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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Метод удосконалення технології OFDM для збільшення пропускної здатності мереж четвертого покоління»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації 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



(підпис) Віктор АТАМАНЮК (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Віктор АТАМАНЮК

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО

Рецензент: В. Черевик

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Атаманюку Віктору Вікторовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод удосконалення технології OFDM для збільшення пропускної здатності мереж четвертого покоління»,
керівник кваліфікаційної роботи Анатолій МАКАРЕНКО, д.т.н., професор,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 р. №145.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Стільникові мережі 4-го покоління.
   2. Ефективна пропускна здатність системи.
   3. Циклічний префікс OFDM-символа.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Аналіз якості обслуговування абонентів стільникових мереж зв'язку 4-го покоління.
   2. Дослідження пропускної здатності каналів антенних систем MIMO.
   3. Підвищення пропускної здатності безпроводових мереж 4-го покоління.

4. Характеристики безпроводових каналів із використанням технологій MIMO-OFDM.

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	19.10.23	Викон.
2.	Аналіз якості обслуговування абонентів стільникових мереж зв'язку 4-го покоління	31.10.23	Викон.
3.	Дослідження пропускної здатності каналів антенних систем MIMO	15.11.23	Викон.
4.	Підвищення пропускної здатності безпроводових мереж 4-го покоління	29.11.23	Викон.
5.	Характеристики безпроводових каналів із використанням технологій MIMO-OFDM	07.12.23	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	11.12.23	Викон.
7.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Віктор АТАМАНЮК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 77 стор., 22 рис., 5 табл., 31 дж.

Мета роботи – розробка алгоритму телекомунікаційної системи 4-го покоління, що забезпечує високу ефективність передачі даних.

Об'єкт дослідження - процес безпроводового доступу в стільникових мережах четвертого покоління.

Предмет дослідження – методи підвищення пропускної спроможності мереж четвертого покоління.

Короткий зміст роботи: В роботі проведено аналіз теоретичних засад та особливостей впровадження і планування мереж безпроводових систем зв'язку четвертого покоління.

Проведено оцінку пропускної здатності каналів антенних систем MIMO в сучасних стільникових мережах четвертого покоління.

Запропоновано алгоритм підвищення ефективності використання методів боротьби із міжсимвольною інтерференцією, що дозволяє підвищувати пропускну здатність каналів сучасних стільникових мереж зв'язку.

Галузь використання – цифрова мережа зв'язку України.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: WIMAX, LTE, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, СТІЛЬНИКОВА МЕРЕЖА, ЗАХИСНИЙ ІНТЕРВАЛ, ПОТУЖНІСТЬ РАДІОСИГНАЛУ, ЗАТУХАННЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, OFDM-СИГНАЛИ, MIMO-СИСТЕМИ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 77 pages, 22 pictures, 5 table, 31 sources.

The purpose of the work - development of the algorithm of the 4th generation telecommunication system, which ensures high efficiency of data transmission.

Object of research – process of wireless access in cellular networks of the fourth generation.

Subject of research – methods of increasing the bandwidth of fourth generation networks.

Summary of the work: The paper analyzes the theoretical foundations and features of the implementation and planning of networks of wireless communication systems of the fourth generation.

The bandwidth capacity of MIMO antenna systems in modern cellular networks of the fourth generation has been evaluated.

An algorithm for increasing the efficiency of the use of methods of combating intersymbol interference is proposed, which allows to increase the throughput of channels of modern cellular communication networks.

The field of use is the digital communication network of Ukraine.

KEYWORDS: WIMAX, LTE, BANDWIDTH, CELLULAR NETWORK, PROTECTION INTERVAL, RADIO SIGNAL POWER, ATTENUATION, ELECTROMAGNETIC RADIATION, OFDM-SIGNALS, MIMO-SYSTEMS

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

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

Направляється здобувач Атаманюк В.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

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

на тему: Метод удосконалення технології OFDM для збільшення пропускної здатності мереж четвертого покоління

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Атаманюк Віктор Вікторович 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 Атаманюка Віктора Вікторовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2023 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Атаманюк В.В.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

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

" " _____ 2023 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Атаманюка Віктора Вікторовича

на тему: «Метод удосконалення технології OFDM для збільшення пропускної здатності мереж четвертого покоління»

Актуальність:

При створенні та розвитку сучасних безпроводових систем зв'язку є розробка методів оцінки та збільшення пропускної здатності за високої якості обслуговування користувачів в складних умовах багатопроменевого просторового каналу. Одними з найбільш перспективних шляхів її вирішення є використання технології MIMO як на приймальному, так і на передавальному кінцях лінії зв'язку разом із технологією OFDM.

Тому дослідження та розрахунки проведені в даній роботі є актуальними та своєчасними.

Позитивні сторони:

Робота дозволяє досить повно оцінити загальну характеристику, сутність та структуру поставленої проблеми. Дається чітке визначення мети, об'єкту та предмету дослідження. Сформульовано наукові проблеми і представлено використані методи дослідження.

Недоліки:

1. При прогнозі росту абонентської бази мереж на рис. 1.2 не варто враховувати технологію CDMA.
2. В роботі не використані для аналізу різновидності технології OFDM.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Атаманюк Віктор Вікторович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент: доцент, к.т.н., каф. КІ — *(науковий ступінь, вчене звання)*; *(підпис)*; В. М. Черевик — *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 8
ВСТУП 10
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА АНАЛІЗ РОБОТИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛІННЯ 13
1.1 Аналіз особливостей побудови мереж LTE 13
1.2 Структура рівня мережі LTE на рівні користувача 17
1.3 Аналіз механізмів управління забезпеченням захисту інформації в мережах LTE 24
1.4 Застосування моделей розповсюдження радіохвиль для планування сучасних стільникових мереж четвертого покоління 27
2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МЕРЕЖ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛІННЯ 38
2.1 Алгоритм адаптивної зміни тривалості захисного інтервалу під час формування OFDM-сигналу 38
2.2 Регулювання випромінюваної потужності базових станцій в залежності від погодних умов 47
3 ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗПРОВОДОВИХ КАНАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ MIMO-OFDM 59
3.1 Оцінка пропускної здатності MIMO-OFDM системи технології LTE 59
3.2 Експериментальне визначення пропускної здатності антенних систем MIMO стандарту LTE 67
ВИСНОВКИ 72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 73
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	аналого-цифрове перетворення
БС	базова станція
ВСШ	відношення сигнал/шум
ДПФ	дискретне перетворення Фур'є
МКЗ	міжканальна завада
МС	мобільна станція
МСІ	міжсимвольна інтерференція
ЦАП	цифро-аналогове перетворення
ШПФ	швидке перетворення Фур'є
ЩПЕ	щільність потоку енергії
4G	Fourth Generation (четверте покоління мереж стільникового зв'язку)
BER	bit error rate (імовірність бітової помилки)
BLER	block error rate (імовірність блокової помилки)
CDMA	code division multiple access (множинний доступ з кодовим поділом)
FPC	fractional power control (дробове управління потужністю)
GSM	Global System for Mobile communications (Глобальна система мобільного зв'язку)
HSPA	high speed packet access (високошвидкісний пакетний доступ)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Інститут інженерів електротехніки та електроніки)
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform (Зворотнє швидке перетворення Фур'є)
IMT	International Mobile Telecommunications (міжнародні мобільні телекомунікації)
IP	Internet Protocol (Інтернет протокол)
ITU	International Telecommunication Union (Міжнародний Союз Електрозв'язку)
LOS	Line of Sight (режим "прямої видимості")

LTE	Long Term Evolution (стратегія довготривалого розвитку)
MCS	Modulation and Coding Scheme (схеми модуляції та кодування)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (множинний вхід множинний вихід)
NLOS	Non Line of Sight (режим за відсутності "прямої видимості")
OFDM	Ortogonal Frequency Division Multiplexing (мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів)
OI	Overload Indicator (індикатор перевантаження)
PSK	Phase Shift Keying (Фазова маніпуляція)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (квадратурна амплітудна модуляція)
TCP	Transmission Control Protocol (протокол управління передачею)
UDP	User Datagram Protocol (Протокол дейтаграми користувача)
UE	User Equipment (обладнання користувачів)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Універсальна система мобільних телекомунікацій)
Wi-Fi	Wireless Fidelity (безпроводова точність, стандарт безпроводових мереж сімейства IEEE 802.11)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access (всесвітня взаємодія для мікрохвильового доступу)

ВСТУП

Актуальність теми. Останні десятиліття характеризуються швидким впровадженням стільникових мереж четвертого покоління [1].

В цих умовах для користувачів важливо завжди отримувати високошвидкісний та якісний доступ до мережевих ресурсів, незалежно від місця знаходження.

Міжнародний Телекомунікаційнийкорпу Союз ITU (International Telecommunications Union) визначив технологію LTE і WiMax, як офіційні міжнародні 4G стандарти [1, 2].

До них відносяться LTE-Advanced на основі стільникового стандарту LTE (Long Term Evolution і WirelessMAN-Advanced 2 на основі WiMAX 802.16m, які є офіційними технологіями 4G. За своїми технічними характеристиками дані технології в більшій мірі можуть задовольнити вимоги, висунуті до стільникових мереж четвертого покоління.

Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації (НКРЗІ) 31 січня 2018 р. провела 4G-тендер в діапазоні частот 2600 МГц та 6 березня 2018 р. в діапазоні 1800 МГц [3, 4]. В Україні загальноприйнятою технологією 4G є LTE.

Тому надалі під поняттям мереж 4G будемо мати на увазі саме цю технологію. У таких системах зв'язку територія обслуговування (місто, регіон) ділиться на велике число робочих зон (стільників), всередині яких зв'язок між мобільними і базовими станціями здійснюється по радіоканалу. Розміри стільників у великих містах становлять близько 2 км, а при збільшенні числа абонентів можуть бути зменшені до 0,5 км. У приміських зонах радіус стільників може зростати до десятків кілометрів і обмежуватися відстанню прямої видимості антени базової станції. Обмеженість радіусу дії дає можливість організувати стільникову мережу, в якій одні й ті ж частотні канали можуть використовуватися в різних несуміжних ділянках стільників. Поряд із стільниковими системами впроваджуються системи персонального радіозв'язку, які характеризуються мікро- і пікостільниковою структурою з радіусом зон від кількох сотень до 10-60 м. Такі системи працюють,

як правило, в діапазоні міліметрових радіохвиль і дозволяють ефективно обслуговувати офіси, магазини, вокзали та інші об'єкти.

При організації мережі стільникового зв'язку для визначення оптимального місця встановлення і числа базових станцій, а також для вирішення інших завдань необхідно проводити точну оцінку характеристик сигналу в будь-якій точці простору в межах всієї зони обслуговування. Міське середовище створює специфічні умови для поширення радіохвиль. Тіньові зони, багаторазові перевідбиття і розсіювання хвиль формують багатопроменеві поля зі складною структурою інтерференції і різкими просторовими змінами рівня сигналу. Багатопроменевий характер поширення радіохвиль, коли в точку прийому приходять хвилі з різних напрямків і з різними часовими затримками, породжує явища міжсимвольної інтерференції при передачі кодових послідовностей. Спотворення сигналу, зумовлені міжсимвольною інтерференцією, можуть викликати серйозне погіршення характеристик системи і якості високошвидкісної передачі цифрової інформації, якщо тривалість затримки перевищує тривалість символу. Тому необхідною передумовою для розробки ефективних систем зв'язку, що працюють в міському середовищі, є глибоке знання характеристик багатопроменевого каналу розповсюдження. У міських умовах можна виділити такі основні елементи:

- направляючі структури (проспекти, вулиці, ділянки річок, контактні лінії міського електротранспорту та ін.);
- окрема будівля або групи будинків;
- поверхня Землі і перешкоди на ній (автомобілі, стовпи, паркани тощо);
- ділянки рослинності (парки, сквери, дворові насадження тощо).

Вищезгадані завдання, які планується вирішувати в даній магістеській роботі, обумовлюють її актуальність.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є розробка алгоритму телекомунікаційної системи 4-го покоління, що забезпечує високу ефективність передачі даних.

Об'єктом дослідження є процес безпроводового доступу в стільникових мережах четвертого покоління.

Предметом дослідження є методи підвищення пропускної спроможності мереж четвертого покоління.

Методи досліджень. Для досягнення поставлених цілей в магістерській роботі використано: методи теорії інформації та передавання сигналів; методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль; методи комп'ютерного моделювання; математичної статистики.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА АНАЛІЗ РОБОТИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Аналіз особливостей побудови мереж LTE

Ускладнення характеру трафіку, зокрема зниження мовного навантаження в порівнянні з обсягом мультимедійних повідомлень при організації різних видів мобільнного доступу призводить до того, що необхідну якість обслуговування може бути забезпечено тільки при використанні ефективнних методів підвищення пропускної здатносnті, так як саме при бездротновому доступі можуть виникатни різкі перекосни навантаження через стохастничного переміщення абонентів по зонам мобільної мережі.

Головними напрямками еволюції систем мобільного зв'язку [1, 2] є поліпшення якості надання мультимедійних послуг, зниження витрат абонентів і зменшення експлуантаційних витрат. Бурхливний розвиток бездротнових мереж передачні інформанції в Україні [3, 4] і в усьому світі, про який багато говорятнь, як про бездротнової революцнії в області передачні інформанції, пов'язане з такими їх перевагнами:

- гнучкіснть архітектури, тобто можливість динамічної зміни топології мережі при підключенні, пересуванні і відключенні мобільнних користувачів без значних втрат;
- висока швидкість передачі інформації;
- швидкість проектування і розгортання;
- високий ступінь захисту від несанкціонованого доступу;
- відмова від дорогого і не завжди можливого прокладання (оренди) оптоволоконного або мідного кабелю.

Метою даного розділу є аналіз способів управління пропускною спроможнiстю на фрагментах мережі стандарту LTE. Проведено аналіз методів підвищення пропускної здатності інформаційних мереж, також коротко розглянуті принципи побудови мереж LTE і проведено аналіз існуючих методів управління в

них трафіком. Буде показанно, що технологія LTE в силу особливностей побудовни радіоінтерфейсу є найбільш придатною для застосування алгоритмів динамічного управління пропускною спроможністю мереж. Тому в цьому розділі будуть розглянуті і проаналізовані методи управління пропускною спроможністю в стаціонарних і мобільнних мережах з метою постановки задачі розробки методу управління для підвищення ефективності передачі різнорідного трафіку на фрагменті мережі.

Проведемо аналіз особливостей побудовни мереж LTE, для цього розглянемо структуру користувальницького рівня мережі LTE [2, 5].

В даний час найбільш популярною технологією, що реалізує сучасну концепцію управління територіально розосередженими об'єктами, є технологія LTE. Високий ступінь керованності в рамках даної технолонгії досягається застосуванням нової мережевної інфраструктури SAE, в якій забезпечується всебічна підтримка послуг на базі технолонгії IP, а також безперервне обслуговування абонента при його переміщненні між різними мережами бездротнового доступу.

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

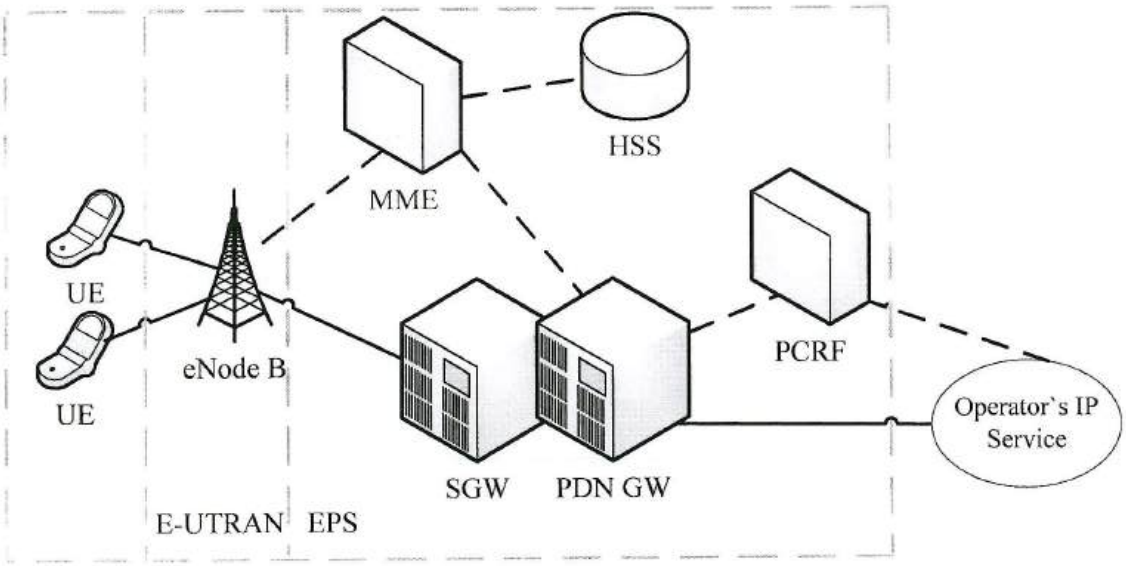


Рис. 1.1. Архитектура мереж LTE

Взаємодія мережі LTE з мережами 3GPP (UMTS / GSM / HSPA +) здійснюється як при забезпеченні роумінгу, так і хендовер. Взаємодія мережі LTE з іншими 3GPP мережами, для надання традиційних послуг телефонії, здійснюється за допомогою як традиційною технологією комутації каналів (TDM), так і технології комутації пакетів на базі сервісної підсистеми IMS.

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

Радіо частину мережі (E-UTRAN) складається тільки з базових станцій eNodeB які беруть на себе функції радіо інтерфейсу і є сполучною ланкою між призначеним для користувача обладнаям і мережею передачі даних, на відміну, наприклад, від стандарту GSM, де підсистема базових станцій BSS складалася з базового приймача BTS і контролера базових станцій BSC, тобто в мережі LTE в одному елементі eNodeB об'єднані функції передавача і контролера. Крім цього, все більше виробників обладная об'єднують функції опорної мережі в єдину платформу, що створює додаткові проблеми з точки зору інформаційної безпеки [6].

Основними елементами базової мережі EPC [2] є:

- вузол управління мобільністю - MME, який виконує завдання з управління мобільністю абонентського терміналу, управління службою передачі даних, а також управління безпекою мобільного зв'язку. Для управління безпекою в вузол MME інтегровано мережеве сховище даних NAS Security;

- обслуговуючий шлюз мережі LTE -S-GW, який відповідає за обробку та маршрутизацію пакетів, що надходять з підсистеми базових станцій eNodeB;

- шлюз для взаємодії з мережами інших операторів - P-GW, він відповідає за передачу голосу і даних від мережі оператора LTE до інших мереж 2G, 3G, яку не-3GPP і Internet;

- сервер абонентських даних HSS, де зберігається інформація про абонентів;

- вузол виставлення рахунків абонентам за надані послуги PCRF;

- сервер виділення IP-адрес DHCP / DNS.

Основною перевагою архітектури мереж LTE, в порівняі з архітектурою мереж попередніх поколінь є зниження затримки при передачі як призначених для користувача даних, так і керуючої інформації, в зв'язку з проходженням через менше число проміжних елементів [5, 6]. Обмін даними тут здійснюється за допомогою комутації пакетів по протоколу IP, що є істотною відмінністю мережі LTE від мереж попередніх поколінь.

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

У зв'язку з цим в архітектурі SAE передбачені механізми вибору найбільш зручною мережі передачі даних для надання абоненту необхідних послуг. При цьому всі сучасні мобільні термінали вибирають, при наявності декількох мереж, передачу трафіку на дозволеної користувачем мережі Wi-Fi [6], що зазвичай супроводжується перемиканням з однієї технології на іншу і відповідно передачею даних про користувача між мережами.

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

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

через шлюз P-GW, взаємодія з «ненадійними» мережами - через шлюз ePDG.

Ускладнення характеру трафіку [7], зокрема зниження мовного навантаження в порівняі з обсягом мультимедійних повідомлень при організації різних видів мобільного доступу призводить до того, що безпека передачі інформації, може бути забезпечена тільки при використанні ефективних методів підвищея пропускної здатності, так як саме при бездротовому доступі можуть виникати різкі перекоси навантаження через стохастичного переміщення абонентів по зонам мобільної мережі, при цьому всі протоколи і схеми взаємодії є відкритому тими, а передача даних здійснюється на базі протоколу IP.

Розглянемо структуру користувальницького рівня мережі LTE.

1.2 Структура рівня мережі LTE на рівні користувача

Розглянемо структурну схему мережі LTE [2, 5 - 7] (рис. 1.2) на рівні користувача. Сигнали від абонентів надходять на базові станції eNodeB. Базова станція перевіряє справжність абонента, але перед цим для користувача устаткування UE перевіряє справжність мережі по надісланим мережею повідомленням (talking).

