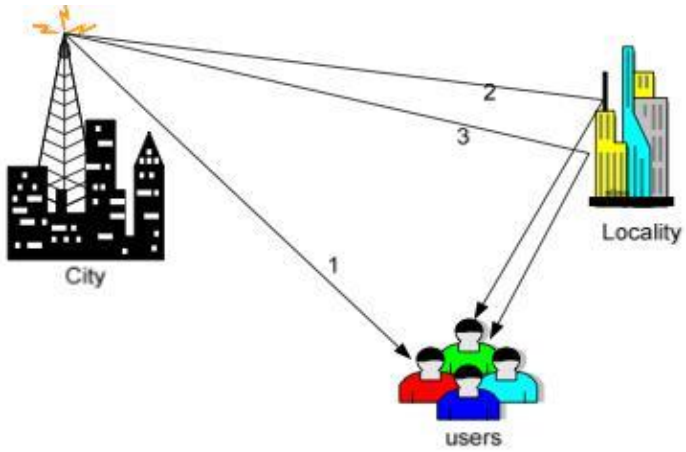


Рис. 4.2 – Райсовий канал

Прямий тракт 1 між антенами значно збільшує напруженість поля на приймальній стороні. На цю траєкторію може впливати тільки ефект Доплера. Окрім проходження сигналу через лінію видимості, до точки прийому потрапляють і відбиті сигнали. На виході детектора струм додається до багатопроменевого каналу зв'язку. Ефект прямого виявлення відбитих сигналів спонукав до використання розподілу рису. Коли прямий сигнал ослаблений, відбитий сигнал нагадує шум відповідно до розподілу Релея. Таким чином, канал Райса стає каналом Релея, як тільки втрачається сигнал прямої видимості.

Імпульсна характеристика каналу буде дорівнювати нулю, коли:
в каналі є постійні відбивачі та розподільники сигналу. Цей канал називають рисовим. У випадку багатопроменевого каналу з відбитими сигналами та прямою видимістю результуючий сигнал на вході приймача описується розподілом Райса.

$$p_z(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+A^2)}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ax}{\sigma^2}\right) & \text{for } (A \geq 0, x \geq 0) \\ 0 & \text{for } (x < 0) \end{cases} \quad (4.3)$$

де A – максимальна амплітуда прямого сигналу

I_0 – нульовий порядок функції Бесселя першого роду

Розсіювання Райса зазвичай визначається параметром K, який є коефіцієнтом Райса, що відповідає відношенню між потужністю сигналу прямої видимості та потужністю відбитого сигналу.

4.2 Розробка імітаційної моделі каналу для експериментальної оцінки продуктивності каналу

Щоб застосувати методи вирішення різних проблем, які виникають під час проходження сигналу через канал радіозв’язку, першим кроком є створення моделі каналу (рис. 4.3). У цьому дослідженні для моделювання цього каналу використовувалася мова програмування Matlab.

Тому необхідно провести дослідження з аналізом впливу наступних характеристик на поведінку багатопроменевого каналу: доплерівський зсув, відображення, ослаблення сигналу, затримки. Наслідком поставленої мети буде ймовірність виникнення помилок.

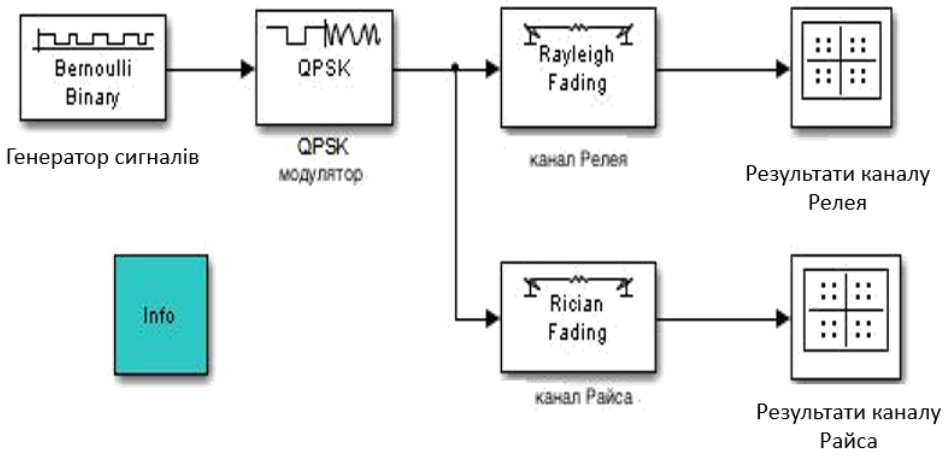


Рис. 4.3 .– Модель багатопроменевого каналу Релея і Райса

Тому на змодельованих каналах Релея та Райса (рис. 4.3) ми зробимо деякі спостереження щодо залежності BER (ймовірність помилки) від Es/No (сигнал до), що є однією з важливих характеристик багатошляхового каналу зв'язку - зміна параметрів, таких як коефіцієнт шуму), швидкість передачі, кількість антен і каналів і для каналу Райса - К фактору. Проходження сигналу через канал генерується за алгоритмом, запрограмованим у Matlab.

Розрахована характеристика BER розраховується за такою формулою:

$$P_{b_{DBPSK}} = \frac{1}{2}\exp(-\frac{E_b}{N_0}) \quad (4,4)$$

Для створення моделей каналів у середовищі Matlab використовуйте наступні функції: awgn – для адитивного гаусового каналу, ricianchan і rayleighchan – для каналів Райса та Релея відповідно.

Канал Райса характеризується наступним набором додаткових параметрів: загасання, частота доплерівського зсуву, коефіцієнт потужності Райса і загасання в променях. Канал Релея має ті ж ефекти, що й канал Райса, але різниця між цими каналами полягає в тому, що немає прямого променя від передавача до приймача.

Ефект Доплера виникає при відносному русі приймача на передавач або коли об'єкти рухаються на шляху сигналу. Оскільки розглянутий стандарт призначений для передачі сигналу в закритих приміщеннях, частота доплерівського зсуву f в

каналі Райса може бути встановлена на $_{d = 11 Гц;}$ Це відповідає швидкості прийому 5 км/год на несучій частоті 2,4 ГГц.

Значення загасання і затримки при поширенні сигналу в багатопроменевих каналах взяті з точніше з моделі B - відкритий простір або великий офіс, відсутність прямої видимості, ефективна затримка 100 нс.

Початкові налаштування:

Для латунного каналу:

fd = 11 Гц ; Дитячий садок=20;

τi =[0 $_{10}$ 20 30 40] (нс); α_i =[0 -5,4 -10,8 -16,2 -21,7] (дБ)

Для ланцюга Релея:

fd = 11 Гц ;

τi =[10 20 30 40] (нс) ; α_i =[-5,4 -10,8 -16,2 -21,7] (дБ)

N (кількість переданої інформації) = 50 000 біт

P (потужність сигналу) = 1 Вт.

Перешкодостійкість каналів Релея та Райса при зміні швидкості передачі та K-фактора Райса**.** Ці результати демонструють стійкість сигналу до шуму в багатопроменевих каналах для великих внутрішніх і зовнішніх приміщень. Доплерівська частота в діапазоні 120 Гц не має великого впливу на продуктивність BER. Різниця в характеристиках каналів Райса і Релея (рис. 4.4 і рис. 4.5) пов'язана з відсутністю в каналі Релея прямого променя від передавача до приймача.

Характеристики шумостійкості як функція K-фактора (Райсового коефіцієнта) для каналу Райса: (рисунок 4.6). З цієї властивості видно, що ця властивість покращується зі збільшенням відношення основної потужності до потужності відбитих променів. При K = 0 немає прямих променів, приймаються тільки відбиті промені, що відповідає характеристикам каналу Релея.

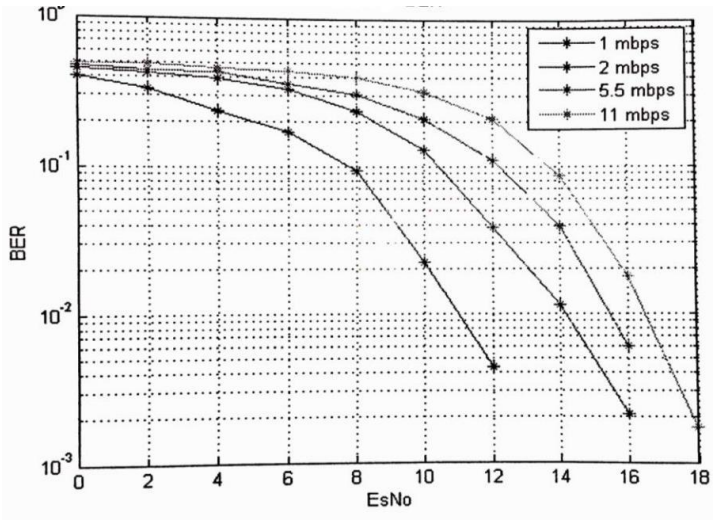


Рис. 4.4 – Характеристики завадостійкості канала Райса

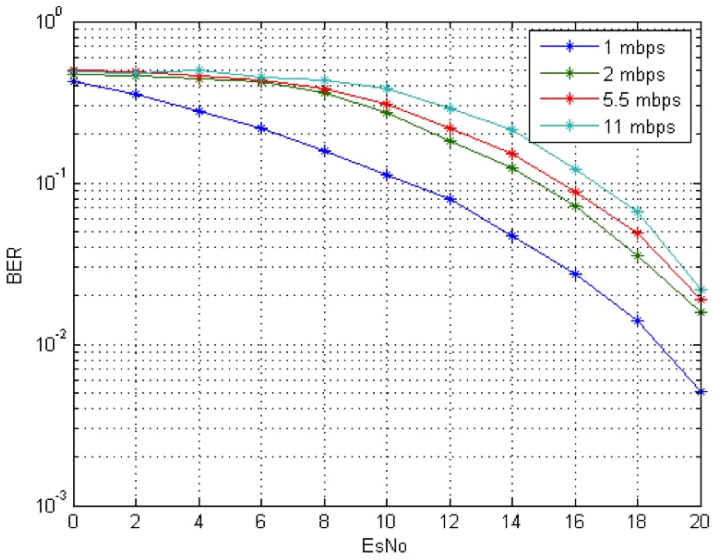


Рис. 4.5 – Характеристики завадостійкості для каналу Релея

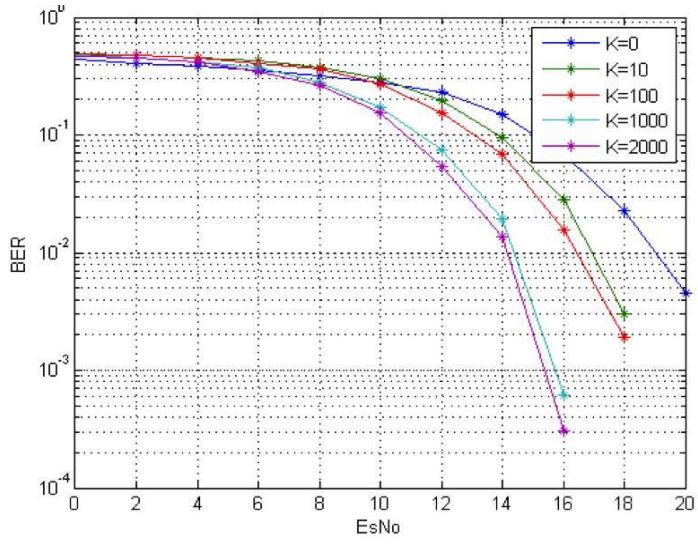


Рис. 4.6. – Залежність характеристик BER від K-фактора в каналі Райса

Моделювання каналу Relew. Далі ми оцінимо стійкість каналів до перешкод при зміні кількості антен і введенні різних перешкод . Результати моделювання представлені на малюнках 4.6 і 4.7 для різних значень M (кількість антен) і L = 6, L = 18 (кількість перешкод в каналі) .