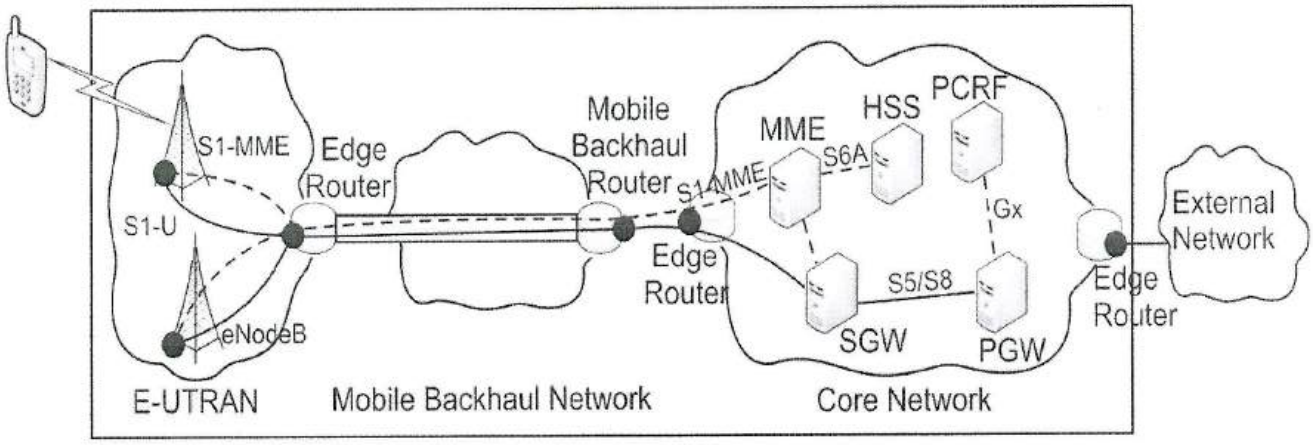


Рис. 1.2. Архітектура системи LTE з інфраструктурою SAE

Між базовими станціями для обмеження навантаження через вузли обробкою сигналізації у вузлі управління мобільністю MME передбачений

інтерфейс X2, через який між вузлами eNodeB проключаються абоненти, що швидкого рухаються. Це особливо важливо при хендовері [7]. Можливість безпосередньої бездротової передачі даних між eNodeB фактично означає, що в архітектурі SAE закладена функціональність mesh-мережі. Нова архітектура дозволяє при необхідності велика кількість заявок направляти не в основну мережу, а в межах суміжних сот, що мінімізує взаємодія з основною мережею.

Вузол управління мобільністю MME займається обробкою службової інформації: аутентифікацією, пошуком обслуговуючого шлюзу (S-GW) сигналізацією. Сигнальна навантаження в мережах LTE не обмежена. Нагадаємо, що в мережах LTE для абонентів встановлено такі швидкості передачі: для статичних, або повільно рухаються - 1 Гбіт / с і для рухомих в транспортному засобі - 100 Мбіт / с. Відомо, що на реальних мережах в даний час через інтерфейс S1-MME проходить 3.5% хендовер від об'єктів, що швидко абонентів [5]. Модуль MME забезпечує зберігання службової інформації про абонента, авторизацію термінальних пристроїв в наземних мережах мобільного зв'язку і загальне управління мобільністю абонентів.

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

Пакетний шлюз P-GW забезпечує з'єднання від призначеного для користувача устаткування UE до зовнішніх пакетних мережах передачі даних [6], будучи точкою входу і виходу трафіку, при цьому для користувача устаткування UE може одночасно з'єднуватися з декількома шлюзами P-GW для одночасного підключення до декількох мереж. Шлюз P-GW виконує також функції захисту, фільтрації пакетів для кожного користувача, підтримку білінгу, узаконеного перехоплення і сортувая пакетів. Інша важлива роль шлюзу P-GW-управління

мобільністю між сетямі3GPP і не-3GPP технологіями, такими як WiMAX і 3GPP2 (CDMA 1X і EvDO) [8, 9].

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

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

В даний час поряд з мобільними мережами широкого поширення набули високошвидкісні локальні мережі стандарту Wi-Fi, що розгортаються в загальнодоступних системах торгівлі, громадського харчувая, транспорту (кафе, аеропорти, магазини) і т.д. Розробляються базові станції, що дозволяють обслуговувати абонентів із застосуванням різних варіантів доступу як для роботи в мережах Wi-Fi, так і в мережах стільникового зв'язку. У зв'язку з цим, в архітектурі призначеного для користувача рівня SAE передбачені механізми вибору найбільш зручну інфраструктуру надання послуги, необхідної абоненту. Таким чином, створюється нова мережа радіодоступу, що значно збільшує швидкість передачі даних і зменшує час встановлення з'єднань. Наявність загального ядра в мережі дозволяє підтримувати мобільні послуги не тільки за технологією LTE, але також і за іншими радіо технологій (Wi-Fi, WIMAX, CDMA2000 і ін.) [2, 5 - 9] завдяки інтегрованості різних інтерфейсів передачі даних (рис. 1.3).

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

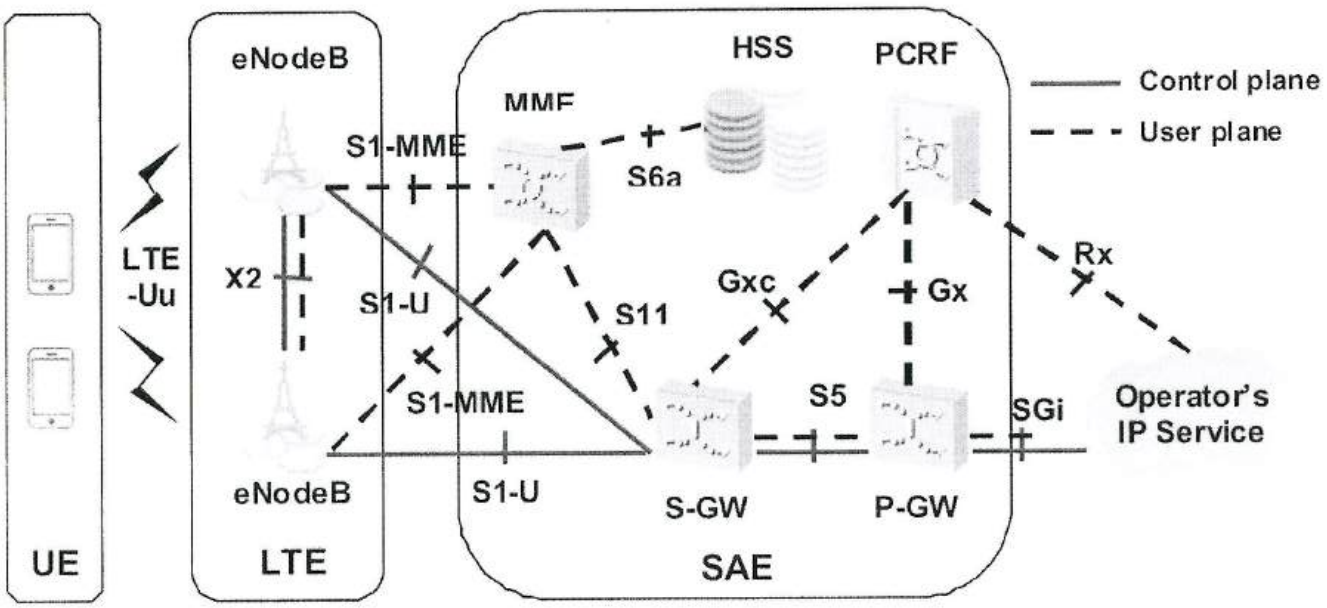


Рис. 1.3. Мережева інфраструктура технології LTE

При знаходженні абонента в мережі одного оператора IP-адреса користувацького обладная змінюватися не повинен, таким чином, базова станція eNodeB завжди «знає» все IP адреси даної мережі, отже, може посилати тегований трафік.

В даний час в рамках однієї зони оператора в межах великого міста знаходиться два MME і приблизно 7000 базових станцій eNodeB, але максимально в один MME може включатися до 30000 портів eNodeB. До однієї базової станції eNodeB одночасно можуть бути підключені до 800 абонентів. Передача мови і даних в мережах LTE може здійснюватися з різними ступенями стискання. Передбачена функція адаптація модуляції, кодування і швидкості

(Link adaptation), яка може змінювати тип кодека стиснення мови [6, 7] в режимі реального часу, в залежності від умов роботи каналу. Тип кодека для передачі мови, залежить від умов на радіо мережі. При невиконанні мінімальних умов якості радіоканалу, відбувається розрив з'єднання.

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

У мережах LTE використовується адаптивне розподіл смуги передачі, яке забезпечує гнучке і без надмірне розподіл ресурсних блоків відповідно до заданого якістю наданої послуги (QoS) [5]. Алгоритм адаптивного розподілу смуги передачі виділяє користувачам на краю стільники меншу кількість ресурсних блоків відповідно до спектральної щільністю потужності сигналу. Точність оцінки спектральної щільності впливає на оптимальність виділення користувачеві необхідного ресурсу.

У мережах LTE-Advanced абонентське обладная UE (для користувача устаткування) може для передачі даних зв'язуватися відразу з двома станціями eNodeB, що дозволяє знизити відношея сигнал / шум.

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

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

Одним із зовнішніх факторів, що впливають на продуктивність мережі, є загрози безпеки [2, 8, 9]. Акценти загроз технології LTE змістилися, тепер всі вони пов'язані з протоколом IP. Якщо в 3G голосовий трафік і дані передавалися

по двом різним мережам - по мережі з комутацією каналів і по мережі передачі даних, то в мережах 4G весь трафік проходить через єдину архітектуру EPC по протоколу IP (див. рис. 1.1).

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

Збільшення щільності розміщея мережевого обладная для поліпшея покриття (рис. 1.4) призводить до появи на мережі LTE фемто- і навіть пікостільники [2, 5 - 9], які сам користувач або підприємство може встановити у себе. Але при цьому поява нових мережевих елементів може призводить до атак на них і на канали зв'язку з іншою мережею.

В даний час ще не зрозуміло, хто буде конфігурувати і забезпечувати безпеку цих фемтостільників: оператор мережі або окремі фірми, що займаються їх обслуговуванням, користувач, який їх набуває, або оператор, до чиєї мережі вони підключаються [9]. Потрібно враховувати також, що базові станції eNodeB стають все більш інтелектуальними, наприклад, у версії REL10 вони отримали можливість маршрутизувати трафік.

У мережах LTE-Advanced з архітектури мережі LTE зникло поняття контролера радіомережі (RNC) [2], який виконував функцію з управління комунікаційними ресурсами. Для того щоб здійснити атаку на інфраструктуру мереж попередніх поколінь, необхідно було отримати доступ до цього контролеру, а це було пов'язане з труднощами з фізичного доступу. Керуючі

функції перейшли до базових станцій, які тепер, крім обслуговування радіо частини, стали приймати рішення про маршрутизації всього надійшов до них трафіку від абонентів. Це дозволило організовувати з'єднання між близькими абонентами безпосередньо, минаючи ядро мережі, що істотно розвантажує між вузлову навантаження на опорній мережі. Але при цьому у зловмисників з'являється можливість атакувати самі станції eNodeB, які працюють тільки по протоколу IP, що полегшує несанкціонований доступ. Можуть бути використані класичні атаки на канальному рівні, широкомовні шторми, створення фальшивого вузла eNodeB і інші варіанти нападів, при цьому трафік буде мати властивість однорідності, отже, необхідно вводити обмеження на швидкості його передачі, або пороги на число з'єднань.

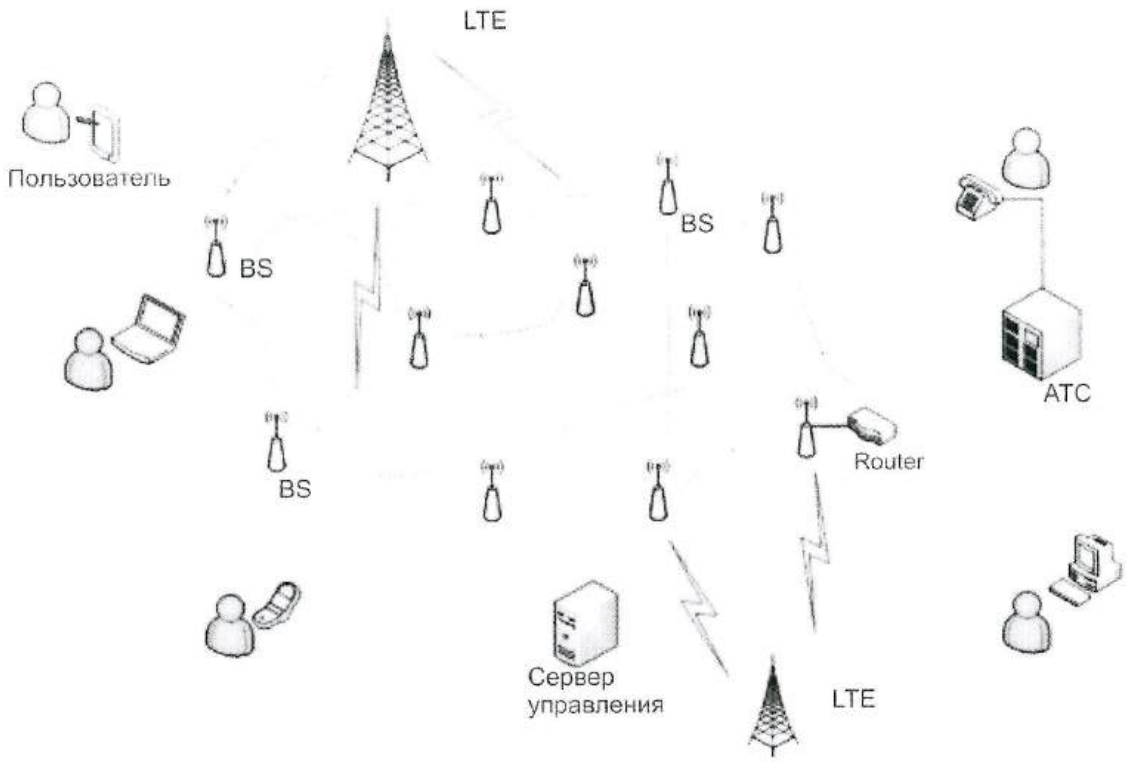


Рис. 1.4. Підключення різних абонентів до мережі

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

взаємодій-наслідком різних операторів.

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

1.3 Аналіз механізмів управління забезпеченням захисту інформації в мережах LTE

Існує два варіанти атак [2, 5, 8] пасивний варіант, коли зловмисник прослуховує канал зв'язку між мобільним пристроєм і базовою станцією, або активний варіант, коли на додаток до прослуховування, зловмисник впливає на вже циркулює трафік, вносячи в нього модифікації. В даний час можливості активних атак істотно знижені за рахунок застосування криптографічного захисту передаваємої інформації, але пасивні атаки, такі як аналіз трафіку і відстеження місця розташування користувачів, все ще можливі.

Стандарти попередніх поколінь мобільного зв'язку GSM, UMTS [2, 7] і стандарт LTE для захисту ідентифікаторів мобільних пристроїв в повітряному інтерфейсі використовують непридатні для фальсифікації тимчасові ідентифікатори (TMSI, GUTI). Але неповне розгортання мережі LTE по всій території робить ці заходи недостатніми для забезпечення гарантованого рівня захисту користувачів.

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

Ще одна особливість мережі LTE полягає в тому, що ця технологія орієнтована також на підключення інтелектуальних користувача пристроїв з LTE-модемами: персональних комп'ютерів, планшетів, смартфонів і т.д. Це означає, що в міру збільшея в мережі LTE числа інтелектуальних пристроїв число нападів на них буде зростати. Очевидно, що ці інтелектуальні телефони можуть бути більш широкому колу загроз. Поширення вірусів у відкритих комп'ютерних

платформах, наприклад, Android стає все більш масштабним [90], а продукція Apple і Microsoft також вразлива для шкідливих програм. В мобільні мережі перейшли всі загрози з провідних мереж: атаки на мережі, розсилка спаму, перехоплення відео і звуку з камери мобільного пристрою і т.д.

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

Загрози для користувачам мереж LTE можуть так само виходити і від сервісів подвійного призначення. Відомо, що мобільні оператори накопичують багато цінної інформації про абонентів (місце розташування, інтереси на основі Інтернет запитів, і т.д.). Це, в кінцевому рахунку, може призводити до монетизації інформації. Типовим прикладом є LBS-сервіси - тип інформаційних та розважальних послуг, заснованих на визначеі поточного місця розташування мобільного телефону. Їх можна використовувати, наприклад, для контролю за переміщенням вантажів або громадського транспорту, для визначея місцезнаходження дітей і для оповіщея про надзвичайні ситуації, але їх же можна використовувати і для незаконного стеження за абонентом. Злом кожного такого сервісу дозволить отримувати доступ до цінної інформації провайдера і побудувати нові схеми злочинів.

Функції захисту інформації в мережах LTE стандартизовані і здійснюються на декількох рівнях. Є захист на рівні доступу користувача до мережі, на рівні додатків, а також на рівні конфігурацій. При цьому кожен рівень на відміну від мережі Інтернет здійснює аутентифікацію і авторизацію всіх пристроїв. Відомо, що кожен пристрій в IP-мережі має свою адресу, а також і унікальний ідентифікатор MAC, але їх досить легко змінити і підробити. Технологія LTE використовує для всіх пристроїв, підключених до мережі, не тільки IP-адреси, а й системи поширення передачі ключів шифрувая. Все це дозволяє організувати в

мобільній мережі безпечний обмін ключами і встановлення шифрованого каналу зв'язку між елементами мережі.

У мережах LTE зберігаються так само методи аутентифікації по прив'язці користувачів до карти USIM [5]. Як і в традиційній мобільного зв'язку користувач може заблокувати доступ до телефону по PIN-коду. У мережах LTE успадковані від мереж GSM і UMTS алгоритми протоколів аутентифікації, але до них додані довші ключі і розширена ієрархія інфраструктури відкритих ключів - PKI. Також передбачені нові можливості для в сценаріях міжмашинна взаємодія M2M і одноразової аутентифікації SSO. Передбачена, крім того, захист від несанкціонованих з'єднань поверх мультимедійної платформи IP-мережі - IMS [5, 7].

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

Аналіз способів динамічного управління потоками в мережах LTE

Динамічне управління потоками має на увазі під собою управління вхідним та вихідним навантаженнями на вузлах мобільної мережі [2, 5, 8, 9] (таких як MME, S-GW, PGW, PCRF, HSS / DNS / GW), а також адаптивну диспетчеризацію його програм. Динамічне управління потоками на мережі LTE займаються алгоритми управління саме оптимізації мережі SON.

У вдосконаленій архітектурі SAE введені дві принципово нові функції: перша-автоматичної саме оптимізації управління мережею SON, які виникли через вимоги до складних мережевих мульти-технологіями, що припускають інтеграцію 2G, 3G, 4G і WiMAX - використання в мережі більш дрібних нових ієрархій, таких як піко- і фемтостільники. Функції SON стандартизовані в рамках 3GPP [6], вони є природним розвитком алгоритмів адаптивного управління, які вже використовуються в системах IMT-2000 [6] (наприклад, динамічне

управління потужністю випромінювання, планування ресурсів радіомережі RRC і т.п.) і дозволяють розширювати область автоматизації процесів управління мережі в цілому. Однак, вбудовування даної функції так і не було вироблено жодним оператором мережі через помилки по пріоітетності трафіку виникають при частковому розгортанні даної функції на мережі [20].

Інтенсивне зростання трафіку від міжмашинної взаємодії трафіку [8], ставить перед операторами завдання оптимізації доступу до ресурсів мережі. Компанія Еріксон представила прогноз динаміки підключення абонентів до мереж фіксованого і мобільного широкосмугового доступу до 2025 р., який показує збільшея трафіку від міжмашинної взаємодії в два рази за найближчі два роки [23].

Технологія LTE в силу особливостей побудови радіо інтерфейсу є найбільш придатною для застосування алгоритмів динамічного управління пропускною спроможністю мереж. Тому проведемо розгляд і аналіз методів можливості застосування моделей розповсюдження радіохвиль для планування сучасних стільникових мереж 4-го покоління.

1.4 Застосування моделей розповсюдження радіохвиль для планування сучасних стільникових мереж четвертого покоління

Основне завдання, яке має вирішуватися в даному підрозділі, полягає в тому, щоб передбачити можливі втрати на розповсюдження радіосигналу на частоті 2,5, 3,5 та 5 ГГц. Це пов'язано із тим, що в даний час існує кілька емпіричних моделей розповсюдження, за допомогою яких можна доволі точно розрахувати можливі втрати радіосигналу для частотних діапазонів до 2 ГГц. Після 2 ГГц є кілька підходящих моделей, які можуть бути використані при визначені втрат радіосигналу для мереж LTE та WiMAX. Наше дослідження буде спиратися на кілька запропонованих моделей [17, 18, 26, 31], які можуть бути використані для зазначених вище діапазонів частот. Наша мета дослідження також полягає у визначеі підходящої моделі для різних параметрів середовища

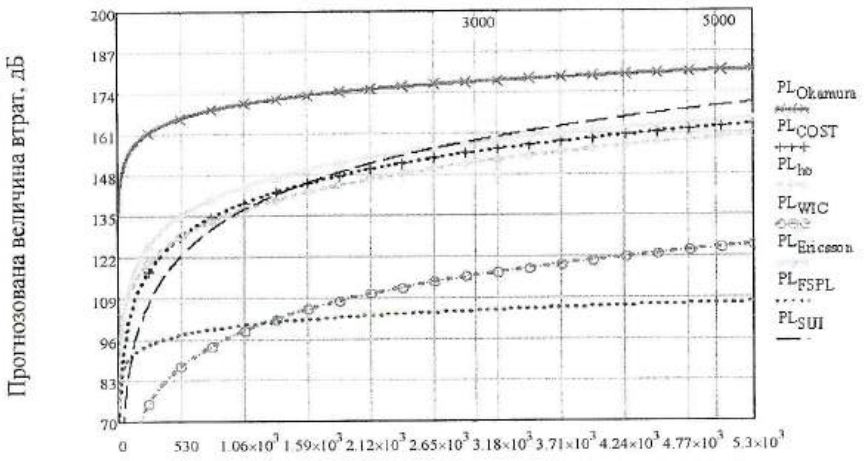
розповсюдження радіосигналу, висот антен приймача і передавача.

Сучасні безпроводові системи передавання даних мають ряд переваг під час розповсюдження сигналу в межах прямої видимості та за її відсутності в діапазонах частот нижче 11 ГГц. Існує ряд моделей розповсюдження радіохвиль, які можна використовувати для розрахунку втрат сигналу при розповсюдженні у вільному просторі, умовах міської забудови тощо (моделі Окамури [30, 31], Хата [24], Уолфіша-Ікегамі [17] та ін.), проте вони є обмеженими по діапазону застосування (до 2 ГГц). При цьому велика кількість обладная сучасних безпроводових систем працюють в досить різних діапазонах. Таким чином, проаналізувавши дані, можні зробити висновок про те, що в сучасних безпроводових системах використовується дуже широкий діапазон частот від 700 МГц (для LTE) до 5-5,8 ГГц (для WiMAX та Wi-Fi). Для нового стандарту мереж Wi-Fi IEEE 802.11ac планується використовувати, навіть діапазон 60 ГГц [22]. Крім цього, в мережах WiMAX планувалося спочатку використовувати діапазон частот від 2 до 11 ГГц. Проте останнім часом перелік доступних частотних діапазонів для даної технології постійно поповнюється (наприклад, 700-900 МГц [17]).

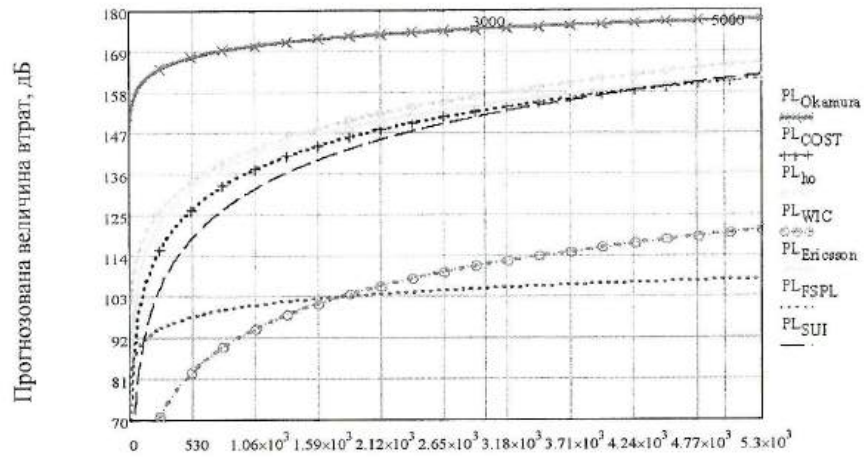
Таким чином, подальша мета дослідження заключається в дослідженні різних моделей розповсюдження радіохвиль та їх пристосування до використовуваних частотних діапазонів сучасних безпроводових мереж зв'язку (рис. 1.5 - 1.7).

Взагалі моделі розповсюдження радіохвиль поділяються на емпіричні, стохастичні та детерміністські.

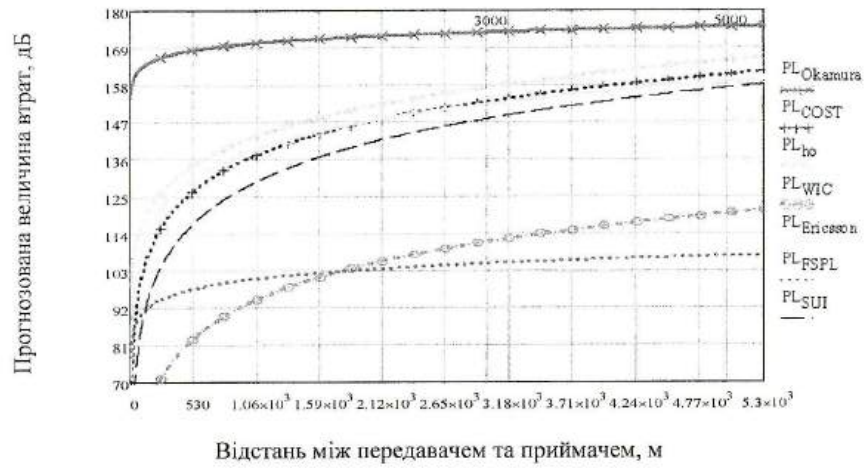
Предметом дослідження в даній роботі є лише емпіричні моделі розповсюдження радіохвиль. Саме їх і буде стосуватись подальший аналіз. Це викликано складностями по вибору стохастичних та детерміністських моделей для конкретного випадку планування, адже від вибору правильної моделі буде в значній мірі залежати кінцевий результат.



(а)

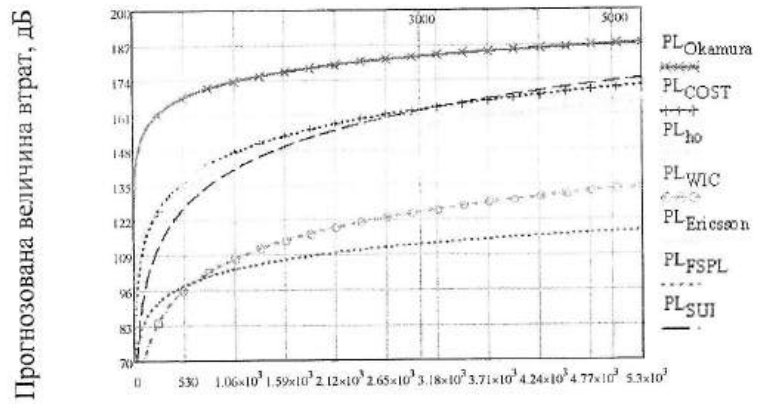


(б)

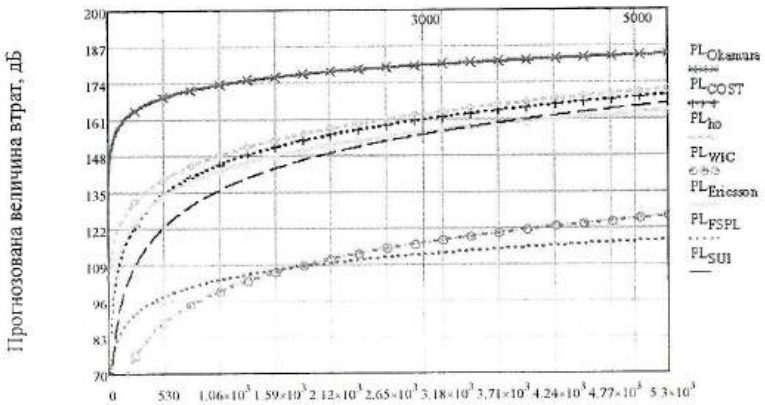


(в)

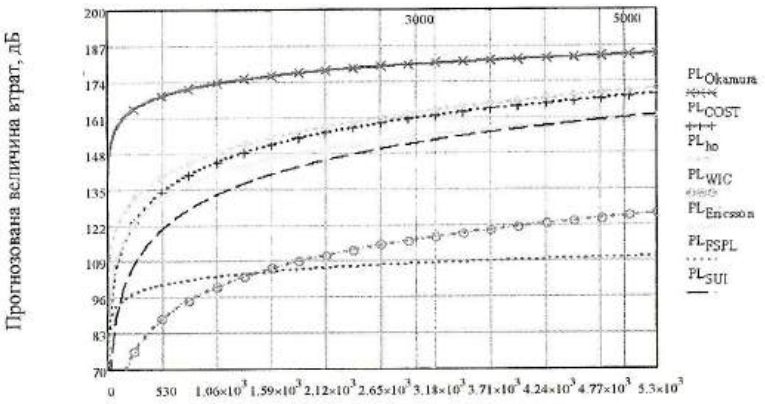
Рис. 1.5. Залежність затухання радіосигналу від відстані для діапазону 2,4 ГГц (а – міська місцевість; б – передмістя; в – сільська місцевість)



(а)



(б)



(в)

Рис. 1.6. Залежність затухання радіосигналу від відстані для діапазону 3,5 ГГц (а – міська місцевість; б – передмістя; в – сільська місцевість)

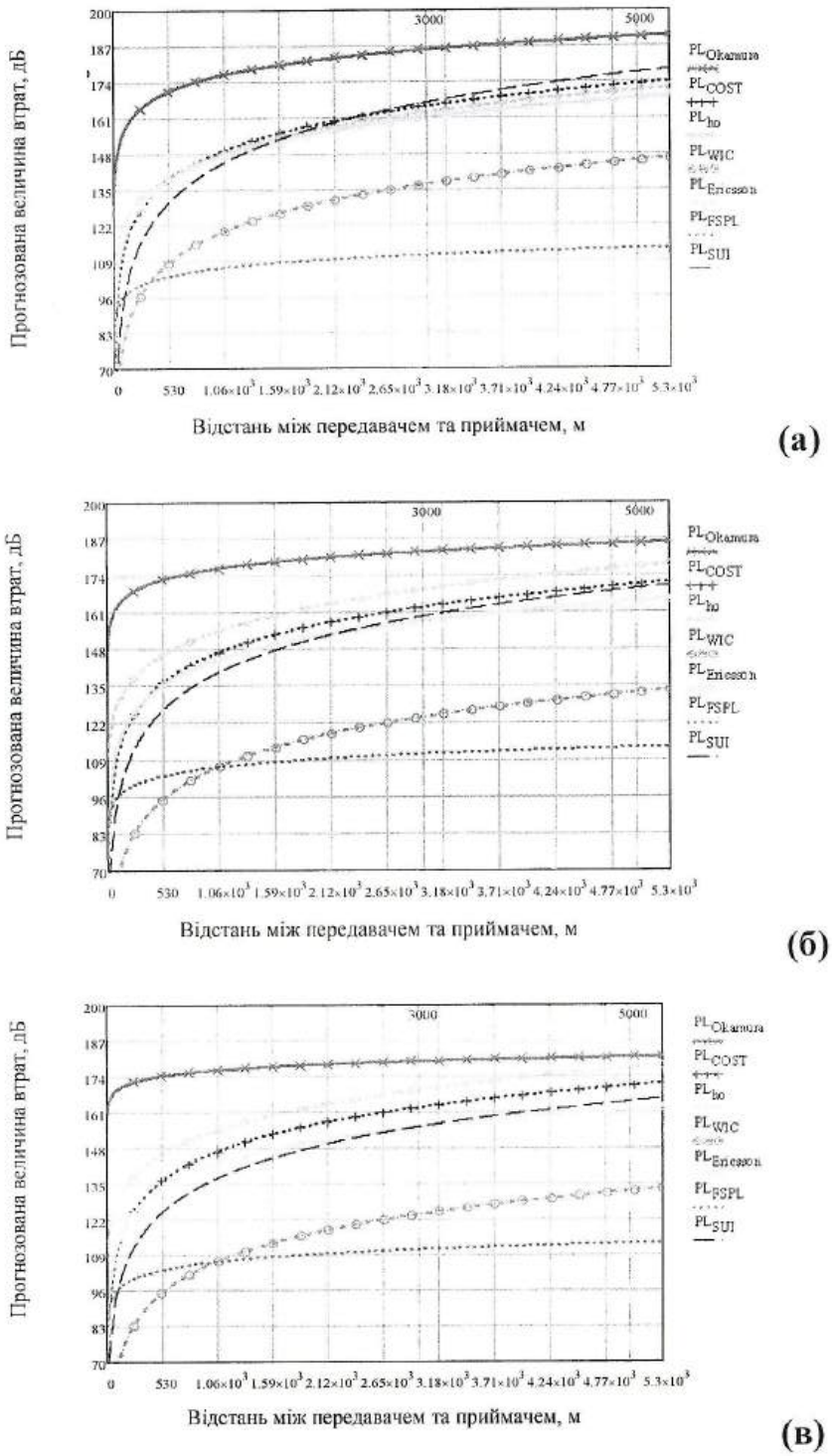


Рис. 1.7. Залежність затухання радіосигналу від відстані для діапазону 5 ГГц (а – міська місцевість; б – передмістя; в – сільська місцевість)

Проведемо моделювання величини затухань радіосигналу на трасі розповсюдження радіохвиль, використовуючи засоби програмного пакету MathCad. В процесі моделювання затухань радіосигналу на трасі

розповсюдження частота радіосигналу буде послідовно змінюватись від 2,4 до 3,5 та 5ГГц. Саме ці діапазони являються найбільш цікавими із точки зору їх дослідження для визначея величини затухань радіосигналу в мережах WiMAX та LTE. Для діапазонів нижче 2 ГГц вже були розроблені рекомендації, які встигли пройти апробацію під час планування великої кількості стільникових мереж (рис. 1.5 - 1.7).

В процесі моделювання будуть застосовуватись наступні параметри обладная стільникових мереж (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Параметри для моделювання величини затухань радіосигналу

Параметр	Значення
Потужність передавача БС	43 дБм
Потужність передавача МС	30 дБм
Висота підйому антени БС	30 м
Висота прийомної антени	3 м
Частотний діапазон	2,4 ГГц; 3,5 ГГц; 5 ГГц
Відстань між будівлями (середня)	50 м
Висота будинків (середня)	15 м
Ширина вулиць (середня)	25 м
Кут розташування вулиць	30
Корекція на затінення	8,2 дБ в приміській та сільські місцевості; 10,6 дБ в міській місцевості

Всі моделювання виконуються в програмному середовищі MathCad 15 для різних типів місцевості (місто, передмістя, сільська місцевість) та для трьох наведених вище діапазонів частот. Моделі, які використовувались для

дослідження: Модель втрат у вільному просторі (FSPL – Free Space Path Loss), Модель Хата Cost-231, Модель SUI (Stanford University Interim), Модель ECC-33 (Розширена модель Хата-Окамури), Модель Уолфіша-Ікегамі Cost-231, Модель Ericsson, Модель Окамури.

На наступних рис. 1.8 і 1.9 наведені графічні залежності рівня затухання радіосигналу для різних діапазонів та умов розповсюдження радіосигналів.

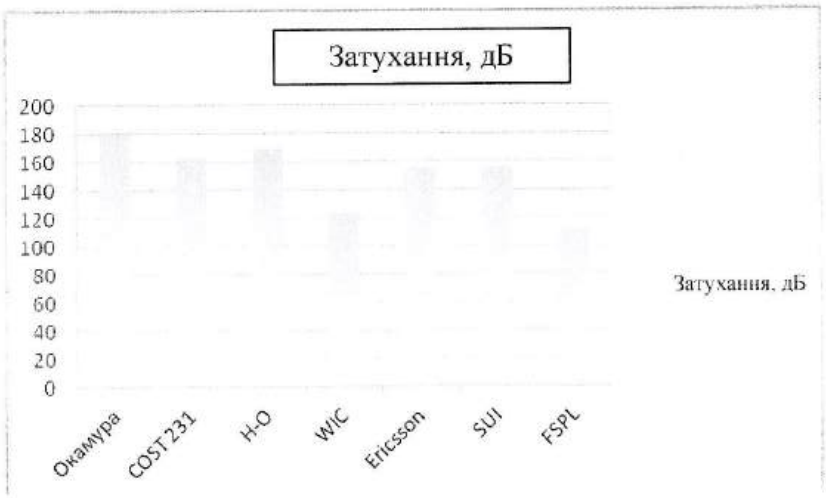
Для більшої наочності на рис. 1.8 і 1.9 представлені діаграми значень втрат потужності радіосигналу на трасі розповсюдження на відстані 3 км від передавача до приймача.

Оскільки в сучасних умовах використання стільникових мереж зв'язку 4G передусім все більше концентрується у великих містах, то саме цей тип місцевості цікавить нас найбільше. Тому на наступному рисунку відображено рівень затхань радіосигналу для діапазонів 2,4 ГГц, 3,5 ГГц, 5 ГГц під час розповсюдження радіосигналу в межах міської забудови.

Із аналізу (див. рис. 1.5 - 1.9) можна зробити наступні висновки:

1. Найбільше розрахункове значення рівня затухань як в умовах міської забудови, передмістя та сільської місцевості буде під час використання емпіричних графіків Окамури. На відстані 3 км між передавачем та приймачем рівень затухань складає близько 180 дБ, найнижчий рівень затухань - модель COST 231 Уолфіша-Ікегамі (близько 135 дБ) (при цьому модель FSPL не враховується);

2. Модель Ericsson показала доволі низький прогноз величини затухань в міському середовищі. Також для неї присутні найменші коливання прогнозованої величини затухань при зміні висоти прийомної антени. Саме величину підйому прийомної антени доволі важко простежити для всіх користувачів, які можуть перебувати у стільнику. Для даної моделі меншому рівню затухань сигналу буде відповідати більш високе підняття антени приймача.



(а)



(б)



(в)

Рис. 1.8. Рівень затухань радіосигналу для діапазону 5 ГГц
(а – сільська місцевість; б – передмістя; в - міська забудова)

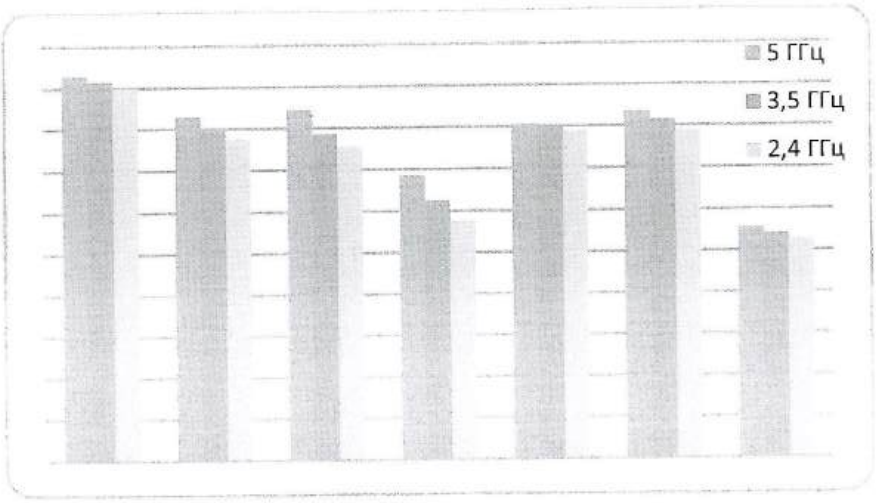


Рис. 1.9. Рівень затухань радіосигналу для діапазонів 1.4 ГГц, 3.5 ГГц, 5 ГГц під час розповсюдження радіосигналу в межах міської забудови

Також дана модель є найменш чутливою до зміни частотного діапазону;

3. Прогнозована величина затухань, розрахована за допомогою використання різних моделей може змінюватись в доволі широких межах. Для різних моделей вона може відрізнятися, навіть, до величини в 20 дБ. Тому очевидно, що всі моделі не можуть однаково точно бути використані при оцінці можливої величини затухань радіосигналу в різних умовах розповсюдження. Проте для декількох моделей, зокрема Хата Cost 231, Ericsson, SUI значення можливих втрат не надто суттєво відрізняються між собою;

4. Для різних типів оточуючого середовища основні характеристики величини затухань змінюються у вузьких межах для всіх моделей розповсюдження радіохвиль. Прогнозована величина затухань може відрізнятись на 2-3 дБ для різних типів місцевості. Максимальні та мінімальні прогнозовані величини затухань належать одним і тим же моделям при зміні типу місцевості. Проте в жодному разі не можна нехтувати впливом типу місцевості на прогнозовану величину затухань радіосигналу.

Проведемо аналіз інших літературних джерел, які стосуються розглянутого питання. В [25] були проведені експериментальні дослідження, присвячені визначею величини затухань радіосигналу для мереж WiMAX в діапазоні 3,5

ГГц. В результаті статистичного аналізу отриманих даних та порівняя з розрахованою величиною затухань в [25] були отримані наступні значення для середньоквадратичного відхилея між виміряним та розрахованим рівнями радіосигналу для умов LOS та NLOS (табл.1.2).

Таблиця 1.2

Значення середньоквадратичного відхилея між виміряним та розрахованим рівнями радіосигналу для умов LOS та NLOS та різних моделей розповсюдження радіохвиль

Середньоквадратичне відхилея	Модель SUI	Модель Хата Cost 231	Модель Ericsson
Для умов LOS, дБ	3,5	6,5	8,8
Для умов NLOS, дБ	13,15	17,81	6,36

За отриманими у табл. 1.1. значеннями можна зробити висновок про те, що в даних умовах проведея експериментальних досліджень найкращі результати були отримані для умов LOS – модель SUI, а для NLOS – модель Ericsson.

В [31] експериментальним шляхом були отриманні дані по затуханню радіосигналу в міських умовах для частоти 2,6 ГГц. В даному випадку для обох можливих сценаріїв LOS та NLOS найкращі розрахункові результати в порівняі із виміряними значеннями показала модель Хата Cost 231.

Таким чином, керуючись результатами проведених досліджень, а також матеріалами, викладеними в [1, 6, 9], можна розробити наступні рекомендації щодо використання моделей розповсюдження радіохвиль для різних діапазонів частот (табл. 1.3). Звісно, більш точні результати можна було отримати під час проведея експериментальних досліджень, проте в рамках даного дослідження проведея експерименту по дослідженню втрат потужності радіосигналу не передбачено.