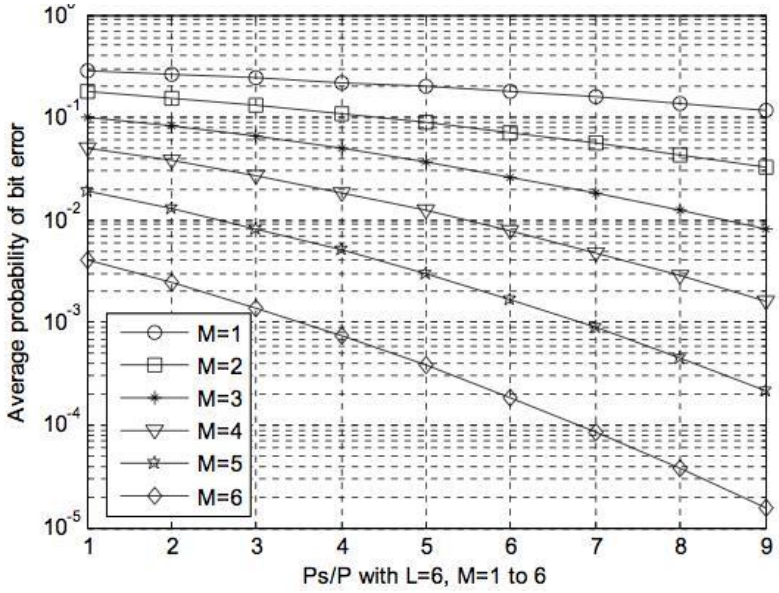


Рис. 4.7. – Пропускна здатність каналу Релея для M=6, L=6

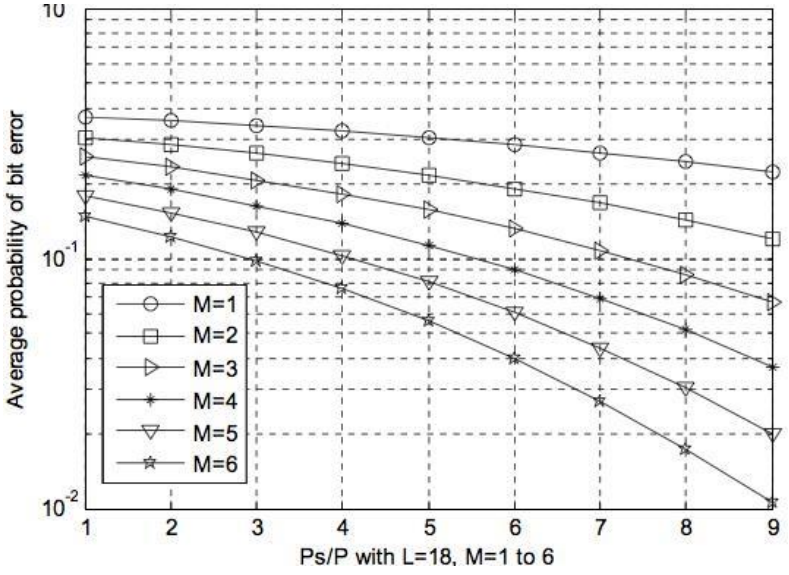


Рисунок 4.8 – Пропускна здатність каналу Релея для M=6, L=18

На рисунку 4.7 показана комбінована зона затухання Релея. Також проілюстровано вплив зміни кількості елементів антени під впливом 6-канальних перешкод на відношення сигнал/шум. Зі збільшенням кількості антен ймовірність помилки зменшується ця подія підвищує продуктивність системи . На малюнку 4.8 показано те саме зображення, що й на малюнку 4.7, тільки для L = 18-канальних перешкод.

В таблиці 4.1 і 4.2 містять розрахунки ймовірності помилки для відношення сигнал/шум 5 дБ.

Таблиця 4.1

Розрахунок BER для каналу Релея з L=6 і SNR=5 дБ

Серійний номер	Кількість антен, M	BER при L=6, SNR=5 дБ
1	M=1	0,1986
2	M=2	0,0893
3	M=3	0,0365
4	M=4	0,0122
5	M=5	0,0030
6	M=6	0,0004

Таблиця 4.2

Розрахунок BER для каналу Релея з L=18 і SNR=5 дБ

Серійний номер	Кількість антен, M	BER при L=18, SNR=5 дБ
1	M=1	0,3038
2	M=2	0,2151
3	M=3	0,1559
4	M=4	0,1127
5	M=5	0,0803
6	M=6	0,0560

З таблиць 4.1 і 4.2 можна зробити висновок, що зі збільшенням кількості антенних елементів, з 6 і 18 променями перешкод відповідно при SNR = 5 дБ, BER зменшується, що призводить до збільшення характеристик антени.

Тепер ми вставимо результати розрахунку SNR для заданого BER при L = 6 і L = 18 у таблиці 4.3 і 4.4 відповідно.

Таблиця 4.3.

Відношення сигнал/шум для каналу Релея при L=6, BER<10^{-1}

Серійний номер	Кількість антен,	SNR при L=6, BER<10^{-1}
1	M=2	1 дБ
2	M=3	2 дБ
3	M=4	4 дБ

Таблиця 4.4.

Відношення сигнал/шум для каналу Релея при L=6, BER<10^{-1}

Серійний номер	Кількість антен, M	SNR при L=18, BER<10^{-1}
1	M=3	7 дБ
2	M=5	4 дБ
3	M=6	3 дБ

З 4.3 можна зробити висновок, що для L = 6, BER ≤ 10-1 система з 4 антен є більш вигідною, оскільки відношення сигнал/шум максимальне яка потребує на 1 дБ менше енергії, ніж система (4 дБ) b Вимагає менше енергії, ніж система з 3 антенами .

Модуляція Райсовского канала. Так само аналізуємо ефективність каналу Riso (рис. 4.9 і рис. 4.10).