Таблиця 1.3

Рекомендації щодо використання емпіричних моделей розповсюдження радіохвиль для різних діапазонів частот

Частотний діапазон	Технологія	Рекомендована модель розповсюдження радіохвиль
До 2 ГГц	LTE, WiMAX, GSM, UMTS тощо	Модель Хата
2,3 ГГц; 2,5 ГГц; 2,6 ГГц	LTE, WiMAX	Модель Хата Cost 231
3,5 ГГц	LTE, WiMAX	Stanford University Interim (для умов LOS) та Ericsson (для умов NLOS)
5 ГГц; 5,8 ГГц	WiMAX	Stanford University Interim (для умов LOS) та Ericsson (для умов NLOS)

2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МЕРЕЖ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛІННЯ

2.1 Алгоритм адаптивної зміни тривалості захисного інтервалу під час формування OFDM-сигналу

Відомі способи формування сигналів OFDM [2, 24] дозволяють проводити модуляцію сигналів у сучасних радіосистемах: Wi-Fi, WiMAX, LTE тощо. В зазначених способах для боротьби із явищем міжсимвольної інтерференції, як вже відзначалось раніше, використовується захисний інтервал постійної тривалості T_g. Проте питання щодо адаптивної зміни тривалості цього префіксу у вищезгаданих способах не розглядалось.

В безпроводових системах четвертого покоління (WiMAX та LTE) тривалість захисного інтервалу може складати 1/4, 1/8, 1/16 або 1/32 часу тривалості OFDM символа T_s [11].

Ця тривалість визначається виробником обладнання і є постійною протягом всього періоду експлуатації системи, в якій використовується технологія OFDM. Проте промені радіосигналу можуть проходити досить різний шлях, тому можуть значно запізнюватися і накладатися один на інший. Час багатопроменевості $t_{бп}$ в цьому випадку залежить від довжин пройдених шляхів кожним променем радіосигналу окремо. Тривалість захисного інтервалу T_g обов'язково повинна обиратися із умови $T_g > t_{бп}$, але повинна бути якомога коротшою, щоб підвищити ефективну пропускну здатність каналів із використанням OFDM.

Слід звернути увагу на те, що запропоновані способи не надають змогу адаптивно змінювати тривалість захисного інтервалу. Це не дозволяє повністю використовувати пропускну здатність каналів із OFDM, при цьому нівелюючи вплив міжсимвольної інтерференції. Тому задачею способу адаптивної зміни тривалості циклічного префікса є усунення недоліку, який не надає змогу адаптивно підлаштовуватись під зовнішні умови, змінюючи тривалість циклічного зсуву. Це дозволить більш ефективно використовувати пропускну здатність каналів із викорис-

танням OFDM сигналів.

На рис. 2.1 проілюстровано залежність часу багатопроменевості $t_{бп}$ від різниці відстаней між прямим та відбитим променем у логарифмічній шкалі.

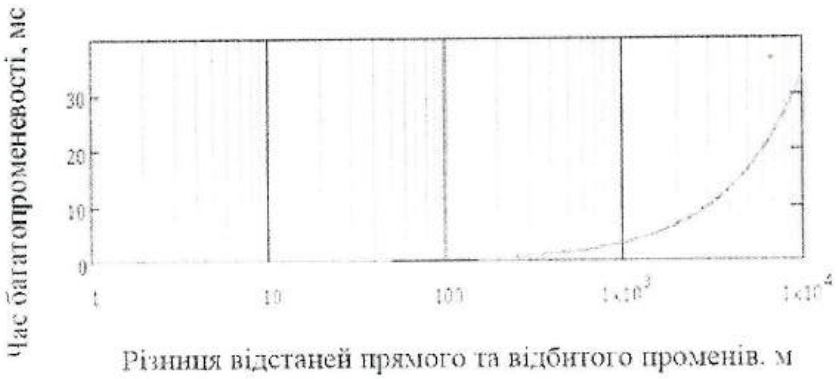


Рис. 2.1. Залежність часу багатопроменевості від різниці відстаней між прямим та відбитим променями

Аналізуючи рис. 2.1, можемо приблизно розуміти, якою має бути величина циклічного префікса для різних відстаней між прямим та відбитим променями.

Вибираючи тривалість циклічного префікса з умови ТЦП > НЗР (він повинен бути більше за найбільшу затримку поширення радіосигналу), вдається уникнути взаємного впливу суміжних за часом символів сусідніх частот. Використання циклічного префікса дозволяє усунути як МКЗ, так і MCI (оскільки префікс одночасно є і захисним інтервалом).

Запобігаючи виникненню MCI і МКЗ, циклічний префікс є одним із способів підвищення завадостійкості зв'язку за рахунок використання часової надмірності. «Плата» за отриманий виграш, як з точки зору енергетичних витрат, так і в сенсі втрат у швидкості передачі інформації однакова і визначається однією і тією ж величиною.

Оскільки, як було зазначено раніше, наприклад, у технологіях WiMAX та LTE можливі наступні тривалості циклічного префіксу: $T_g = 1/4T_s$, $1/8T_s$, $1/16T_s$, $1/32T_s$ (T_s - тривалість OFDM символу без циклічного префікса), то це викликає зменшення корисної швидкості передачі даних $T_s/(T_s - T_g)$: 1,33; 1,142; 1,07; 1,032

для кожної тривалості циклічного префікса відповідно. Для більш наочної ілюстрації наведемо графічні залежності швидкості передавання даних по мережі від довжини траси розповсюдження радіосигналів для різних значень тривалості циклічного префіксу OFDM символів (рис. 2.2).

В цій ситуації для недопущення значного зменшення швидкості передавання даних по мережі необхідним є вибір оптимальної тривалості циклічного префікса для надавання абонентам найбільш швидкісного доступу до ресурсів мережі в залежності від конкретних умов зв'язку (відстані між передавачем та приймачем, кількістю та характером перешкод на шляху розповсюдження радіосигналу тощо).

Час багатопроменевості залежить від довжин пройдених шляхів кожним променем радіосигналу окремо. Довжину подоланої кожним радіосигналом траси можна визначити за наступною формулою:

$$d = \sqrt{\frac{P_T \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi \cdot p(d)}} \,. \tag{2.1}$$

Оскільки на приймальній стороні є наявними відомості про потужність, випромінювану антеною передавача та можливість виміряти потужність прийнятого сигналу, можна приблизно знайти відстань від передавача до приймача, яку було подолано кожним окремим і-тим променем:

$$d_i = \sqrt{\frac{P_T \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi \cdot p(d_i)}} \,. \tag{2.2}$$

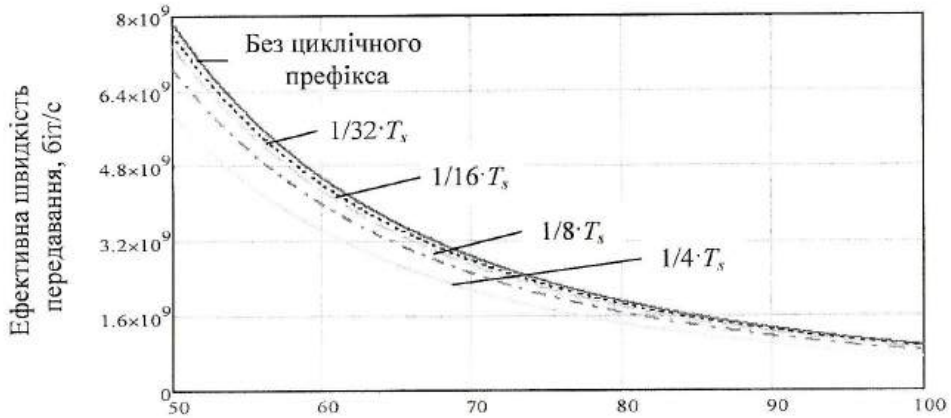
Після цього необхідно знайти мінімальне та максимальне значення відстаней d. Знайшовши їх різницю можна визначити найбільшу різницю довжини ходу променів електромагнітних хвиль. Знаючи цю інформацію, можна визначити час багатопроменевості:

$$t_{бп} = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{c}, \tag{2.3}$$

де с – швидкість світла в вакуумі.



(а)



(б)

Рис. 2.2. Залежність швидкості передавання даних від довжини траси розповсюдження радіохвиль для різних значень величини циклічного префіксу (а – відстань від 10 до 1000 м; б – відстань від 50 до 100 м)

Крім того, розглянуту задачу можна вирішувати, не маючи інформацію про рівень сигналу на передавальній стороні. Для цього за допомогою статистичного аналізу прийнятих радіосигналів на приймальній стороні визначаються сигнали із максимальною P_{max} та мінімальними P_{min} потужностями (в дБ), обчислюється різниця їхніх потужностей P.

Для кожної моделі розповсюдження радіохвиль величина затухань залежить від дальності розповсюдження радіосигналу. Для моделі FSPL прогнозовані втрати можна визначити $PL_{FSPL}=32.45+20\lg(d)+20\lg(f)$

Тоді для найбільшої (2.4) та найменшої відстані (2.5) між передавачем та

приймачем відповідно вирази мають наступний вигляд:

$$P_{minдБ} = P_{продБ} - (32{,}45+20\lg(d_{max})+20\lg(f)), \quad (2.4)$$

$$P_{maxдБ} = P_{продБ} - (32{,}45+20\lg(d_{min})+20\lg(f)). \quad (2.5)$$

Тоді різниця між максимальним та мінімальним рівнями радіосигналу:

$$P_{max\,дБ} - P_{min\,дБ} = P_{продБ} - (32{,}45 + 20\cdot\lg(d_{min}) + 20\cdot\lg(f))P_{продБ} -$$
$$-(32{,}45 + 20\cdot\lg(d_{max}) + 20\cdot\lg(f)) = 20\cdot\lg(d_{max}) - 20\cdot\lg(d_{min})$$

Таким чином, час багатопроменевості $t_{бп}$ визначається за формулою $t_{бп} = \frac{10^{P_{max}/20} - 10^{P_{min}/20}}{c}$, де с – швидкість світла в вакуумі.

Таким чином, даний спосіб [7, 9] дозволяє змінювати тривалість циклічного префіксу OFDM символу, максимально наближаючи її до визначеного на попередньому кроці часу багатопроменевості.

На базі розробленої моделі можна розробити алгоритм адаптивної зміни циклічного префіксу OFDM символу, який дозволить максимально збільшити корисну пропускну здатність каналів, при цьому забезпечуючи належний захист від міжсимвольних та міжканальних завад.

На рис. 2.3 представлений алгоритм зміни тривалості циклічного префікса для конкретного розглянутого прикладу, зокрема, для мереж LTE.

Не всі кроки є детально розписаними, вони більше вказують на порядок дій під час визначення оптимального значення тривалості циклічного префіксу.

Проте існує ряд проблем, які необхідно вирішити для визначення рівня сигналів на різних променях, оскільки зазвичай прийнятий сигнал являє собою суміш прийнятих сигналів з різними амплітудами та фазами [2].

Тому прийом коротких радіохвиль завжди супроводжується зміною в часі рівня прийнятого сигналу, причому ця зміна носить випадковий характер. Таке явище називають завмираннями сигналу.

Очевидно, що при наявності завмирань можна говорити тільки про ймовір-

ності появи того чи іншого рівня сигналу. На сучасних лініях радіозв'язку розрізняють швидкі і повільні завмирання сигналу.

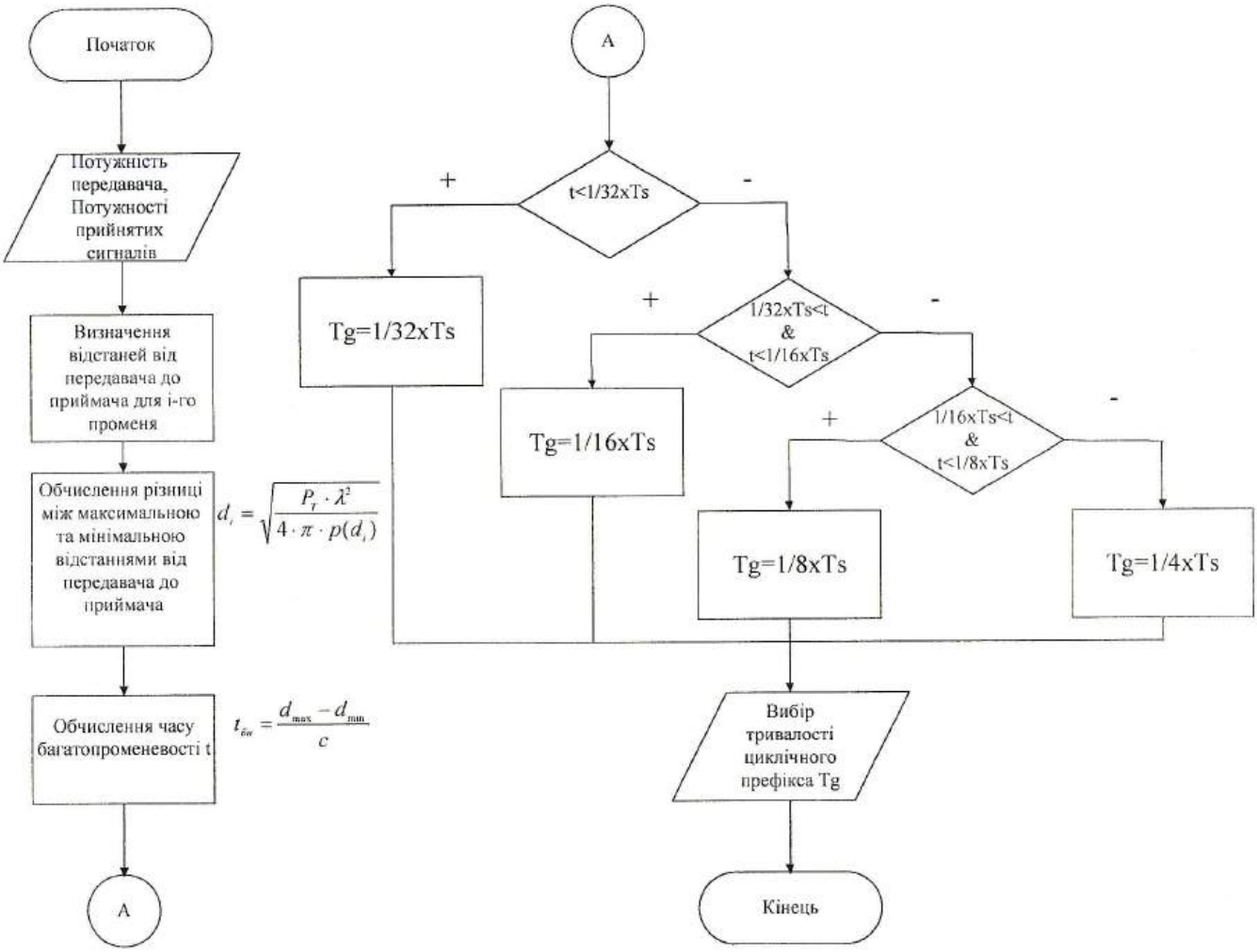


Рис. 2.3. Алгоритм адаптивної зміни циклічного префікса OFDM символа в технології LTE

Визначено, що основною причиною швидких завмирань сигналу є багатопроменеве поширення радіохвиль.

Крім цього, завмирання сигналу викликаються розсіюванням радіохвиль на неоднорідностях іоносфери та інтерференцією розсіяних хвиль.

На практиці всі зазначені причини завмирань сигналу діють одночасно. Завмирання характеризуються їх швидкістю. Швидкість завмирань показує, яке число раз n в одиницю часу обвідна амплітуди сигналу перетинає в позитивному на-

прямку заданий рівень сигналу. Спостереження показали, що при швидких завмираннях для рівнів напруженості поля, які перевищують в 90% часу, середня величина n = 12 в хвилину [20].

Важливою характеристикою завмирань є закон розподілу огинаючої амплітуди сигналу. Швидкі завмирання добре описуються законом розподілу Релея (при інтервалах спостереження 3-7 хв) [1, 20]. Крім швидких завмирань, спостерігаються повільні завмирання, для виявлення яких необхідно вести спостереження протягом 40-60 хв. Причиною цих завмирань є зміна поглинання радіохвиль в іоносфері. Розподіл огинаючої амплітуди сигналу при повільних завмирань підпорядковується логарифмічно-нормальному закону зі стандартним відхиленням близько 8 дБ.

Дивлячись на постійну наявність завмирань, необхідно виокремити тільки корисний сигнал, рівень якого потім буде потрібно використовувати для подальших розрахунків, згідно із алгоритмом (див. рис. 2.3).

У цьому випадку обвідна прийнятого сигналу розподілена по релеєвському закону розподілу [1, 25] $p(r)=\frac{r}{\sigma^2}\cdot\exp\left(-\frac{r^2}{2\cdot\sigma^2}\right)$.

З урахуванням цього і використовуючи вираз (2.6), запишемо функцію розподілення потужності прийнятого сигналу [5]:

$$p(P_r\le x)=p\left(r\le\sqrt{2\cdot x}\right)=1-e^{-x/\sigma^2}. \qquad (2.6)$$

Математичне очікування потужності сигналу $E(P_r)=\sigma^2$.

Завмирання викликають зміну сигналу як мультиплікативні завада. Тому необхідно провести виділення амплітуди сигналу із суміші сигналу та мультиплікативної завади, розподіл якої підкоряється закону Релея.

Визначення рівня сигналу будемо проводити за допомогою функції максимальної правдоподібності.

Суміш сигналу та завади) $u(t)=s(t)\cdot n(t)$, де $s(t)$ - корисний сигнал; $n(t)$ -

завада.

При формуванні OFDM сигналів в сучасних безпроводових системах зв'язку користуються квадратурними гармонічними сигналами. Тому для OFDM сигналів корисний сигнал може бути визначений, як $s(t)=A\cdot\cos(\omega\cdot t+\varphi)$, де A – амплітуда сигналу; ω – циклічна частота; φ - фаза сигналу.

Для дискретних відліків сигналу отримуємо $s(t_i)=A\cdot\cos(\omega\cdot t_i+\varphi)$.

Щільність розподілу суміші корисного сигналу та завади:

$$f(u)=f(n)\cdot\frac{dn}{du}\ . \tag{2.7}$$

Щільність розподілу завади підпорядковується закону Релея $f(n)=\frac{n}{\sigma^2}\cdot\exp\left(-\frac{n^2}{2\cdot\sigma^2}\right)$, n>0.

Похідна від зворотної функції:

$$\frac{dn}{du}=\frac{1}{s(t)}\ . \tag{2.8}$$

Виконавши диференціювання (2.8), підставляючи отриманий вираз в (2.7), отримуємо:

$$f(u)=\frac{1}{s(t)}\cdot\frac{u}{s(t)\cdot\sigma^2}\cdot\exp\left(-\frac{u^2}{2\cdot s^2(t)\cdot\sigma^2}\right). \tag{2.9}$$

В точці екстремуму $\frac{ds}{dA}=0$, тоді звідси слідує:

$$-2\cdot n\cdot A^2+\sum_{i=1}^{n}\frac{u_i^2}{\cos(\omega\cdot t_i+\varphi)\cdot\sigma^2}=0. \tag{2.10}$$

Таким чином, можливим є виділення амплітуди корисного сигналу із послідовності отриманих на приймальній стороні значень сигналу, що є підтвердженим за допомогою комп'ютерного моделювання. Для вибірки із 1000 чисел відносна

похибка визначення амплітуди корисного сигналу не перевищує 0,1 %.

Для отриманого алгоритму можливо запропонувати структурну схему пристрою для адаптивної зміни тривалості циклічного префікса OFDM-символа при формуванні OFDM-сигналів (рис. 2.4).

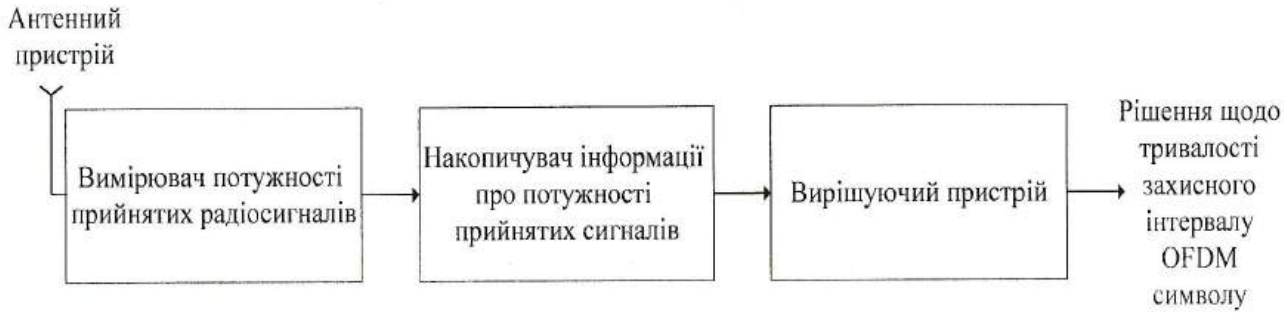


Рис. 2.4. Пристрій для адаптивної зміни тривалості циклічного префікса OFDM-символа при формуванні OFDM-сигналів

Пристрій для адаптивної зміни тривалості циклічного префікса OFDM-символа при формуванні OFDM-сигналів [14] містить у своєму складі антенний пристрій, вимірювач потужності прийнятих радіосигналів; накопичувач інформації про потужності прийнятих сигналів; вирішуючий пристрій.

Пристрій для адаптивної зміни тривалості циклічного префікса OFDM-символа при формуванні OFDM-сигналів працює наступним чином.

Антеною приймається корисний радіосигнал. В вимірювачі потужності прийнятого радіосигналу визначається потужність прийнятих сигналів. Після цього відомості про виміряну потужність надходять до накопичувача інформації про потужність радіосигналів, з якого дані передаються на вирішуючий пристрій. У вирішуючому пристрої відбувається вибір сигналів із максимальною та мінімальною потужностями, обчислення часу багатопроменевості та вибір оптимальної тривалості циклічного префікса за допомогою запропонованого алгоритму. Це значення передається до формувача OFDM символів.

2.2 Регулювання випромінюваної потужності базових станцій в залежності від погодних умов

В процесі експлуатації сучасних стільникових мереж можуть виникати проблеми із передачею даних, пов'язані із рівнем потужності радіосигналу на приймальній стороні. Оскільки на функціонування каналів радіозв'язку завжди впливають різноманітні види завмирань, що є основною перешкодою для якісного та надійного передавання радіосигналів, то необхідно враховувати постійний вплив цих різних типів завмирань, які можуть бути викликані гідрометеорами, затуханнями в атмосферних газах тощо. Одним із ефективних методів боротьби із завмираннями, з погляду теорії автоматичного управління є метод зворотнього зв'язку [26, 31] для забезпечення регулювання випромінюваної передавачами потужності радіосигналу.

Суть цього методу полягає в тому, що інформація про стан прямого тракту радіозв'язку та відповідну зміну параметрів сигналу передавання на вході радіоприймача передається по каналу зворотнього зв'язку, тобто з боку радіоприймача на радіопередавач. Прямий канал радіозв'язку разом із зворотнім каналом радіоуправління (в якому використовується метод зворотнього зв'язку) являють собою динамічну замкнену систему автоматичного управління [16].

Подібні системи розглянуті в ряді вітчизняних досліджень, але їхній аналіз та синтез з погляду теорії автоматичного управління у відомій літературі відсутній.

У сучасних системах радіодоступу необхідно максимально враховувати умови розповсюдження радіохвиль в каналі зв'язку і адаптуватися до них шляхом вибору найбільш підходящої схеми модуляції і кодування MCS (Modulation and Coding Scheme). Квадратурна амплітудна модуляція QPSK/16QAM/64QAM можуть комбінуватися із завадостійким кодуванням з різними швидкостями.

У всіх сучасних стільникових мережах підтримуються процедури управління потужністю передавачів абонентських станцій для боротьби із завмираннями і компенсації втрат на лінії. У класичному алгоритмі потужність випромінювання

користувальницьких сигналів повинна встановлюватися такою, щоб рівні сигналів різних користувачів надходили на вхід приймача базової станції з відношенням сигнал/шум, рівним деякому пороговому значенню. Саме такий алгоритм використовується в мережах WiMAX [9].

У LTE застосовується модифікований алгоритм - часткове управління потужністю FPC (Fractional Power Control) [14]. Порогове відношення сигнал/шум змінюється для користувачів залежно від їх положення всередині стільників: чим ближче UE до базової станції, тим більше поріг відношення сигнал/шум як критерій регулювання потужності. Таким чином, поблизу базової станції UE працює з більш високим відношенням сигнал/шум, з більш високою схемою MCS, а значить, з більш високою спектральною ефективністю. Крім того, працюючи з підвищеною потужністю, UE справляється з внутрішньосистемною інтерференцією – зменшує вплив міжканальних перешкод, що критично в мережах з коефіцієнтом перевикористання частот. Крім того, кожна базова станція LTE контролює рівень перешкод від сусідніх стільників. Періодично базові станції обмінюються індикаторами перевантаження OI (Overload Indicator), що вказує, в якому ресурсному блоці рівень перешкод перевищує порогове значення. Індикатор OI формується за результатами вимірювання базовою станцією рівнів завад і фонового шуму для кожного частотного блоку в стільнику. Параметри управління потужністю встановлюються в залежності від прийнятого OI: якщо для будь-якого блоку вказується високий рівень перешкод, то базова станція передає команду знизити потужність UE, випромінюючого в даному ресурсному блоці, як продемонстровано на рис. 2.5.

Крім того, відомі способи організації стільникових мереж [2, 5, 9] та методи регулювання випромінюваної потужності базових станцій (БС) та мобільних станцій (МС) передбачають зміну потужності передавачів БС та МС, в залежності від виміряного рівня прийнятого радіосигналу. Тоді приймається рішення про підвищення або зменшення випромінюваної потужності радіопередавачів БС та МС до рівня, необхідного для якісного зв'язку. Дані алгоритми успішно використовуються в стільникових мережах другого, третього та четвертого поколінь [6, 9, 14].

На якість зв'язку сильно впливає багатопроменевий характер розповсюдження радіохвиль. Тому при незначній зміні місцезнаходження МС рівень сигналу може значно зменшитись. Навіть може відбутися розрив зв'язку. Тому крім керування потужністю використовуються алгоритми хендоверу (передачі виклику від однієї БС до іншої) [14].

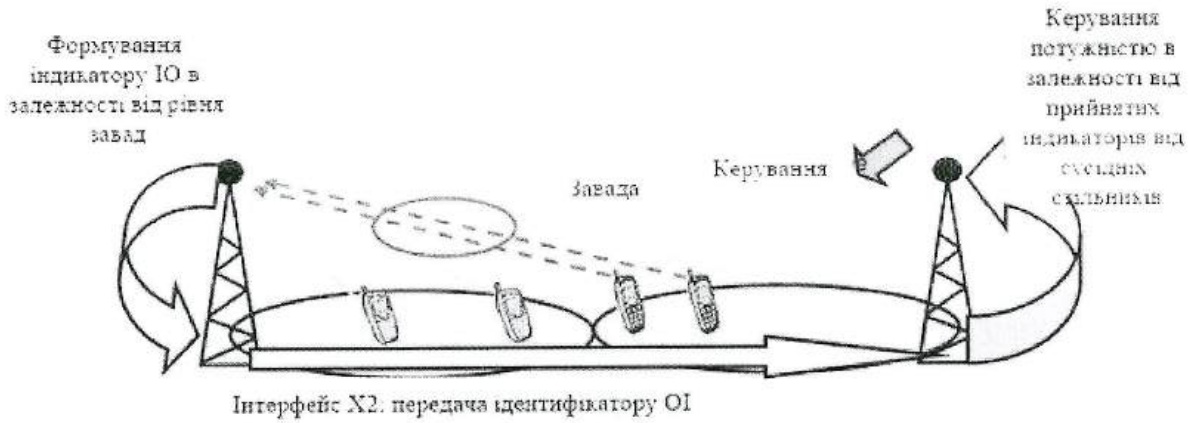


Рис. 2.5. Часткове управління потужністю FPC (Fractional Power Control) в мережах LTE

Виконання вищезгаданих алгоритмів відбувається відповідно до внутрішніх процедур конкретних технологій побудови стільникових мереж зв'язку. Важливу роль в процесі регулювання потужності радіопередавальних пристроїв відіграють чутливість приймачів, потужність передавачів, відстань між передавачем та приймачем, кількість та характер перешкод, рельєф підстилаючої поверхні. При цьому якість зв'язку залежить від співвідношення сигнал/шум на вході приймальних пристроїв, яке зменшується внаслідок розповсюдження радіосигналу на відстань, поглинання атмосферними газами, гідрометеорами тощо.

При цьому розрахована за допомогою розробленого в другому розділі методу швидкість передавання даних зменшується за законом, представленим на рис. 2.6. Дана графічна залежність побудована для використовуваної моделі розповсюдження радіосигналу – Ericsson, на відстані 100 м від передавача до приймача, частота радіосигналу – 2,4 ГГц, потужність передавача – 20 Вт, тип місцевості – місто.

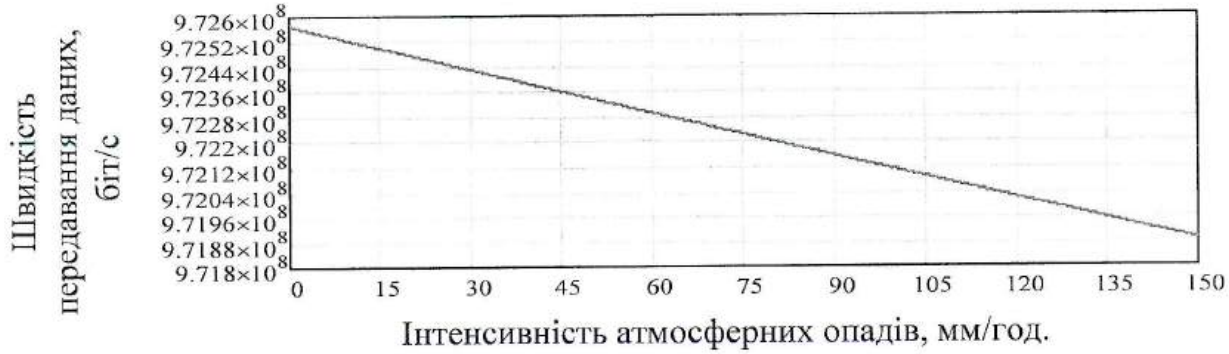


Рис. 2.6. Залежність швидкості передавання даних від інтенсивності атмосферних опадів

На наступному рис. 2.7 представлена графічна залежність для вищерозглянутих умов, проте за відсутності атмосферних опадів та за умов зміни температури навколишнього середовища.

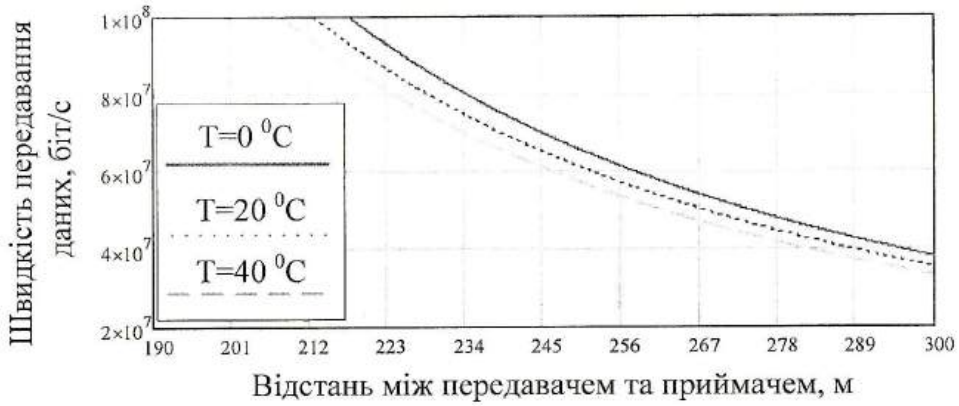


Рис. 2.7. Залежність швидкості передавання даних від дальності зв'язку для різних значень температури навколишнього середовища

На наступному рис. 2.8 представлена залежність швидкості передавання даних від температури навколишнього середовища на відстані 100 м між передавачем та приймачем.

Як видно з останніх залежностей (див. рис. 2.6 - 2.8), швидкість передавання даних у безпроводових мережах в значній мірі залежить від метеорологічних умов, тому необхідною є розробка алгоритмів, які б дозволили залишати на постійному рівні швидкість передавання даних, не зважаючи на зміну метеорологіч-

них умов.

Існуючі алгоритми регулювання потужності передавачів радіопередавальних пристроїв надають змогу підвищити випромінювану потужність до того рівня, який необхідний для проведення якісного сеансу зв'язку шляхом вимірювання рівня потужності радіосигналу. Проте, може виникнути ситуація, коли рівень сигналу може різко впасти нижче припустимого рівня, що призведе до обриву радіозв'язку (наприклад, в умовах впливу сильного дощу, туману, снігопаду, смогу тощо). В цьому випадку вже буде неможливо проводити обмін керуючою або корисною інформацією між передавальними та приймальними пристроями.

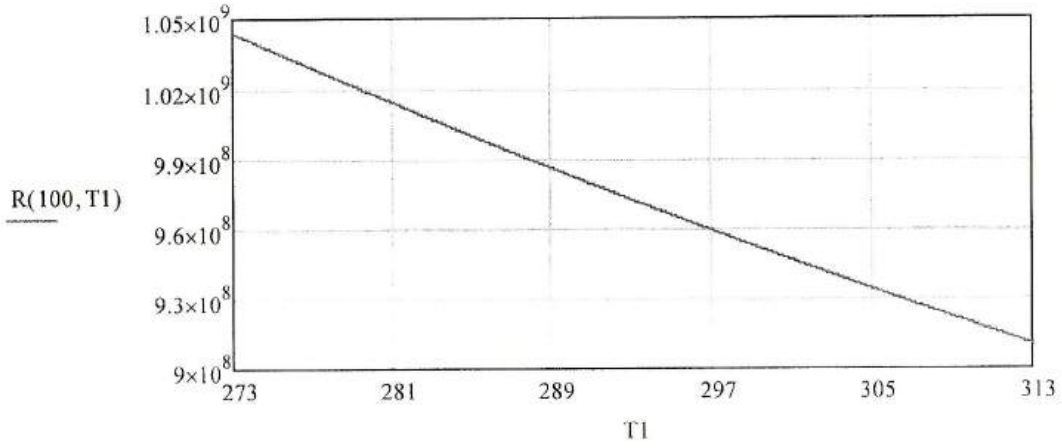


Рис. 2.8. Залежність швидкості передавання даних від температури навколишнього середовища на відстані 100 м між передавачем та приймачем

Як вже було зазначено, в стільникових мережах 4-го покоління також можливе використання алгоритмів автоматичного зрушення швидкості передавання даних в залежності від фактичного виміряного співвідношення сигнал/шум на приймальній стороні. Проте в цьому випадку при падінні рівня потужності радіосигналу внаслідок метеорологічних умов (наприклад, підвищення температури, поглинання в атмосферних газах, гідрометеори, туман) можна зазнати значних втрат по швидкості передавання даних, що може не задовольняти кінцевих користувачів телекомунікаційних ресурсів стільникових мереж зв'язку.

Таким чином, основним завданням, яке повинен вирішувати запропонова-

ний спосіб, є адаптивне регулювання потужності передавальних пристроїв стільникових мереж (МС та БС), в залежності від метеорологічних умов, що повинно надати змогу забезпечувати високу якість зв'язку за різноманітних метеорологічних умов.

Автором пропонується вирішувати поставлене завдання тим, що керування потужністю необхідно проводити саме в залежності від метеорологічних умов. Це може надати змогу підтримувати якість зв'язку на належному рівні, навіть за складних метеоумов.

В ході дослідження розроблено спосіб регулювання потужності радіопередавальних пристроїв стільникових мереж зв'язку. В запропонованому способі необхідно використовувати телеметричні датчики, які певним чином потрібно підключати до БС. Вони збирають інформацію щодо відхилення кліматичних умов від нормальних (температура оточуючого середовища: $+20^0$ +/- 5 ^{0}C; відносна вологість: 60+/-15%; атмосферний тиск: від 84 кПа до 107 кПа). Зокрема, визначають температуру оточуючого середовища, вологість повітря, характеристику та кількість опадів (дощ, сніг, їх інтенсивність), наявність туману (його характеристики). Спочатку обов'язково необхідно встановити початковий рівень випромінюваної потужності радіопередавачів $P_{прд0}$ (в дБ або дБм) за певних початкових умов (наприклад, за температури +20 ^{0}C, відносній вологості повітря 60+/-15 %, за відсутності гідро метеорів). Цей рівень потужності випромінювання приймається за еталонний, відносно якого відбуватиметься зміна рівня потужності передавальних пристроїв на величину ΔP, в залежності від метеорологічних умов. Виміряну телеметричну інформацію зберігають в спеціалізованій базі телеметричних даних (СБТД), яка може зберігатися на спеціалізованих серверах. Після запису інформацію обробляють за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (СПЗ) в обчислювальному центрі базової станції. За допомогою СПЗ приймається рішення про необхідність збільшення або зменшення випромінюваної потужності радіопередавальних пристроїв.

В даній роботі пропонується, що величина зміни рівня потужності радіопередавальних пристроїв стільникових мереж ΔP буде включати в себе потужність

на компенсацію затухань від гідрометеорів $\Delta P_{гм}$, на компенсацію затухань радіосигналу в атмосферних газах $\Delta P_{аг}$, на температурну компенсацію $\Delta P_{тк}$, на компенсацію затухань в тумані $\Delta P_{тум}$.

Спочатку за допомогою телеметричних датчиків необхідно встановити наявність гідрометеорів, туману. Якщо вони присутні, то рівень їх погонної компенсації обчислюють за допомогою СПЗ:

- для туману [12]:

$$g_c = K_1 M \qquad \text{дБ/км}, \tag{2.11}$$

де g_C - погоне послаблення (дБ/км) в умовах хмарності; K_1 - коефіцієнт погонного послаблення ((дБ/км)/(г/м^3)); М - густина рідкої води в хмарності або тумані (г/м^3).

Для обчислення значення коефіцієнта погонного послаблення K_1 для частот до 1000 ГГц використовують математичну модель:

$$K_l = \frac{0{,}819 f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \qquad \text{(дБ/км)(г/м}^3\text{)}, \tag{2.12}$$

де f - частота (ГГц) і

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}. \tag{2.13}$$

Комплексна діелектрична проникність води задається виразами:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p\left[1 + (f/f_p)^2\right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s\left[1 + (f/f_s)^2\right]}, \tag{2.14}$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\left[1 + (f/f_p)^2\right]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\left[1 + (f/f_s)^2\right]} + \varepsilon_2, \tag{2.15}$$

де:

$$\varepsilon_0 = 77{,}6 + 103{,}3\,(\theta - 1); \tag{2.16}$$

$$\varepsilon_1 = 5{,}48; \tag{2.17}$$

$$\varepsilon_2 = 3{,}51; \tag{2.18}$$

$$\theta = 300 / T, \tag{2.19}$$

а Т - температура (К).

Головні та вторинні частоти релаксації:

$$f_p = 20{,}09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \text{ ГГц}, \tag{2.20}$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \text{ ГГц}. \tag{2.21}$$

На рис. 2.9 [19] проілюстровано залежність погонного ослаблення крапельками води при різних температурах в залежності від частоти. Ослаблення достатньо суттєво відчувається на частотах вище 5 ГГц. Таким чином, значного послаблення можуть зазнати сигнали, які передаються у мережах WiMAX, а також радіосигнали, якими обмінюються базові станції між собою, використовуючи радіорелейні системи передачі. Проте в сучасних стільникових мережах при розповсюдженні радіохвиль в умовах індустріальних районів на радіосигнали може вплинути смог, який утворюється із води, пари, диму, інших хімічних домішок, які здатні чинити вплив на процес розповсюдження радіосигналу в діапазонах частот нижче 5 ГГц (до 20-30 дБ) [10].

Розрізняють два основні види смогу на території України – фотохімічний та промисловий. Наявність фотохімічного смогу характерно практично для всіх сучасних великих міст, але найбільш часто він спостерігається в містах з перевагою сонячних днів, з сухим і теплим кліматом, великою кількістю автомобілів.

Промисловий смог складається, головним чином, із суміші діоксиду сірки, зважених крапельок сірчаної кислоти, що утворюється з частини діоксиду сірки, і різноманітних зважених твердих частинок, джерелами котрих є спалювання сірковмісних вугілля і нафти.

Тому, як бачимо, наявність смогу гарантована майже всім найбільшим містам України із високим рівнем розвитку важкої промисловості та великою кількістю населення. До них відносять Донецьк, Харків, Дніпропетровськ, Запоріжжя,

Одеса та інші.

Отже, складні погодні умови можуть значно впливати на рівень потужності радіосигналу в цих містах, а тому і на допустиму швидкість передавання даних по каналах мереж 4G.

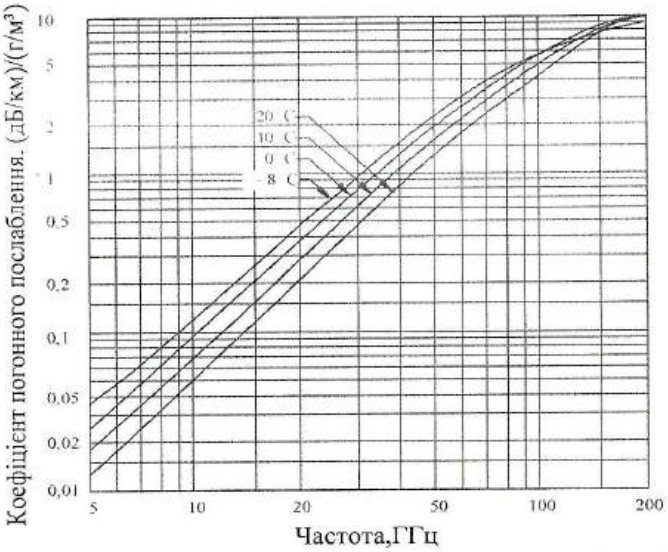


Рис. 2.9. Залежність погонного ослаблення крапельками води при різних температурах в залежності від частоти [9]

- для гідрометеорів [8]:

$$\gamma_R = kR^{\alpha}, \tag{2.22}$$

де R – інтенсивність атмосферних опадів.

Коефіцієнти k і α можуть альтернативно визначають в функції частоти з нижченаведених рівнянь,:

$$\log k = \sum_{j=1}^{3}\left(a_j \exp\left[-\left(\frac{\log f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log f + c_k \tag{2.23}$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^{4}\left(a_i \exp\left[-\left(\frac{\log f - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \right) + m_\alpha \log f + c_\alpha , \tag{2.24}$$

де f - частота (ГГц); k або k_H або k_V; α або α_H або α_V.

На рис. 2.10 проілюстрована залежність погонного затухання в гідрометеорах в залежності від частоти радіосигналу для різних значень інтенсивності атмосферних опадів.