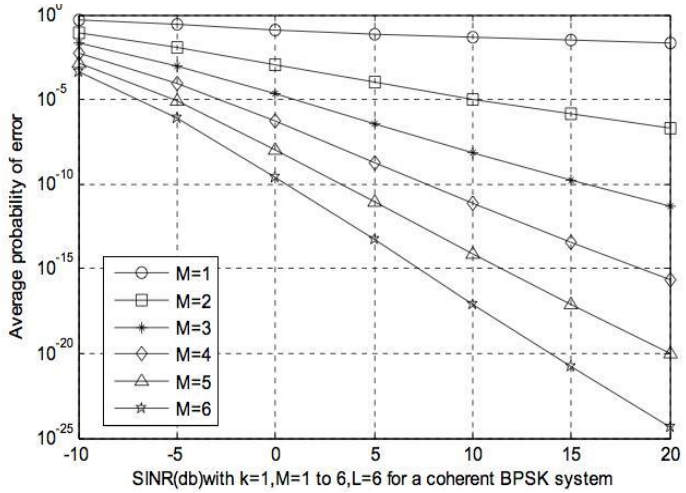


Рис. 4.9 – Ємність латунного каналу з M=1-6, L=6, k=1

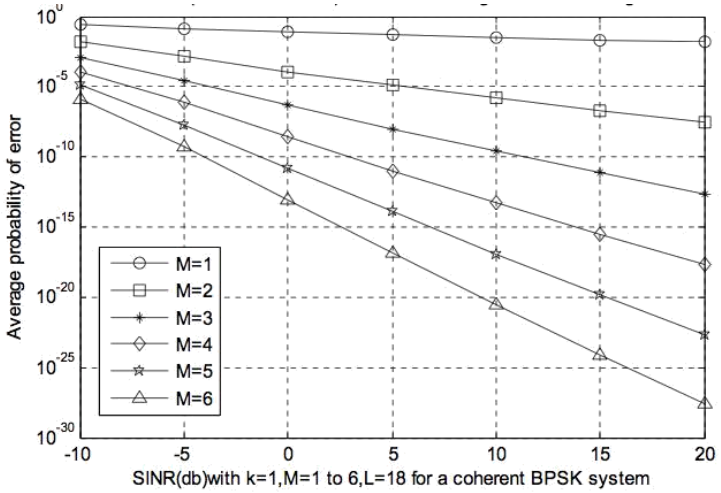


Рис. 4.10 – Ємність латунного каналу з M=1-6, L=18, k=1

На малюнках 4.9-4.10 показано канал Райса, тобто залежність BER від SNR для L=6 і L=18, відповідно, для багатоканальних перешкод; Крім того, зі збільшенням кількості антен BER зменшується, що призводить до поступового збільшення; продуктивність системи. Ті самі спостереження та розрахунки підсумовані в таблицях 4.5-4.6.

Таблиця 4.5

BER для каналу Райса при L=6, SNR=5 дБ

Серійний номер	Номер антени, M	BER при L=6, SNR=5 дБ
1	M=1	0,0750
2	M=2	0,0001
3	M=3	0,0000
4	M=4	0,0000
5	M=5	0,0000
6	M=6	0,0000

Таблиця 4.6

BER для каналу Райса при L=18, SNR=5 дБ

Серійний номер	Номер антени, M	BER при L=18, SNR=5 дБ
1	M=1	0,0479
2	M=2	0,0000
3	M=3	0,0000
4	M=4	0,0000
5	M=5	0,0000
6	M=6	0,0000

У таблицях з 4.7 по 4.8 наведено обчислення співвідношення сигнал/шум для даного BER і перешкод L=6 і L=18.

Таблиця 4.7

SNR для Райсовського каналу при L=6, BER<10^{-1}

Серійний номер	Номер антени, M	SNR при L=6, BER<10^{-1}
1	M=1	15 дБ
2	M=2	-10 дБ

Таблиця 4.8

SNR для Райсовського каналу при L=18, BER<10^{-1}

Серійний номер	Номер антени, M	SNR при L=18, BER<10^{-1}
1	M=1	20 дБ
2	M=2	-10 дБ

Створення графічного інтерфейсу GUI. Щоб спростити використання Matlab у майбутньому, ви можете створити графічний інтерфейс користувача (GUI) для багатошляхового каналу зв'язку, показаного на малюнку 4.11.

Використовуючи вбудований інтерфейс, ми побудували графік співвідношення між BER і SNR: теоретичне та змодельоване. Як показано на малюнку 4.12, змодельована залежність близька до теоретичної.