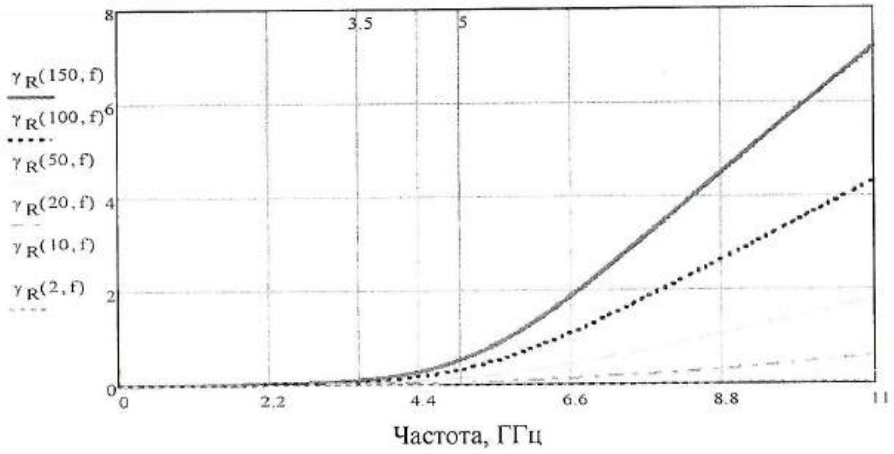


Рис. 2.10. Залежність погонного затухання в гідро метеорах в залежності від частоти радіосигналу

Тоді можна визначити повний рівень компенсації потужності:

- для туману:

$$\Delta P_{тум} = g_c \cdot l_{еф}, \tag{2.25}$$

- для гідрометеорів:

$$\Delta P_{гм} = \gamma_R \cdot l_{еф} \tag{2.26}$$

У виразах (2.25) та (2.26) $l_{еф}$ – це ефективна довжина траси розповсюдження сигналу. Для стільникових мереж зв'язку за значення $l_{еф}$ приймемо теоретично розрахований радіус стільника, який визначають під час планування стільникової мережі.

Якщо гідрометеори або туман відсутні, то рівень компенсації приймають рівним 0, тобто $\Delta P_{тум}$ =0 та/або $\Delta P_{гм}$=0.

Потім за допомогою СПЗ обчислюють величину згасання радіохвиль, викликане молекулярним поглинанням їх у газах атмосфери на інтервалі радіолінії,

яке є еквівалентом [7]:

$$\Delta P_{аг} = V_{Г} = -\gamma_{АГ} R_0, \text{ дБ}, \tag{2.27}$$

де $\gamma_{АГ}$, дБ/км, – погонне затухання радіохвиль в газах атмосфери із урахуванням температурної корекції.

$$\gamma_{АГ} = [1 - 0{,}01(t - 15)]\gamma_0 + [1 - 0{,}006(t - 15)]\gamma_B, \tag{2.28}$$

де γ_O, дБ/км, – погонне затухання радіохвиль в кисні; γ_B, дБ/км, – погонне затухання радіохвиль в водяній парі атмосфери; t – температура повітря, ^{0}C.

Спрощений вираз для погонного затухання в кисні атмосфери, дБ/км, для діапазону частот менше за 57 ГГц за нормального атмосферного тиску і температурі 15 °С має наступний вигляд:

$$\gamma_O = \left(7{,}19 \cdot 10^{-3} + \frac{6{,}09}{f^2 + 0{,}227} + \frac{4{,}81}{(f - 57)^2 + 1{,}5}\right) f^2 \cdot 10^{-3}, \tag{2.29}$$

де f – частота, ГГц.

На рис. 2.11 проілюстровано залежність погонного затухання в атмосферних газах від частоти радіосигналу в діапазоні від 0 до 10 ГГц (рис. 2.11 (а)) та від 0 до 100 ГГц (рис. 2.11 (б)).

У виразі (2.27) $R_0 = l_{еф}$.

Вплив гідрометеорів помітно вже при частотах більше 8 ГГц, а в несприятливих екологічних умовах (при наявності в атмосферних опадах металізованої пилу, смогу, кислот або лугів) і на значно більш низьких частотах. На цих частотах величина затухань в гідрометеорах може становити до 10 дБ [8, 9].

Потім за допомогою СПЗ обчислюють величину температурної компенсації за формулою [8]:

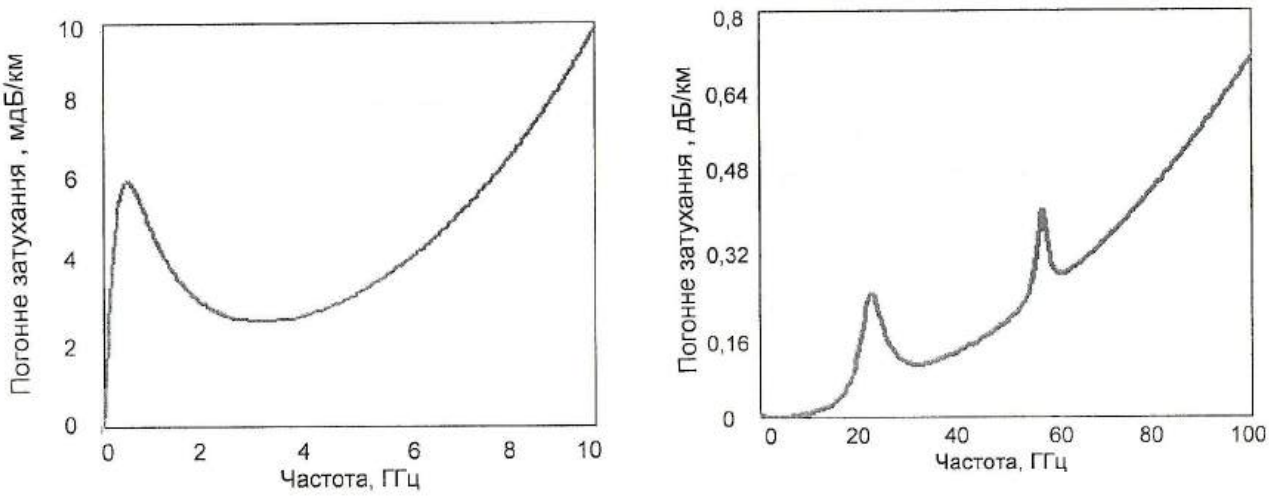
$$\Delta P_{тк} = 10 \cdot \lg(kTR) \text{ (дБ)}, \tag{2.30}$$

де k =1,38·10^{-23} Дж/к – стала Больцмана; T – абсолютна температура (К); R – необхідна швидкість передавання даним в стільниковій мережі (біт/с).

Потім визначають величину зміни рівня потужності радіопередавальних пристроїв стільникових мереж ΔP:

$$\Delta P = \Delta P_{тк}+\Delta P_{тум}+\Delta P_{гм}+\Delta P_{аг.} \quad (2.31)$$

При цьому в (2.31) доданки $\Delta P_{тум},\Delta P_{гм},\Delta P_{аг} \geq 0$; $\Delta P_{тк}$ може бути як доданім, так і від'ємним. Тобто, за останнім параметром випромінювана потужність може як збільшуватись, так і зменшуватись.



(а) (б)

Рис. 2.11. Залежність погонного затухання в атмосферних газах від частоти радіосигналу в діапазоні від 0 до 10 ГГц (а) та від 0 до 100 ГГц (б)

Після проведених обчислень ΔP приймають рішення про зміну потужності передавачів БС стільникових мереж зв'язку саме на величину ΔP. Потім вже БС формують керуюче повідомлення, в якому передають рекомендації щодо зміни потужності передавачів МС на величину ΔP.

3 ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗПРОВОДОВИХ КАНАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ MIMO-OFDM

3.1 Оцінка пропускної здатності MIMO-OFDM системи технології LTE

Оцінка пропускної здатності MIMO-OFDM системи. Для проведення експериментальних досліджень пропускної здатності каналів мереж із використанням технології MIMO-OFDM пропонується обрати загальнодоступне обладная мереж стандарту LTE. Вибір обумовлено можливістю відносно легкого налаштування мережевого обладная, великою кількістю програмних продуктів для проведея вимірювань пропускної здатності безпроводового каналу. При цьому в мережах даного стандарту вдало поєднано використання досліджуваних технологій MIMO та OFDM. У зв'язку із цим, наведемо методику оцінки пропускної здатності мереж стандарту LTE.

Розглянемо частковий випадок для одноканальної системи SISO та для сценарію розповсюдження радіохвиль тільки всередині приміщея. Для подальших досліджень використовується модель Хата для внутрішньо-внутрішнього сценарію розповсюдження електромагнітного випромінювання (коли приймач та передавач розташовані в межах багатоповерхової будівлі).

Оцінку пропускної здатності мережі для конкретного випадку для внутрішньо-внутрішнього сценарію розповсюдження радіохвиль, тобто всередині приміщея.

Аналітичний вираз для моделі Хата для внутрішньо-внутрішнього сценарію розповсюдження радіосигналу в загальному випадку має наступний вигляд [30]:

$$L = L_{fc} + L_c + \sum_{i=1}^{n}\left(h_i \cdot L_{\omega i}\right) + k_f^{\frac{k_f+2-b\times(k_f+1)}{k_f+1}} \cdot L_f, \qquad (3.1)$$

де L_{fc} - втрати розповсюдження у вільному просторі; L_c - постійні втрати

(визначаються експериментальним шляхом); k_f - кількість подоланих поверхів на шляху розповсюдження; h_i - кількість подоланих стін на шляху розповсюдження; $L_{\omega i}$ - втрати у стіні типу і (де і – тип будівельного матеріалу перешкоди); L_f - втрати між суміжними поверхнями; b – емпіричний параметр (b=0,46); n – кількість перешкод на шляху розповсюдження радіосигналу.

Беручи до уваги (2.23), внутрішньо-внутрішній сценарій розповсюдження радіохвиль (тобто будуть відсутні затухання, викликані кліматичними умовами), відсутність підсилея на приймальній та передавальній антенах, а також, використовуючи в якості моделі для розрахунку втрат радіосигналу в приміщеі модель Хата, маємо наступне.

Потужність сигналу $S = P_{с/ш} \cdot kTR$, або в децибелах:

$$S_{дБ} = 10\lg(P_{с/ш} \cdot kTR). \tag{3.2}$$

З іншого боку, потужність сигналу на вході приймача визначається як

$$S_{дБ} = P_{прд} - L, \tag{3.3}$$

$$S_{дБ\min} = P_{прм\min}, \tag{3.4}$$

де $P_{прм\min}$ - чутливість приймача.

В результаті виконання простих алгебраїчних перетворень маємо:

$$S_{дб} = P_{прд} - \left[32,4 + 20 \cdot \lg\left(\frac{d}{1000}\right) + 20 \cdot \lg(f) + L_c + \sum_{i=1}^{n} \frac{h_i \cdot k_i}{\cos(\alpha_i)} + k_f^{\frac{k_f+2-b\cdot(k_f+1)}{k_f+1}} \cdot L_f \right] \tag{3.5}$$

Врахувавши (2.24), маємо:

$$10 \cdot \lg(P_{с/ш} \cdot k \cdot T \cdot R) = P_{прд} - \left[32,4 + 20 \cdot \lg\left(\frac{d}{1000}\right) + 20 \cdot \lg(f) + L_c + \sum_{i=1}^{n} \frac{h_i \cdot k_i}{\cos(\alpha_i)} + k_f^{\frac{k_f+2-b\cdot(k_f+1)}{k_f+1}} \cdot L_f \right], \tag{3.6}$$

З виразу (2.28) шляхом елементарних алгебраїчних перетворень отримуємо:

$$R_i = 10^{\frac{P_{прдi} - \left[32{,}4+20\cdot\lg\left(\frac{d}{1000}\right)+20\cdot\lg(f)+L_c+\sum_{i=1}\frac{h_i\cdot k_i}{\cos(\alpha_i)}+k_f^{\frac{k_f+2-b\cdot(k_f+1)}{k_f+1}}\cdot L_f\right]+30}{10}} \cdot \frac{1}{P_{с/шi}\cdot k\cdot T}, \quad (3.7)$$

Загальна пропускна здатність каналу антенної системи MIMO дорівнює сумі пропускних здатностей власних підканалів:

$$R_{max}=\sum_{i=1}^{k} R_i, \quad (3.8)$$

де k – кількість каналів антенної системи MIMO.

У виразах (3.7) та (3.8) прийняті наступні позначея.

$P_{прдi}$ - потужність передавача точки доступу, яка надходить в і-тий власний підканал MIMO системи;

$L_c = 35-37$ дБм – постійні втрати;

f – номінальна частота робочого діапазону для конкретної системи;

$P_{с/шi}$ – необхідне відношея сигнал-шум на вході приймача в і-тому власному підканалі MIMO системи;

k=1,38x10^{-23} Дж/к – стала Больцмана;

n – кількість перешкод на шляху розповсюдження радіосигналу;

h_i – товщина і-тої перешкоди;

k_i – коефіцієнт затухання і-тої перешкоди;

α_i – кут між променем падіння радіохвилі до і-тої перешкоди і нормаллю, проведеною до даної перешкоди;

k_f - кількість подоланих радіохвилею суміжних поверхонь;

L_f - втрати на подолання суміжних поверхонь для заданого частотного діапазону;

T – абсолютна температура в Кельвінах (середня температура в приміщеях за нормальних умов T = 20°C = 293K);

d – максимально можлива дальність передавання даних в конкретному випадку.

Відношення сигнал-шум вибирається із виразів (графіків), що отримані для імовірностей помилок в залежності від типу модуляції та кодування інформації [37].

Максимально допустима імовірність помилок зазвичай відображена в документації для конкретного обладная безпроводової технології передавання даних.

На основі отриманих результатів, що викладені вище, розроблено алгоритм визначея швидкості передавання даних по каналах антенних систем MIMO.

Для заданого алгоритму відношея сигнал/шум обчислюється з урахуваям задіяного виду модуляції згідно формули (2.13).

Вхідними даними для задачі оцінки пропускної здатності антенних систем MIMO будуть наступні величини (табл. 3.1).

Алгоритм визначається наступною послідовністю дій.

Крок 1. Визначея потужності передавача БС або точки доступу.

Крок 2. Визначея температури приміщея (зовнішнього середовища).

Крок 3. Визначея кількості абонентів мережі, що припадають на одну БС або точку доступу.

Крок 4. Визначея максимальної необхідної дальності передавання даних.

Крок 5. Визначея габаритів, характеру та матеріалу перешкод, кута розповсюдження радіохвиль відносно перешкод.

Крок 6. Визначея типу використовуваної модуляції. Спочатку обирається максимально допустимий вид модуляції, що здатен забезпечити максимально допустиму швидкість передавання даних.

Крок 7. Розрахунок необхідного відношея сигнал/шум на вході приймачів, що забезпечує нормальне функціонування системи та допустиму імовірність бітової помилки.

Крок 8. Безпосередньо розрахунок швидкості передавання за формулою. Якщо значення розрахованої швидкості передавання не може бути досягнутим

для обраному на кроці 6 виду модуляції, то необхідно повернутися до кроку 6 та обрати модуляцію, яка зможе забезпечити необхідну швидкість передавання.

Таблиця 3.1

Вхідні дані для оцінки пропускної здатності каналів MIMO-OFDM систем

№ з./п.	Параметр	Опис параметру
1	Температура навколишнього середовища, К	Використовується для визначея величини теплового шуму
2	Потужність передавача точки доступу, дБм	Зазвичай наводиться в технічній документації до конкретного пристрою
3	Кількість абонентів безпроводової мережі	Визначає кількість фактично підключених до мережі абонентів
4	Дальність передавання даних	Визначається радіусом необхідної зони обслуговування. Залежить від розмірів приміщень
5	Характеристика приміщень	Включає габарити, характер та матеріал перешкод, кут розповсюдження радіохвиль відносно перешкод
6	Допустимі види модуляції	Включає перелік допустимих видів модуляції у відповідності до необхідного співвідношення сигнал/шум

Таким чином, на базі отриманої моделі у програмному пакеті MathCad були побудовані графічні залежності швидкості передавання даних по мережі із використанням антенних систем MIMO в конфігурації (2x2) від дальності зв'язку (рис. 3.1 та рис. 3.2).

Аналогічним чином із формули (2.20) можна отримати вираз для обчислея максимально допустимого радіусу зон обслуговування сучасних безпроводових

систем [28]

$$d_{\max} = 10^{\frac{P_{прд} - \left[32{,}4 + 20\lg(f) + L_c + \sum \frac{h_i \cdot k_i}{\cos(\alpha_i)} + k_f^{\frac{k_f+2-b\times(k_f+1)}{k_f+1}} \cdot L_f + 10\lg(P_{c/ш} \cdot kTR_{\min}) \right]}{20}}.$$

У останньому виразі прийняті такі ж умовні позначея, як і в виразі (2.30).

Наведемо графічний матеріал, який ілюструє залежність радіусу зони обслуговування точки доступу від кількості абонентів та необхідної швидкості передавання даних (рис. 3.3). Різкі стрибки дальності зв'язку пов'язані із алгоритмом автоматичного зрушення швидкості в технології LTE [13].

Тому, як видно, за допомогою розробленої методики можна провести оцінку ефективної швидкості передавання в каналах антенних систем MIMO, в залежності від типу рельєфу місцевості, кількості та характеру перешкод, висот підвісу прийомної та передавальної антен, частоти радіосигналу, ширини використовуваної смуги частот, конфігурації антенної системи MIMO тощо.

Вибір методики та обладная для проведея експериментального дослідження пропускної здатності мережі технології LTE. Для проведея експериментальних досліджень обираємо обладання MIKROTIK R11E-LTE [25].

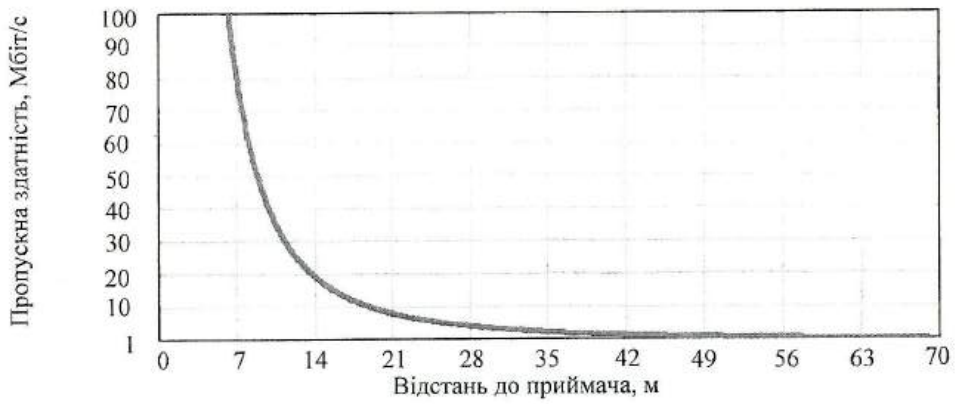


Рис. 3.1. Залежність швидкості передавання MIMO системи в стандарті LTE (потужність передавача складає 17 дБм) від відстані

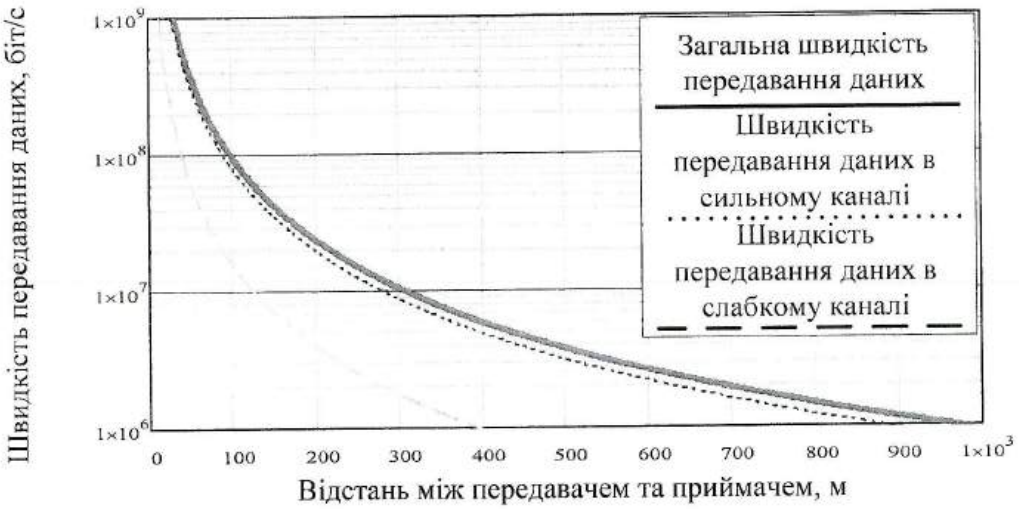
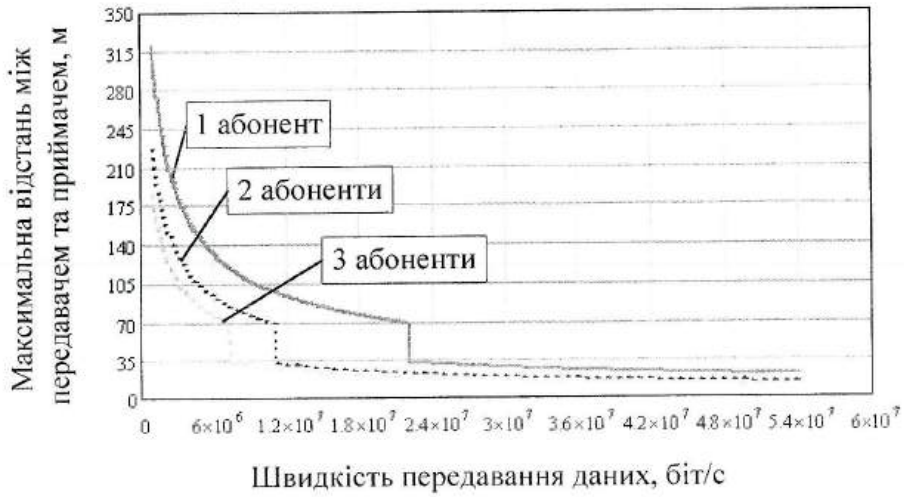


Рис. 3.2. Залежність швидкості передавання MIMO системи в стандарті LTE (потужність передавача складає 17 дБм) від відстані, побудована у логарифмічному масштабі

Найбільший інтерес в складі ноутбука представляє безпроводовий адаптер Wi-Fi стандарту LTE . Даний мережевий адаптер підтримує роботу у двох частотних діапазонах (2,4 та 5 ГГц), та забезпечує можливість використання антенних систем MIMO в конфігурації 2x2.

Сутність експериментального дослідження полягає у послідовному вимірюванні швидкості передавання даних по мережі стандарту LTE в тобто в приміщеі, змінюючи відстань між передавальним (безпроводовим маршрутизатором) та приймальним пристроєм (ноутбуком). Коридори мають наступні розміри: ширина – 3 м; довжина – 60 м; висота – 4 м. Зміна відстані між передавачем та приймачем проводиться в межах від 1 до 50 м із кроком в 1м. Метою проведея експерименту є підтвердження адекватності моделі оцінки пропускної здатності безпроводових каналів із використанням MIMO систем. Зокрема, проводиться перевірка часткового випадку, коли приймач та передавач знаходяться в одному приміщеі (для визначея втрат на розповсюдження радіосигналу використовується модель Хата для внутрішньо-внутрішнього сценарію розповсюдження радіохвиль), конфігурація антенних систем MIMO 2x2.



(а)



(б)

Рис. 3.3. Залежність радіусу зони обслуговування від швидкості передавання даних: (а - без перешкод; б - дві перешкоди (цегляні стіни))

Під час проведея вимірювання пропускної здатності безпроводового каналу використовується програмний продукт Iperf.

Таким чином, було складено алгоритм (рис. 3.4) та схему проведея експериментальних досліджень пропускної здатності каналів антенних систем MIMO в стандарті LTE.

Для розрахунку пропускної здатності за допомогою запропонованої моделі використовувалась спеціально розроблений автором програмний продукт, написаний мовою C++, який можна використовувати під час навчального процесу

[31]. За допомогою даної програми можна проводити розрахунок пропускної здатності антенних систем MIMO в конфігурації 2x2 в залежності від різних параметрів. Зокрема, є можливість використання різних моделей розповсюдження радіохвиль для більш точного визначея затухань в різних умовах розповсюдження.

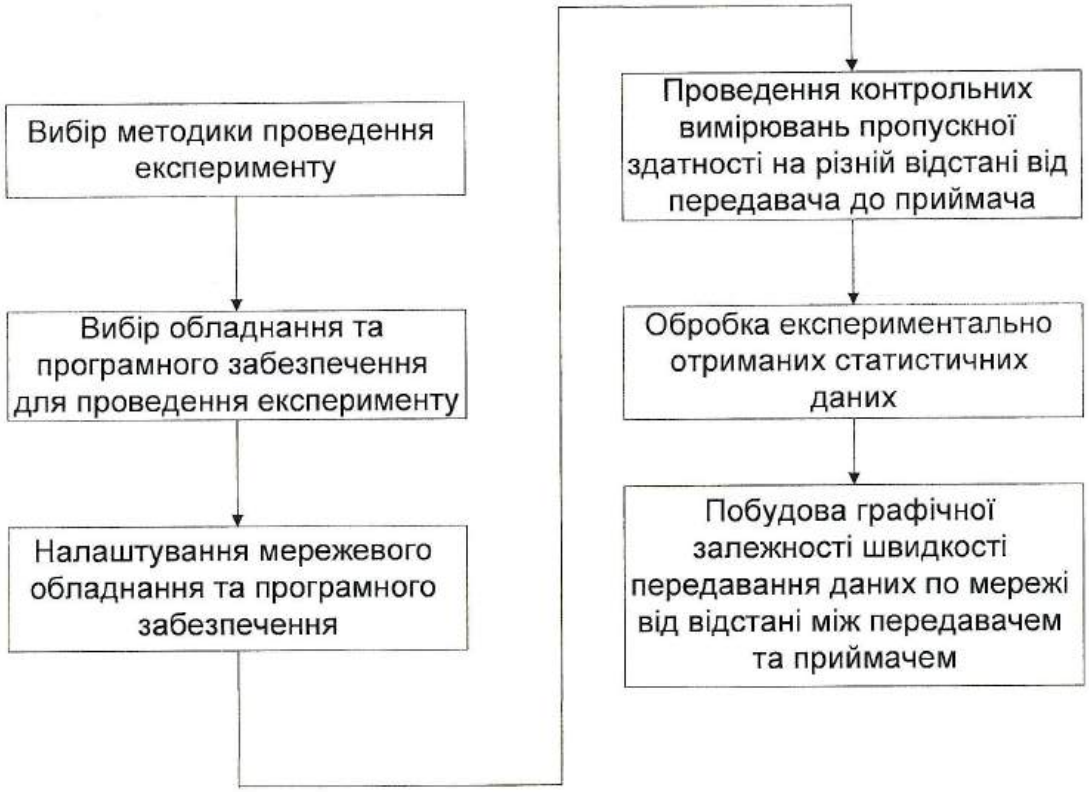


Рис. 3.4. Алгоритм проведея експериментальних досліджень пропускної здатності каналів антенних систем MIMO в стандарті LTE

3.2 Експериментальне визначення пропускної здатності антенних систем MIMO стандарту LTE

Як показано на рис. 3.5, проводячи переміщення вимірювальної станції (тобто ноутбука), відбувалось вимірювання швидкості передавання даних та рівня сигналу між маршрутизатором та ноутбуком на різних відстанях L між ними.

Отримані експериментальним шляхом дані зведені до табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Експериментальні дані вимірювання швидкості передавання даних MIMO системи в залежності від відстані між передавачем та приймачем

Відстань, м	Виміряна потужність радіосигналу, дБ	Виміряна швидкість передавання даних X_i, Мбіт/с	Розрахована швидкість передавання даних, Y_i, Мбіт/с	Різниця між виміряною та розрахованою швидкостями передавання даних, $X_i - Y_i$, Мбіт/с
4	-63	300,00	732,42	432,42
6	-68	300,00	325,55	25,55
8	-71	251,8	183,12	-68,68
10	-73	183,63	171,98	-11,65
12	-74	117,70	81,39	-36,31
14	-75	83,45	69,35	-14,1
16	-75	55,69	45,78	-9,91
18	-76	47,13	36,17	-10,96
20	-77	35,98	29,30	-6,68
22	-77	27,8	24,21	-3,59
24	-78	21,22	20,35	-0,87
26	-80	17,56	17,34	-0,22
28	-82	14,09	14,95	0,86
30	-82	13,10	13,02	-0,08
32	-83	12,12	12,20	0,08
34	-83	10,45	10,14	-0,31
36	-85	9,11	9,04	-0,07
38	-86	8,01	8,11	0,1
40	-87	6,89	7,71	0,82
42	-89	6,34	6,64	0,3
44	-90	6,09	6,34	0,25
46	-91	5,32	5,54	0,22
48	-91	5,16	5,09	-0,07
50	-92	4,44	4,69	0,25

Необхідно оцінити отримані результати за допомогою методів математичної статистики. Знайдемо середнє значення різниці між виміряною та розрахованою швидкостями передавання даних для $N_{вим}$ проведених вимірів швидкості передавання, $d_{ср} = E (X_i - Y_i)/N_{вим} = 16{,}23$. Проте, якщо відкинути перші явно хибні виміри, то вдається досягти значно меншого рівня похибки.

За даними отриманими з таблиці за допомогою програмного пакету MathCad 15 побудовано гістограму розподілу різниці між виміряною та розрахованою швидкостями передавання (рис. 3.5).

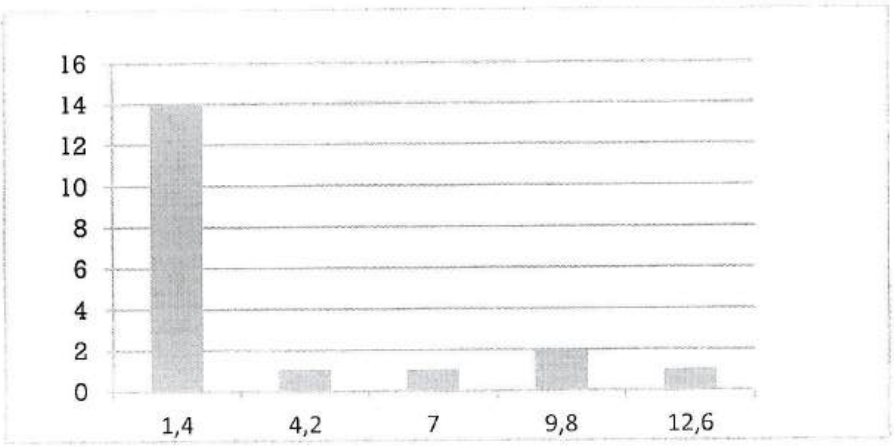


Рис. 3.5. Гістограма розподілу значень різниці між виміряним та розрахованими значеннями пропускної здатності MIMO системи

По отриманим даним за допомогою програмного пакету MAthCad побудуємо графічні залежності затухання радіосигналу та швидкості передавання даних по мережі від відстані між передавачем та приймачем (рис. 3.6 та 3.7).

Проаналізувавши графічні залежності (див. рис. 3.6 та 3.7), можна зробити наступні висновки.

1. На невеликих відстанях між передавачем та приймачем радіосигналу виміряна та розрахована швидкості передачі даних по мережі відрізняються на суттєву величину. Це викликано не зовсім точним вибором моделі розповсюдження радіохвиль для визначея пропускної здатності всередині

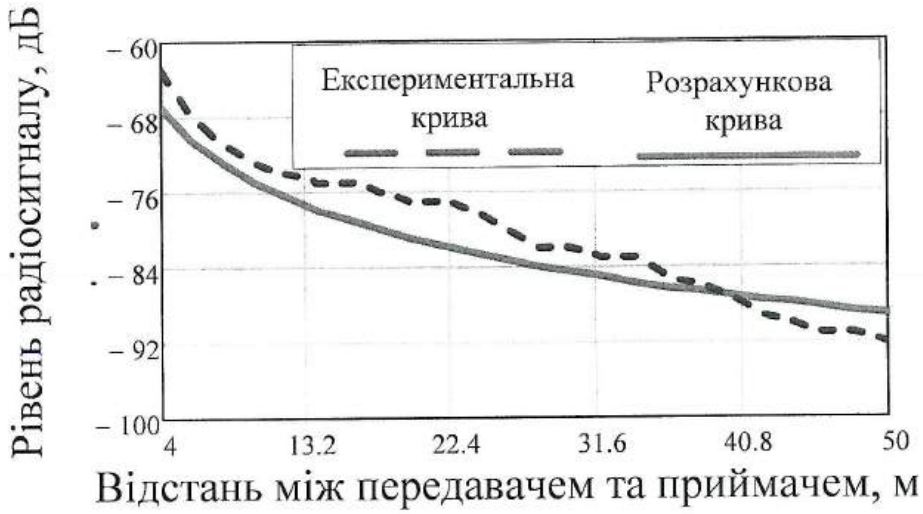


Рис. 3.6. Залежність рівня потужності радіосигналу від відстані між передавачем та приймачем

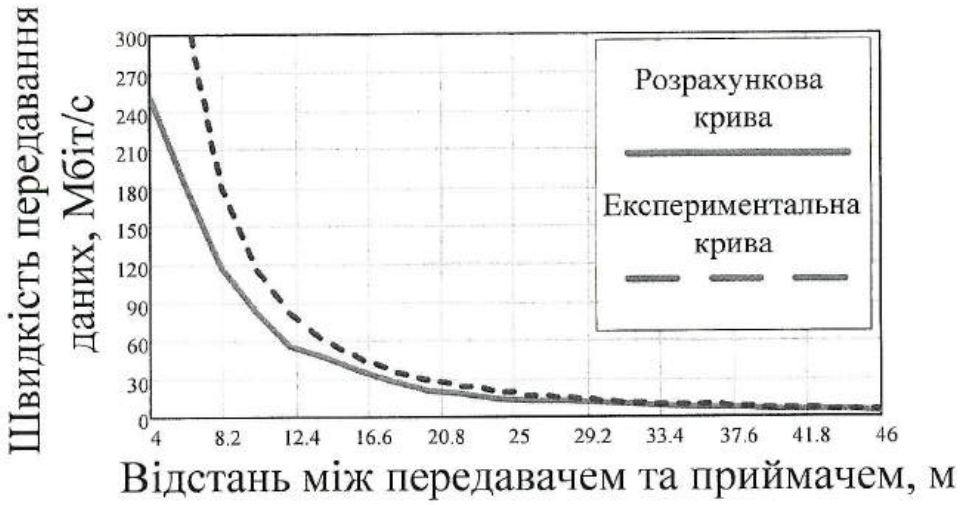


Рис. 3.7. Залежність швидкості передавання даних по мережі від відстані між передавачем та приймачем

Рис. 3.7. Залежність швидкості передавання даних по мережі від відстані між передавачем та приймачем

приміщень – моделі Хата, адже вона є придатною до діапазону до 2 ГГц, а дослідження проводились для стандарту LTE, який працює в діапазоні 2,4 ГГц. Про це свідчать також виміри потужності радіосигналу в точці прийому. Вони можуть відрізнятись на значну величину і не підкорятись жодному із існуючих

законів розповсюдження радіохвиль, що викликано складним багатопроменевим характером поширення радіохвиль всередині приміщень та виникненям швидких завмирань радіосигналу.

2. На значних відстанях між передавачем та приймачем радіосигналу виміряна та розрахована швидкості передавання даних по мережі майже співпадають по своєму значенню. Як видно із гістограми (рис. 3.6), в абсолютній більшості вимірів розраховане та експериментально визначені значення відрізняються між собою менше ніж на 1,4 Мбіт/с. Це є дуже важливо, адже для операторів стільникового зв'язку важливим в багатьох випадках є втановлення граничної швидкості передавання даних по мережі на межах стільників, де якість зв'язку може бути найнижчою.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі отримані такі теоретичні та практичні результати.

1. Проведений аналіз теоретичних засад та особливостей впровадження і планування мереж стільникового зв'язку четвертого покоління дозволив обґрунтувати перспективність розгортання стільникових мереж четвертого покоління як в світі, так і в Україні зокрема.

2. Досліджено методи оцінки пропускної здатності безпроводових каналів зв'язку з використанням технології MIMO в конфігураціях (M×2) та (2×N), який дозволяє, проводити оцінку пропускної здатності в залежності від відстані між передавачем та приймачем, необхідного відношея сигнал/шум на вході приймальних пристроїв, частоти радіосигналу, кількості та характеру перешкод і метеорологічних параметрів навколишнього середовища.

3. Запропоновано алгоритм, який дозволяє за допомогою статистичного аналізу зібраних даних мобільною станцією про потужність прийнятих сигналів визначати оптимальну тривалість циклічного префіксу OFDM символів.

Алгоритм надає змогу вибирати найкоротший префікс, що забезпечить максимально допустиму ефективну швидкість передавання даних за заданого рівня якості надання послуг.

4. Проведено оцінку пропускної здатності каналів антенних систем MIMO в сучасних стільникових мережах четвертого покоління.

Отримані наукові результати доцільно використовувати під час планування безпроводових мереж стандарту LTE, розробки обладная та програмного забезпечення, а також в навчальному процесі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сайт Міжнародного Союзу Електрозв'язку [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://www.itu.int. (дата звернення 11.10.2023).

2. Ahmadi S. LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies. – Academic Press, 2018. – 1152 p.

3. НКРЗІ забезпечено проведення тендеру на отримання ліцензій на 4G у діапазоні 2600 МГц [Електронний ресурс] // НКРЗІ – Режим доступу: https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=99&id=1425&language=uk (дата звернення 11.10.2023).

4. НКРЗІ забезпечено проведення тендеру на отримання ліцензій на 4G у діапазоні 1800 МГц [Електронний ресурс] // НКРЗІ – Режим доступу: https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=99&id=1446&language=uk (дата звернення 17.10.2023).

5. A. Yesilkaya, R. Bian, I. Tavakkolnia and H. Haas, "OFDM-based optical spatial modulation", IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 13, no. 6, pp. 1433-1444, Jun. 2019.

6. 3GPP Release 10 [Електронний ресурс] // 3GPP – Режим доступу: http://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10 (дата звернення 18.10.2023).

7. Release 16 3GPP [Електронний ресурс] // 3GPP – Режим доступу: http://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10 (дата звернення 18.10.2023).

8. LTE Physical Layer Overview [Електронний ресурс] // Keysight – Режим доступу: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/ subsystems /lte/content/lte_overview.htm (дата звернення 21.10.2023).

9. An introduction to Lte. Lte, Lte-Advanced, sae and 4g mobile communications. // Christopher Cox. - UK.: John Wiley & Sons Ltd, 2018. – P. 486

10. An antenna design for LTE 4×4 MIMO cell phone based on LTE advanced

downlink Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/document/7905944 (дата звернення 02.11.2023).

11. Third dimension for measurement of multi user massive MIMO channels based on LTE advanced downlink [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/document/7905944 (дата звернення 02.11.2023).

12. AN-1433 Base Station Closed-Loop RF Power Control with LMV232 Crest Factor Invariant Detector // Texas Instruments. Application report, January, 2016.

13. Comparison of thempirical propagation path loss models for fixed wireless access systems / V. S. Abhayawardhana, I.J. Wassel, D. Crosby, M.P. Sellers, M.G. Brown : 61 IEEE Technology Conference, Stockholm, 2015. – p. 73–77.

14. Hanzo L. MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi, WiMAX: coherent versus non-coherent and cooperative turbo-transceivers / Lajos Hanzo, Yosef Akhtman, Li Wang, Ming Jiang. – Wiley, University of Southampton, UK, 2021. – 694 p.

15. IMT-Advanced (4G) Mobile wireless broadband on the anvil. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.itu.int/newsroom/ press_releases/2009/48.html (дата звернення 15.11.2023).

16. Long Term Evolution (LTE): an introduction. White Paper. – Ericsson, October 2017.

17. M. Hata. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services Transactions on Vehicular Technology / M. Hata. – September 2015. – vol. VT-29. – p. 317–325.

18. M. Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala and D. Knipp, "Visible light communication using OFDM", Proc. Int. Conf. Testbeds Res. Infrastruct. Develop. Netw. Commun., pp. 129-134, Mar. 2016.

19. P. Raviteja, K. T. Phan, Q. Jin, Y. Hong and E. Viterbo, "Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation", IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 17, no. 10, pp. 6501-6515, Oct. 2018.

20. B. Farhang-Boroujeny, "OFDM versus filter bank multicarrier", IEEE Signal Process. Mag., vol. 28, no. 3, pp. 92-112, May. 2016.

21. Офіційні 4G – WiMAX та LTE [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

http://nag.com/news/newsline/19789/ Ofitsiyni-4G—-WiMAX-ta-LTE.html. (дата звернення 16.11.2023).

22. A. Rezazadeh Reyhani, A. Farhang, M. Ji, R-R. Chen and B. Farhang-Boroujeny, "Analysis of discrete-time MIMO OFDM-based orthogonal time frequency space modulation", Proc. IEEE International Conf. on Commun.(ICC), May. 2018.

23. M. K. Ramachandran and A. Chockalingam, "MIMO-OTFS in high-Doppler fading channels: signal detection and channel estimation", Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), pp. 206-212, Dec. 2018.

24. W. Shen, L. Dai, J. An, P. Fan and R. W. Heath, "Channel estimation for orthogonal time frequency space (OTFS) massive MIMO", IEEE Trans. Signal Process., vol. 67, no. 16, pp. 4204-4217, Aug. 2019.

25. Milanovic J. Comparison of propagation models accuracy for WiMAX on 3.5 GHz / J. Milanovic, S. Rimac-Drlje, K. Bejuk. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://xa.yimg.com/kq/groups/24541321/312733567/name/1.pdf (дата звернення 19.11.2023).

26. Milanovic J. Propagation model accuracy for the WiMAX on 3.5GHz / Josip Milanovic, Rimac-Drlje S, Bejuk K, 14 : IEEE International conference on electronic circuits and systems. – Morocco, 2017. – P. 111–114.

27. Mimo wireless communications / Ezio Biglieri, Robert Caderbank, Anthony Constantinidis, Andrea Goldsmith, Arogyaswami Paulraj, H. Vinsent Poor. – Cambridge university press, 2017. – 343 p.

28. MIMO-OFDM wireless communications with Matlab / Young Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung-Gu Kang. – Wiley, 2016. – 457 p.

29. Wout J. ss system based on IEEE / Joseph Wout, Martens Luc : IEEE wireless communications and networking Conference, Las Vegas,. – April 2016. –v. 2. – p. 978–983.