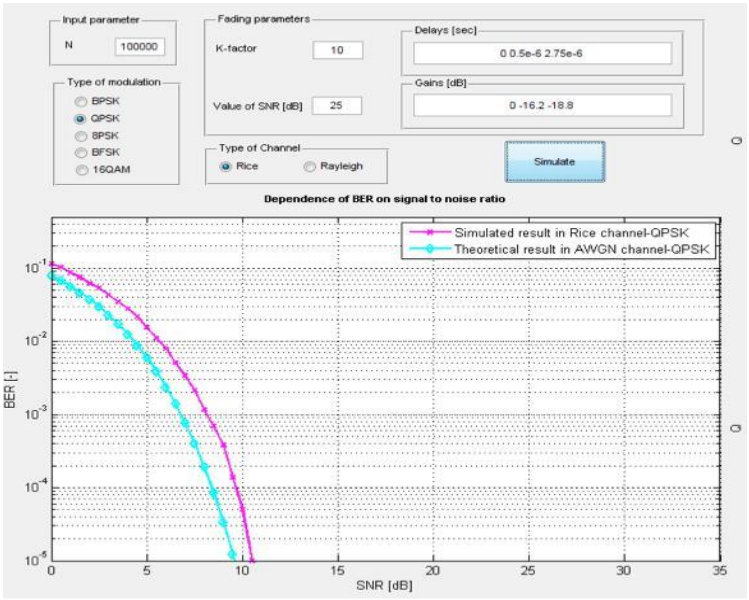


Рис. 4.11. – Операційне вікно графічного інтерфейсу багатоканального каналу GUI

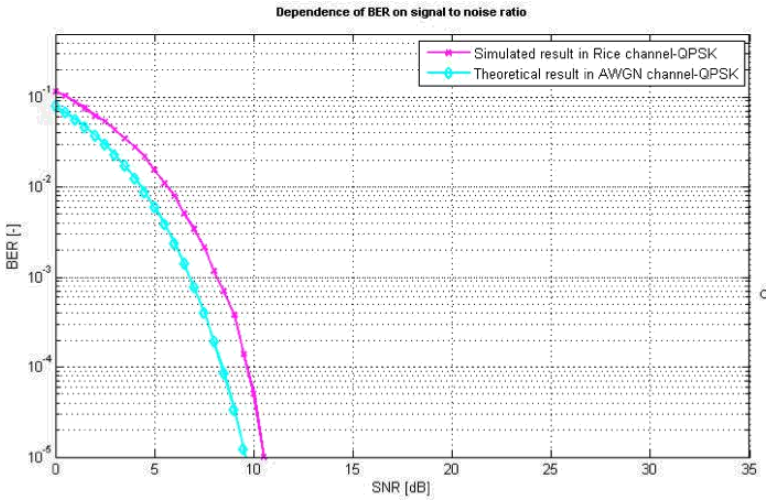


Рис 4.12. – Порівняння теоретичних і емпіричних графіків BER і SNR

Побудова багатоканального каналу зв'язку в Matlab

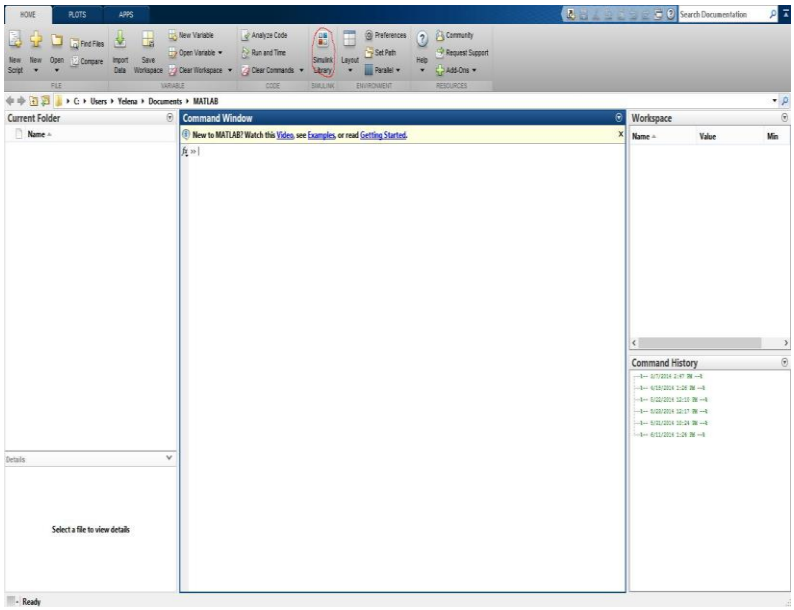


Рис 4.13. - Головне меню Matlab

Вибір каналу Райса для введення параметрів

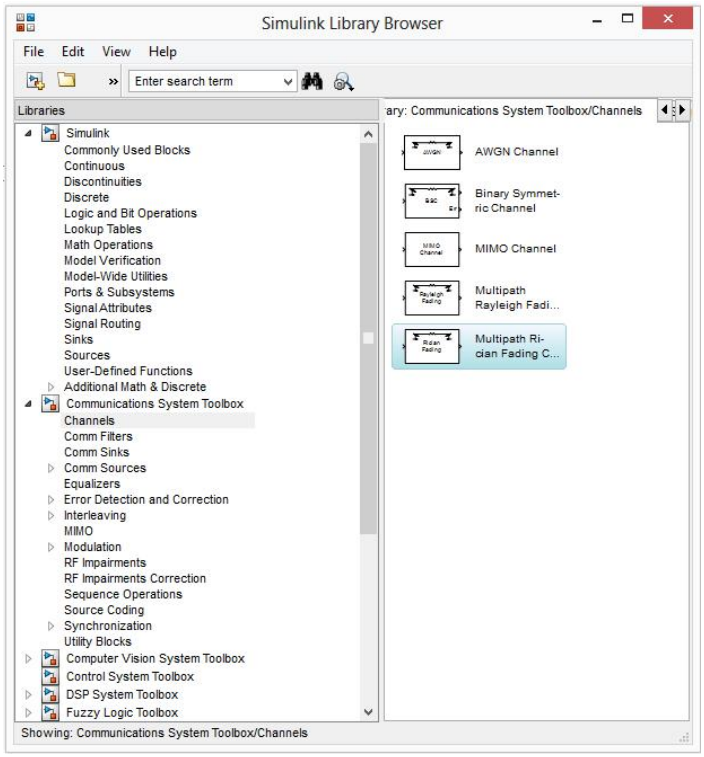


Рис 4.14. - Вибір каналу Райса для введення параметрів

Визначення параметрів Райсового каналу

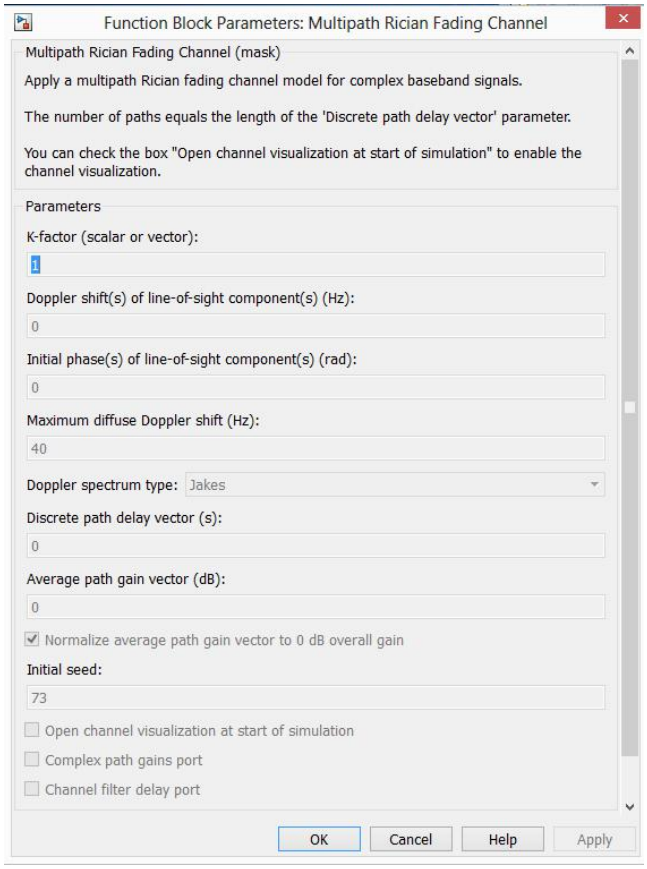


Рис 4.15. – Введення параметрів Райсовського каналу

Початок симуляції моделювання каналу зв’язку

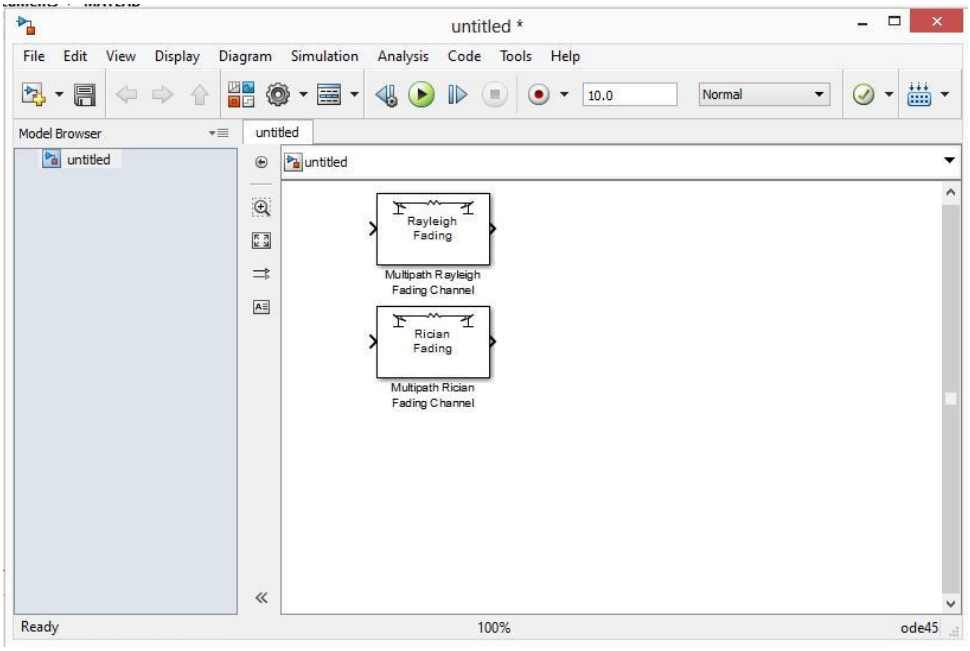


Рис 4.16. – Симуляція каналу зв’язку.

Результат моделювання каналу зв’язку

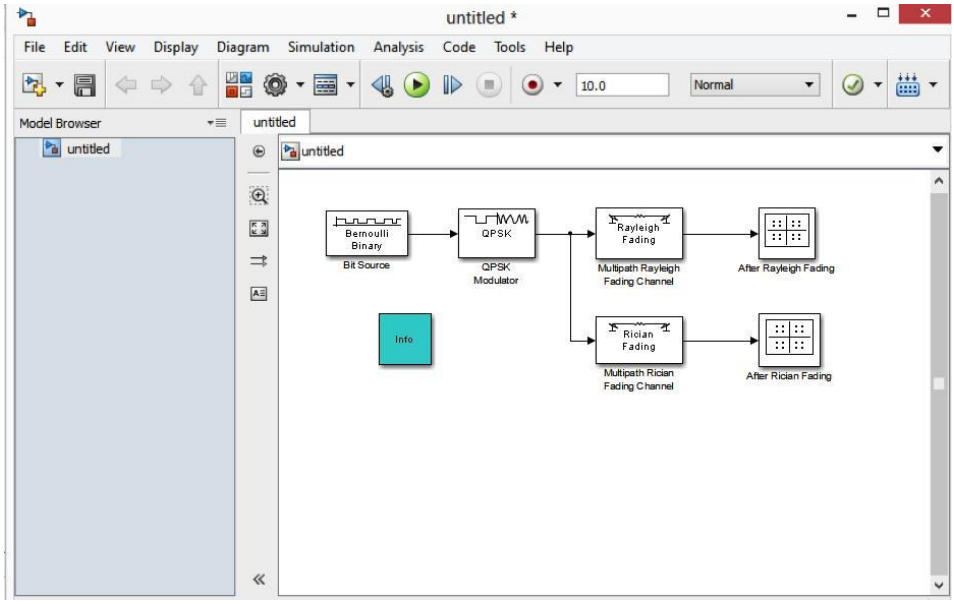


Рис 4.17. – Результат моделювання.

Вибір команд для створення компонентів GUI

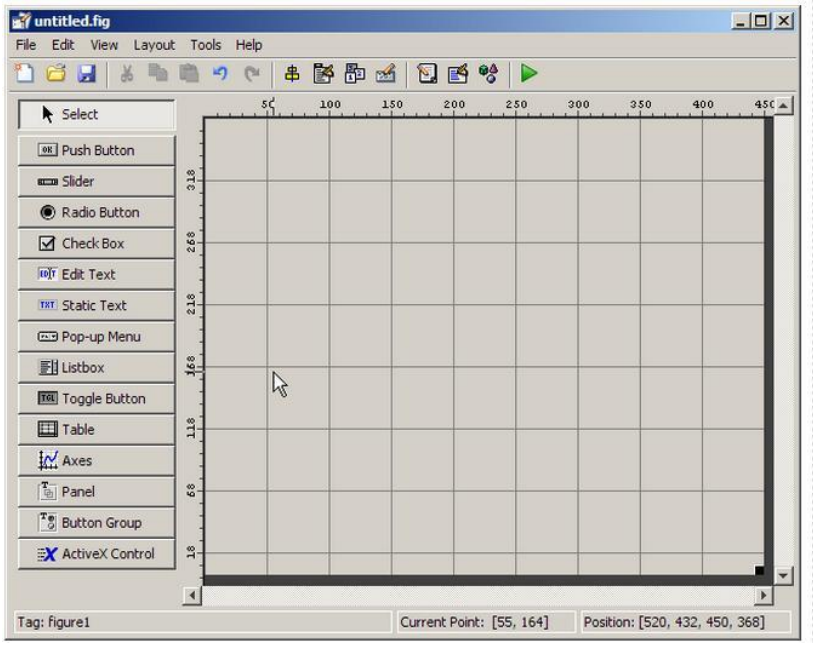


Рис 4.18. – Команди для створення компонентів GUI.