30. E. Karami, O. A. Dobre and N. Adnani, "Identification of GSM and LTE signals using their second-order cyclostationarity", Proc. IEEE 12MTC, pp. 1108-1112, 2015. Akyidiz, I.F. Wireless mesh networks: a survey / I.F. Akyidiz, X. Wang, W. Wang // Computer Networks. - 2021. – Jan, 1. – P. 445-487.

31. Обладнання MIKROTIK R11E-LTE [Електронний ресурс] // – Режим доступу:https://innet-trading.com/catalog/merezheve_obladnannya /mikrotik_routerboard/minipci_karty/ (дата звернення 19.11.2023).

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Презентація по магістерській роботі на тему:

Метод удосконалення технології OFDM для збільшення пропускної здатності мереж четвертого покоління

Студента Атаманюка Віктора Вікторовича

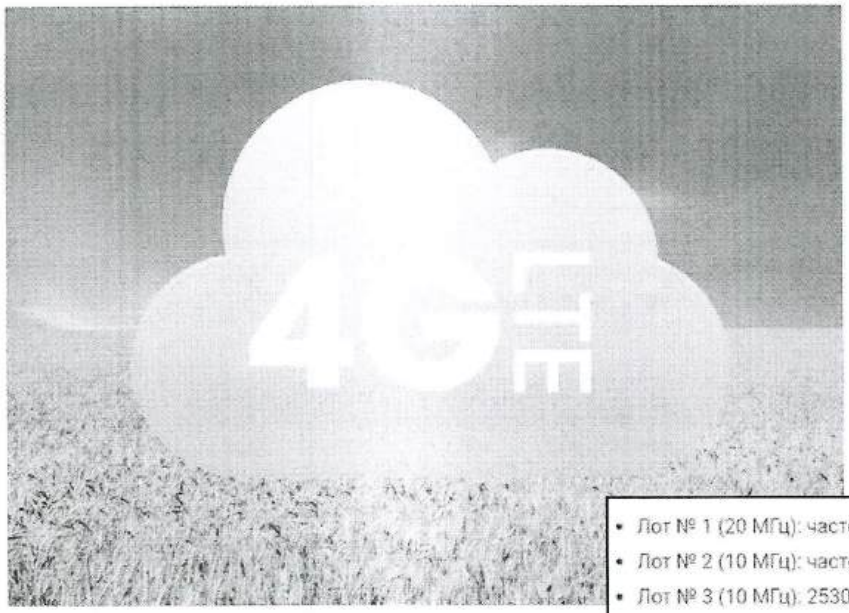
Мета роботи

Мета роботи – дослідити методи підвищення пропускної здатності сучасних безпроводових мереж четвертого покоління на прикладі сенсорних мереж.

Об'єкт дослідження - сенсорні мережі в стільникових мережах четвертого покоління.

Предмет дослідження – методи оцінки та підвищення пропускної здатності безпроводових каналів стільникових мереж четвертого покоління.

Впровадження 4G в Україні



- Лот № 1 (20 МГц): частоты 2540-2545, 2565-2570, 2660-2665, 2685-2690 МГц
- Лот № 2 (10 МГц): частоты 2535-2540/2655-2660 МГц
- Лот № 3 (10 МГц): 2530-2535/2650-2655 МГц
- Лот № 4 (10 МГц): 2525-2530/2645-2650 МГц
- Лот № 5 (10 МГц): 2520-2525/2640-2645 МГц
- Лот № 6 (10 МГц): 2510-2515/2630-2635 МГц
- Лот № 7 (10 МГц): 2515-2520/2635-2640 МГц

ЗАТВЕРДЖЕНО
Рішення Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації
07.11.2017 № 575

УМОВИ ТЕНДЕРУ
на отримання ліцензій на користування радіочастотним ресурсом України для впровадження радіотехнології «Міжнародний рухомий (мобільний) зв'язок IMT» в смугах радіочастот 2510-2545 МГц, 2565-2570 МГц, 2630-2665 МГц, 2685-2690 МГц

I. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Правовою основою проведення тендеру на отримання ліцензій на користування радіочастотним ресурсом України для впровадження радіотехнології «Міжнародний рухомий (мобільний) зв'язок IMT» (далі – 0-2545 МГц, 2565-2570 МГц, 2630-2665 МГц,

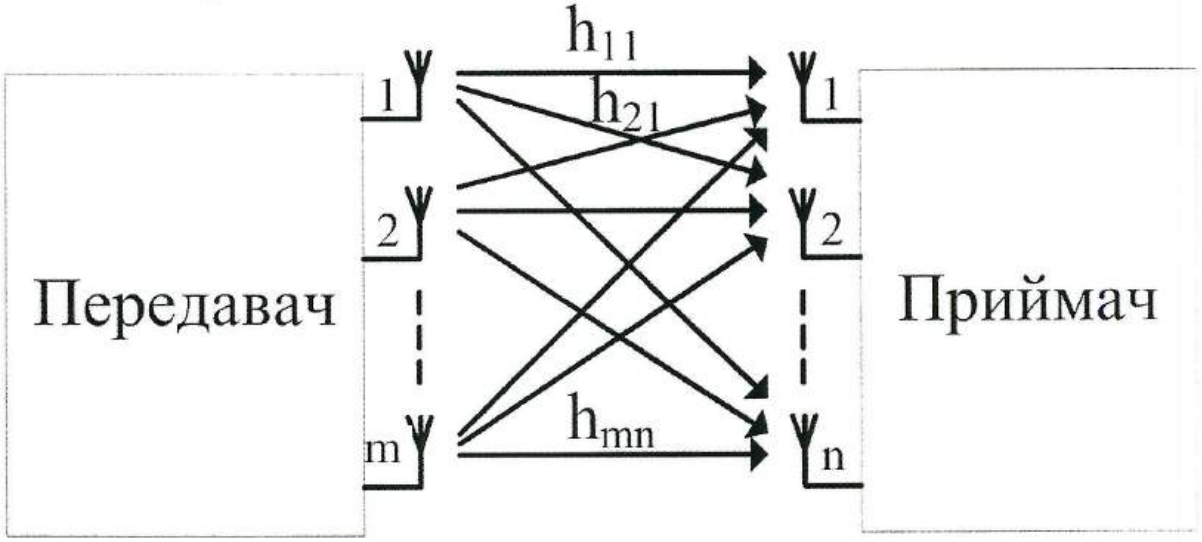
стотний ресурс України» (далі – Закон).

д 21.07.2015 № 445 «Про забезпечення умов ухомого (мобільного) зв'язку четвертого

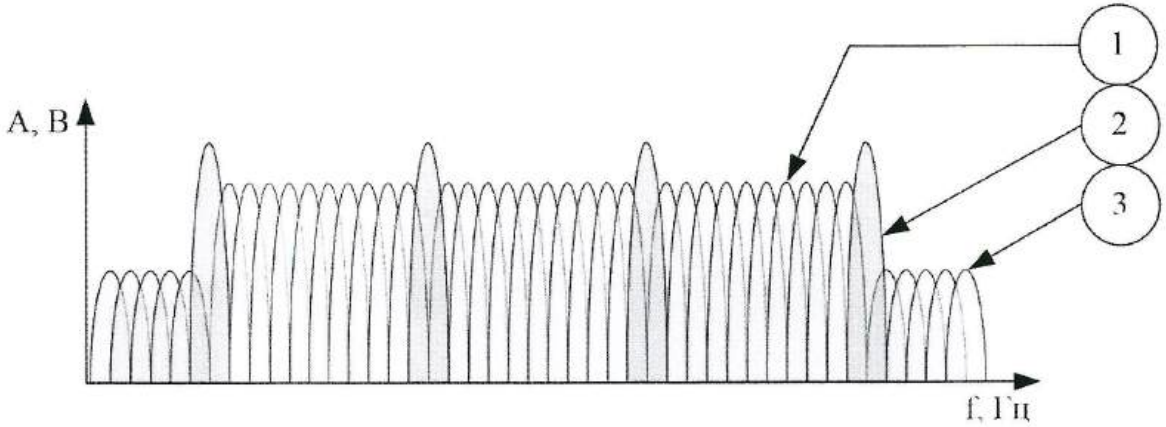
астотного ресурсу України, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 09.06.2006 № 815 (далі – План використання РЧР).

Аналіз методів оцінки пропускної здатності каналів антенних систем MIMO

Використання антенних систем MIMO



Застосування технології OFDM

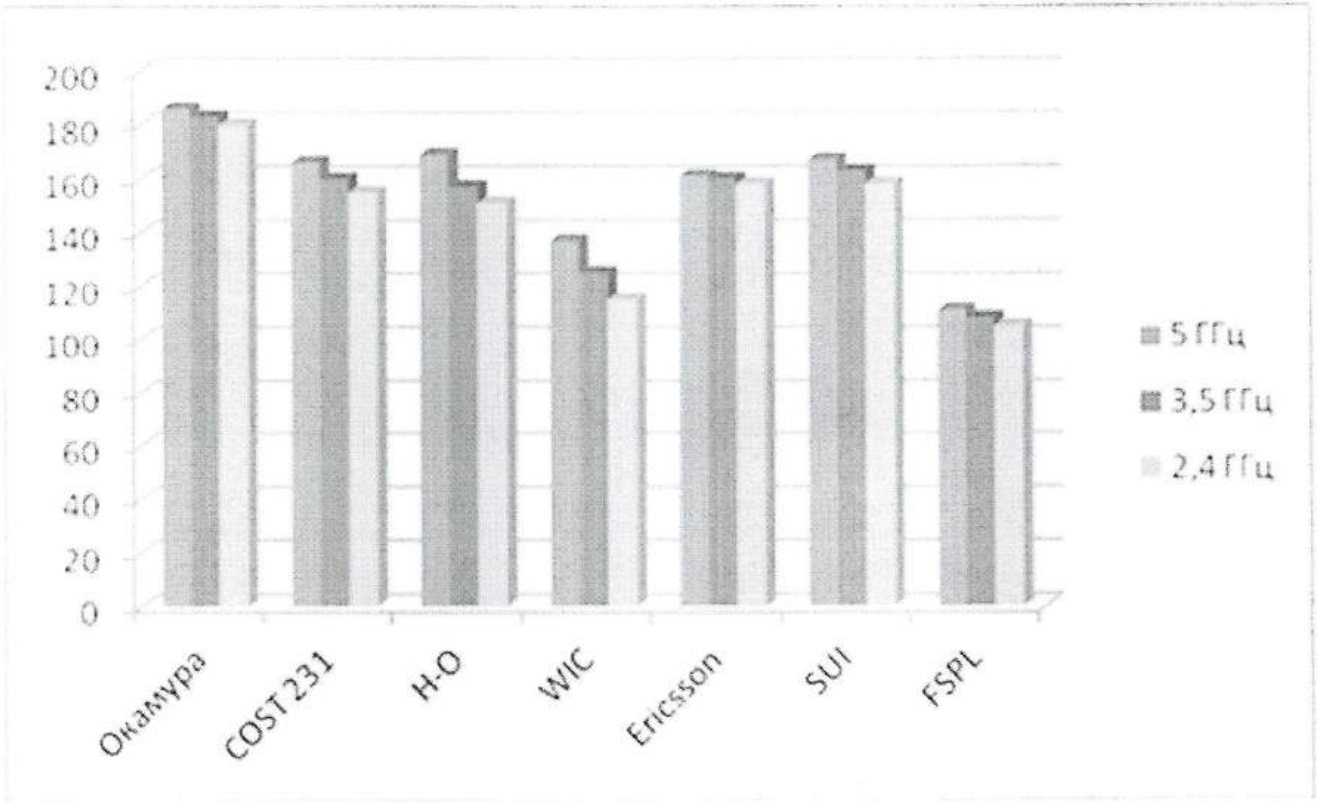


Розміщення інформаційних (1), контрольних (2) та захисних (3) субканалів OFDM-кадру

Параметри для моделювання величини затухань радіосигналу

Параметр	Значення
Потужність передавача БС	43 дБм
Потужність передавача МС	30 дБм
Висота підйому антени БС	30 м
Висота прийомної антени	3 м
Частотний діапазон	2,4 ГГц; 3,5 ГГц; 5 ГГц
Відстань між будівлями (середня)	50 м
Висота будинків (середня)	15 м
Ширина вулиць (середня)	25 м
Кут розташування вулиць	30
Корекція на затінення	8,2 дБ в приміській та сільські місцевості; 10,6 дБ в міській місцевості

Рівень затухань радіосигналу

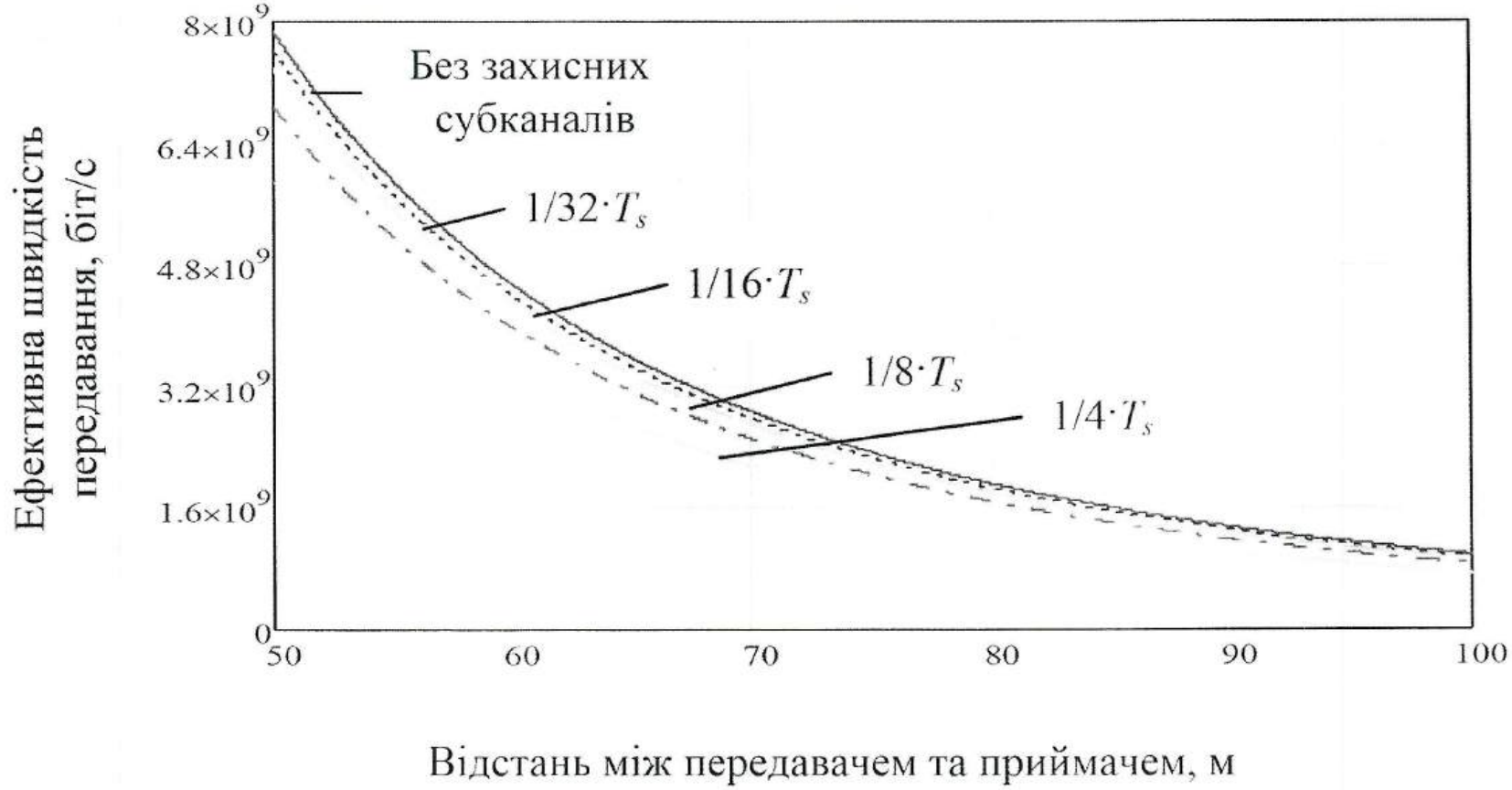


Рекомендації щодо використання емпіричних моделей розповсюдження радіохвиль для різних діапазонів частот

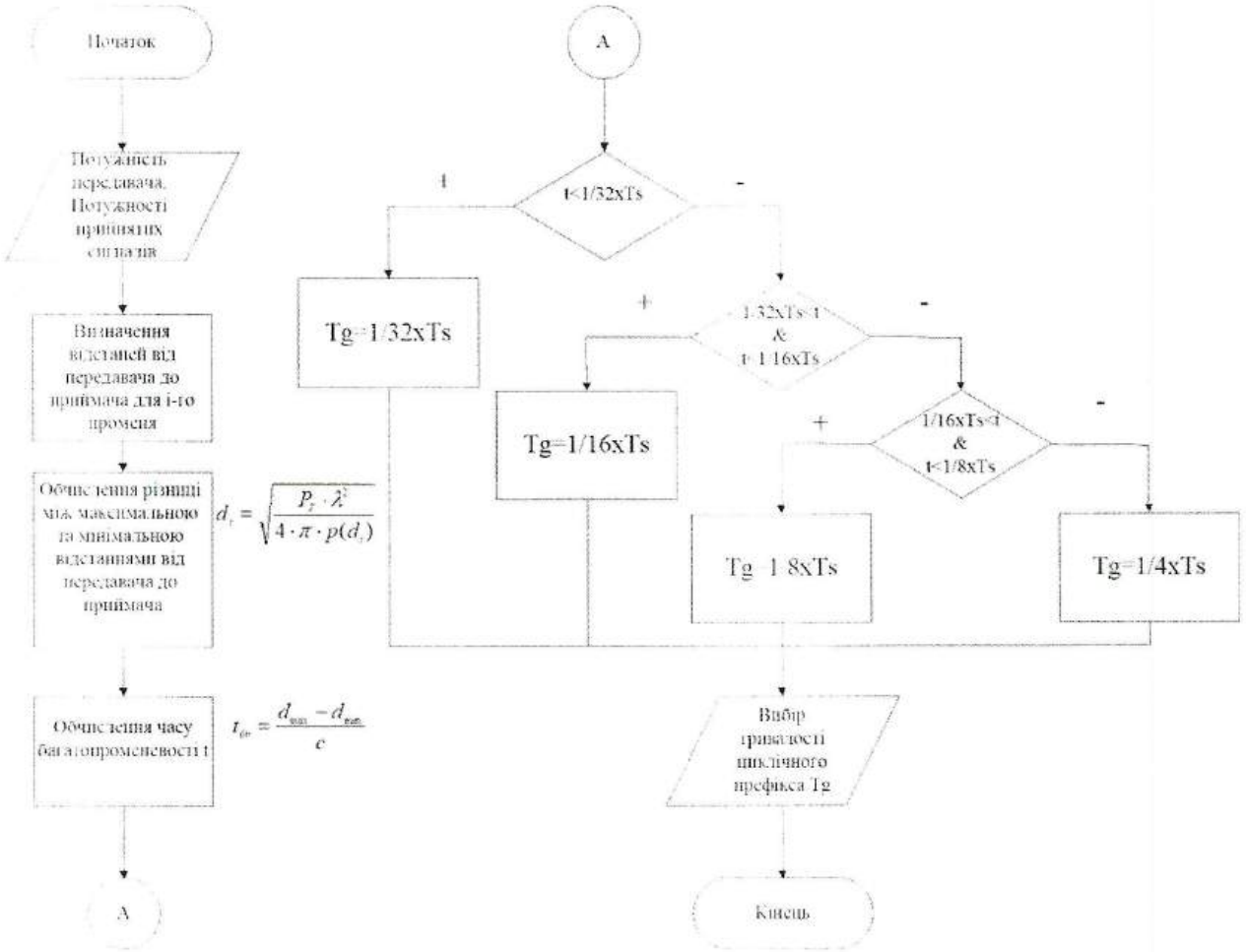
Частотний діапазон	Технологія	Рекомендована модель розповсюдження радіохвиль
До 2 ГГц	LTE, WiMAX, GSM, UMTS тощо	Модель Хата
2,3 ГГц; 2,5 ГГц; 2,6 ГГц	LTE, WiMAX	Модель Хата Cost 231
3,5 ГГц	LTE, WiMAX	Stanford University Interim (для умов LOS) та Ericsson (для умов NLOS)
5 ГГц; 5,8 ГГц	WiMAX	Stanford University Interim (для умов LOS) та Ericsson (для умов NLOS)

LOS – пряма видимість; NLOS – не пряма видимість.

Адаптивна зміна тривалості захисного інтервалу під час формування OFDM-сигналу



Алгоритм адаптивної зміни тривалості захисного інтервалу



Висновки

1. В роботі проведено аналіз теоретичних засад та особливостей впровадження і планування мереж безпроводових систем зв'язку четвертого покоління.

2. Проведено оцінку пропускної здатності каналів антенних систем MIMO в сучасних стільникових мережах четвертого покоління.

3. Розроблено алгоритм, який дозволяє за допомогою статистичного аналізу зібраних даних базовою станцією про потужність прийнятих сигналів визначати оптимальну тривалість циклічного префіксу OFDM символів.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні результати магістерської роботи доповідалися на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУІКТ, 20 грудня 2023 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі “Наукові записки ДУІКТ, – 2023, – №2”.

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: Віктор АТАМАНЮК

Назва: Метод удосконалення технології OFDM для збільшення пропускної здатності мереж четвертого покоління

Координатор: Анатолій МАКАРЕНКО

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1 :6.8

Коефіцієнт подібності 2 :2.4

Тривога: 4

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*