Результат візуалізації GUI

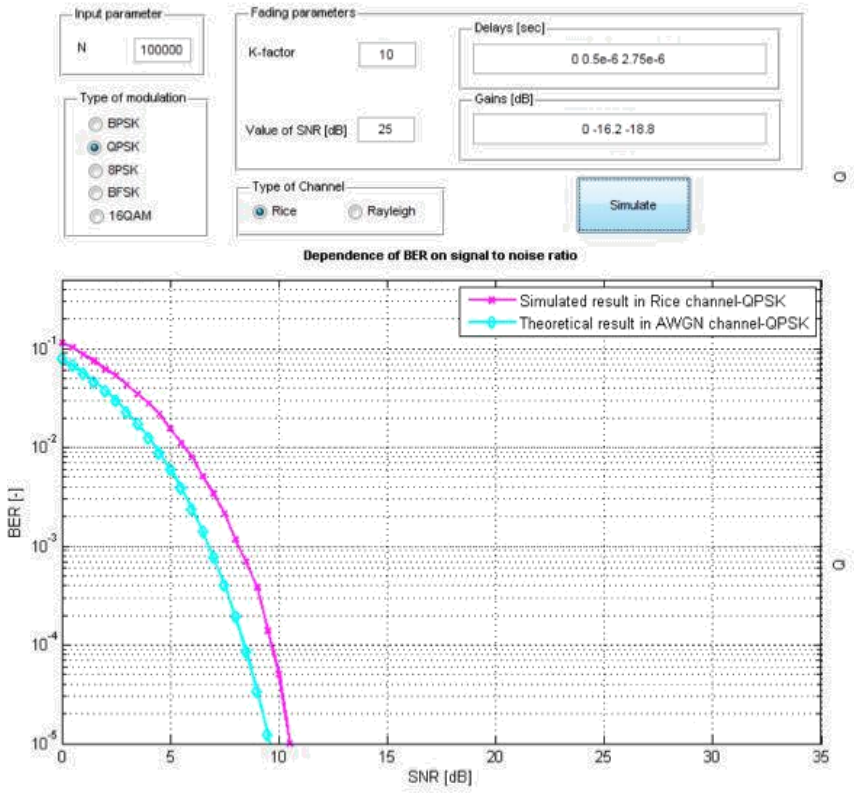


Рис 4.19. – Результат візуалізації GUI

У магістерській роботі проведено експериментальний аналіз розроблених методів для покращення ефективності каналів зв’язку стандарту LTE. Основні результати включають::

1. Створено імітаційну модель каналу, яка містить усі основні функціональні блоки реального каналу зв’язку LTE. Ця модель дозволила експериментально оцінити ефективність запропонованих методів компенсації згасань і завмирань сигналу. Описано основні фактори, що впливають на продуктивність систем мобільного зв'язку. Основною причиною цих дефектів є багатопроменевість поширення. Щоб зменшити ці розриви, ми використовуємо розподіли Релея та Райса. Розроблена імітаційну модель каналу системи LTE з урахуванням усіх основних функціональних блоків каналу реальної системи, що дозволило експериментально оцінити ефективність запропонованих моделей; Також розроблено програмне забезпечення для системи Matlab. Ці імітаційні моделі дозволили отримати кількісні оцінки ефективності обраних параметрів каналу.
2. Імітаційна модель дала змогу кількісно оцінити продуктивність каналу залежно від змінних параметрів, таких як рівень шуму, тип перешкод та відстань до базової станції. Результати підтвердили, що використання технологій MIMO, агрегації носіїв та beamforming значно покращує пропускну здатність і стійкість до перешкод.
3. Було досліджено вплив багатопроменевості на якість зв’язку. Отримані результати свідчать, що використання адаптивних методів попереднього кодування, таких як STBC і SFBC, ефективно мінімізує негативний вплив багатопроменевого поширення сигналу.
4. Розроблено алгоритми динамічного управління трафіком, які дозволяють розподіляти ресурси мережі залежно від умов у реальному часі. Експериментальні дані підтвердили, що це значно зменшує затримки при високому навантаженні на мережу.
5. Було створено спеціалізоване програмне забезпечення для роботи в середовищі Matlab, що дозволяє проводити моделювання та аналіз параметрів мережі. Інструмент є універсальним і може бути використаний для тестування різних сценаріїв роботи мережі.

6. Результати моделювання показують, що BER зменшується зі збільшенням кількості антен, і зменшення BER також можна спостерігати зі збільшенням коефіцієнта K для каналу Райса.
7. Отримано кількісні показники ефективності обраних параметрів каналів. Було доведено, що оптимізація мережевих ресурсів і впровадження сучасних технологій дозволяють збільшити швидкість передачі даних на 20-30% у порівнянні зі стандартними підходами.

Результати експериментального аналізу підтверджують ефективність запропонованих методів у підвищенні якості та стабільності зв’язку в мобільних мережах LTE, особливо за умов надзвичайних ситуацій. Це доводить доцільність впровадження розроблених рішень у реальних мережах.

ВИСНОВОК

Магістерська робота присвячена дослідженню та вдосконаленню методів підвищення швидкості передачі даних у сучасних мобільних мережах за умов надзвичайних ситуацій. У процесі виконання дослідження проаналізовано ключові технології стандартів 4G LTE та 5G, такі як агрегація носіїв, Massive MIMO та beamforming. Ці технології забезпечують значне зростання продуктивності мереж, але потребують адаптації для стабільної роботи у критичних умовах.

Особливу увагу приділено вивченню перешкод, які виникають при поширенні сигналу в радіоканалах, таких як багатопроменеве поширення, згасання сигналу, шум та інтерференція. Розроблено рекомендації для мінімізації впливу цих факторів шляхом використання сучасних механізмів компенсації, таких як ICIC, HARQ та динамічне управління трафіком.

Важливою складовою роботи стала інтеграція мобільних і супутникових систем, яка дозволяє забезпечувати зв’язок у зонах із пошкодженою інфраструктурою. У таких умовах додаткові можливості надають мобільні базові станції та системи резервного зв’язку.

Запропоновані алгоритми управління мережею дозволяють підвищити пропускну здатність за умов перевантаження, забезпечуючи пріоритетний доступ для екстрених служб. Виконані моделювання показали ефективність використання адаптивних методів розподілу спектра і технологій Beamforming для зменшення інтерференції.

Ефективність нових методів оцінена через імітаційне моделювання, яке враховує реальні умови надзвичайних ситуацій. Також проведено аналіз економічної доцільності впровадження рішень, що показало їх раціональність та відповідність потребам операторів.

Результати роботи мають значний практичний потенціал і можуть бути використані для вдосконалення існуючих мереж 4G LTE та впровадження рішень у 5G. Особливо це важливо в контексті інтеграції цих технологій із майбутніми стандартами 6G.

Таким чином, виконане дослідження робить вагомий внесок у розвиток мобільних технологій, підвищуючи їхню стійкість і ефективність у критичних ситуаціях. Робота підтверджує актуальність використання інноваційних підходів у мобільних мережах для задоволення сучасних викликів суспільства.

. У висновку зазначено, що в цій дисертації детально проаналізовано проблеми, які виникають у каналах зв’язку під час поширення сигналу. Особливу увагу приділено багатопроменевим каналам, де сигнал на вході приймальної антени є сумою відбитих сигналів і сигналу прямої видимості (якщо він наявний). Також досліджено методи компенсації основних проблем, таких як згасання, затухання та інші типи перешкод.

Розроблено універсальну математичну модель каналу зв’язку для систем MIMO, яка враховує багатопроменевість середовища передачі сигналу та конструктивні особливості приймальної антени.

Запропоновані заходи спрямовані на підвищення ефективності роботи каналів зв’язку стандарту LTE. Зокрема, створено імітаційну модель каналу LTE, яка дозволяє оцінювати продуктивність каналів у різних умовах.

Розроблена імітаційна модель включає всі основні функціональні блоки реального каналу LTE, що забезпечило можливість експериментальної перевірки ефективності запропонованих моделей. Для цього було створено програмне забезпечення в середовищі Matlab, яке дозволяє отримувати кількісні оцінки продуктивності каналів залежно від їхніх параметрів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. de Looper, Крістіан "Що таке 5G? Мережа нового покоління пояснила". // Цифрові тренди. 27 березня 2020 р. 103 с.
2. ITU towards “IMT for 2020 and beyond”// M.2083 : IMT Vision —"Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond" (англ.). // Approved in 2015-09 International Telecommunications Union.//Recommendation M.2083-0 - Updated: 2015-10-12. 21 p. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf (дата звернення 15.05.2020).
3. Гофман, Кріс "Що таке 5G, і наскільки швидко це буде?" 7 січня 2019 року. 18 с.
4. Horwitz, Jeremy "Остаточний посібник щодо 5G низьких, середніх і високих діапазонів швидкості"//Інтернет-журнал VentureBeat. 10 грудня 2019 р. 1008 с.
5. Шатруган Сінгх "Вісім причин, чому 5G краще, ніж 4G" . Altran . 25 травня 2019 року. 305 с.
6. «Я божеволію від Massive MIMO»//"Кітіхара Softbank замовляє 1000 масивних баз MIMO". 27 березня 2020 року. 13 с.
7. "Ми протестували 5G швидкості по всьому світу". CNET. Отримано 3 січня 2020 року. 14 с.
8. «Мінімальні вимоги, пов'язані з технічними характеристиками для радіоінтерфейсів IMT-2020» . 8 січня 2019 року . 115 с.
9. "Перша справжня специфікація 5G офіційно завершена" . Границя.7 січня 2019 року .
10. "Стан IoT 2018: Кількість пристроїв IoT зараз на рівні 7B — прискорення ринку" . 24 липня 2019 року .
11. «5G революція Telecom викликає похитнення на ринку базових станцій».//Азіатський огляд Nikkei. 14 вересня 2019 року.

12."Швидкість 5G проти 5G-діапазон. Яке значення швидкості 5G, діапазон 5G".// Keyghtsopp. 1 лютого 2020 року. 4 с.
13.The computing load balancing through the orbital computer network of the internet of things (2020) / Ilchenko, M., Narytnik, T., Prisyazhny, V., Kapshtyk, S., Matvienko, S. / Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika), 79 (4), pp. 343-352. / Електронний документ. Режим доступу: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85085244112&do i = 10 . 1615 %2fTelecomRadEng .v79.i4.70&partnerID =40&md5=73f400a98bc0fa4ae5c25074171c5593/DOI:10.1615/TelecomRadEng v79.i4.70
14.International Telecommunication Union: "Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06)".
15.D.J. Smith, Reliability Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers, Butterworth-Heinemann, pp. 515, 2021.
16. E.C. Ubani and I.C. Nwakanma, "Effectiveness of Maintenance Policies for Cellular System Infrastructure Project", International Journal of Scientific Engineering and Technology, no. 2, pp. 953-960.
17.E Markova, Y Satin, I Kochetkova, A Zeifman and A. Sinitcina, "Queuing System with Unreliable Servers and Inhomogeneous Intensities for Analyzing the Impact of Non-Stationarity to Performance Measures of Wireless Network under Licensed Shared Access", Mathematics, vol. 8, no. 5, pp. 800, 2020.
18.Amit Kumar and Mangey Ram, The Handbook of Reliability Maintenance and System Safety through Mathematical Modeling, Academic Press, pp. 520, 2021.
19.Krishnamurthy Raghunandan, Introduction to Wireless Communications and Networks, New York, USA, 2022, – 459 с.
20.Rajib Taid, Mobile Communications Systems Development, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Susses, UK, 2021, – 544 с.

21. Sophia Antipolis Cedex, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Circuit switched voice capacity evolution for GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN) (3GPP TR 45.914 version 17.0.0 Release 17), France, 2022. – 336 с.
22. Hamza Kheddar, FROM 2G TO 4G MOBILE NETWORK: ARCHITECTURE AND KEY PERFORMANCE INDICATORS, 2022. – 23 с.
23. С.О. Кравчук. Теорія систем мобільних інфокомунікацій. Системна архітектура: навчальний посібник. – К. : КПІ, 2023. – 682 с.
24. О. Ю. Лавриненко, О. В. Жарова, Д. І. Бахтіяров, О. Г. Голубничий, А. Г. Тараненко. Системи мобільного радіозв'язку: лабораторний практикум. – К. : НАУ, 2023. – 96с.
25. А. Г. Тараненко, Є. І. Габрусенко. Системи мобільного зв'язку: методичні рекомендації до виконання домашнього завдання. – К. : НАУ, 2020. – 32с.

ДЕМОНСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Артем Решодько

Назва: Методи збільшення швидкості передачі даних в сучасних мобільних мережах в надзвичайних умовах

Координатор: Любов Беркман

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:4.1

Коефіцієнт подібності 2:0.5

Тривога: 59

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*