

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій .
(повна назва)
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського .
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський) .

Дослідження параметрів продуктивності безпроводової мережі стандарту IEEE
802.11g на основі mesh архітектури
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ІКІМ-22-1 .
Ворончихін О.А. .
(прізвище, ініціали)

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка .
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми: освітньо-професійна .
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма: Інфокомунікаційна .
інженерія .
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доцент кафедри ІКІ ім. В.В. Поповського .
Токар Л.О. .
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Лемешко О.В. .
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій.
(повна назва)
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського.
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський).
Спеціальність 172 Телекомунікації і радіотехніка.
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна.
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Інфокомунікаційна інженерія.
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ


студентці Ворончихіну Олексію Андрійовичу.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження параметрів продуктивності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11g на основі mesh архітектури.
затверджена наказом по університету від «19» жовтня 2023р. № 1212Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 25.01.2024р.
3. Вихідні дані до роботи: вимоги стандартів безпроводової передачі даних стандарту IEEE 802.11, вимоги протоколу BATMAN-Adv, методи поширення сигналів для стандарту IEEE 802.11g, рішення для визначення MAP, до якої має підключитися мобільна станція.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - 1) Аналіз топологій та протоколів для організації мережі за mesh архітектурою.
 - 2) Аналіз безпроводової мережі з використанням протоколу BATMAN.
 - 3) Дослідження продуктивності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11b/g/n з підтримкою протоколу BATMAN-Adv.
 - 4) Оцінка потужності сигналу з використанням стандарту IEEE 802.11g.
 - 5) Дослідження міжрівневого об'єднання безпроводових mesh-мереж стандарту IEEE 802.11.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій: Демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентації

..


6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)
Основна частина	доцент Токар Любов Олександрівна		19.01.24

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2023	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	12.10.2023	виконано
3	Розробка 1 розділу	26.10.2023	виконано
4	Розробка 2 розділу	15.11.2023	виконано
5	Розробка 3 розділу	01.12.2023	виконано
6	Розробка 4 розділу	28.12.2023	виконано
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	06.01.2024	виконано

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

Студент  Ворончихін О.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  доцент Токар Л.О.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 83 с., 42 рис., 9 табл., 78 джерел.

ТОЧКА ДОСТУПУ, БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА, BATMAN, MESH,
РАДІОСИГНАЛ, ЕФІРНИЙ ЧАС

Об'єкт дослідження – процеси дослідження та розрахунку безпроводової мережі Wi-Fi.

Предмет дослідження - методи та способи аналізу продуктивності безпроводової мережі Wi-Fi стандарту IEEE 802.11g.

Мета роботи – дослідження показників продуктивності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11g на основі mesh архітектури.

Методи досліджень – аналіз, формалізація, порівняння, моделювання.

В роботі проведено дослідження продуктивності мережі стандарту IEEE 802.11b/g/n з підтримкою BATMAN-Adv та отримано результати затримки й пропускної здатності.

Проведено аналіз показників поширення сигналу з використанням радіоінтерфейсу стандарту IEEE 802.11g всередині приміщення та на значних відстанях для оцінки якості сигналу з метою прогнозування покриття мережної інфраструктури. Для дослідження використано модель LDPL.

Розроблено модель об'єднання рівнів мережі та алгоритм об'єднання на MS. Використано міжрівневе програмне забезпечення для Linux, проведено модифікацію драйвера Madwifi для підтримки функцій міжрівневого об'єднання на MS і MR.

В роботі проведено ряд досліджень, спрямованих на оцінку продуктивності міжрівневого об'єднання: дослідження впливу розміру пакета на вартість ефірного часу, дослідження впливу завантаження трафіка на вартість ефірного часу, дослідження впливу асиметричних витрат на транспортування висхідним і низхідним каналами на вартість ефірного часу. Проведено оцінку загальної затримки моделі об'єднання, а також затримку, що вноситься кожним кроком у процедурі об'єднання згідно з алгоритмом об'єднання на MS.

ABSTRACT

The report contains: 83 pages, 42 figures, 9 tables, 78 sources.

ACCESS POINT, WIRELESS NETWORK, BATMAN, MESH, RADIO SIGNAL, AIRTIME

The object of research is the Wi-Fi wireless network research and calculation processes.

The subject of research - methods and methods of analyzing the performance of a Wi-Fi wireless network of the IEEE 802.11g standard.

The purpose of the work is to study the performance indicators of the IEEE 802.11g wireless network based on the mesh architecture.

Research methods - analysis, formalization, comparison, modeling.

In the work, the performance of the IEEE 802.11b/g/n standard network with BATMAN-Adv support was studied and the results of delay and throughput were obtained.

An analysis of signal propagation indicators using the IEEE 802.11g radio interface indoors and over long distances was carried out to assess the quality of the signal in order to predict the coverage of the network infrastructure. The LDPL model was used for the study.

A model of unification of network levels and an algorithm of unification on MS have been developed. Cross-layer software for Linux was used, the Madwifi driver was modified to support cross-layer connection functions on MS and MR.

In the work, a number of studies aimed at evaluating the performance of inter-level association were carried out: a study of the impact of the packet size on the cost of airtime, a study of the impact of traffic loading on the cost of airtime, a study of the impact of asymmetric costs for transportation through uplink and downlink channels on the cost of airtime. The overall delay of the unification model was evaluated, as well as the delay introduced by each step in the unification procedure according to the unification algorithm on the MS.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів.....	7
Вступ.....	9
1 Аналіз топологій та спеціальних протоколів для організації мережі за mesh архітектурою	10
1.1 Аналіз топологій стандартів IEEE 802.11	10
1.2 Протоколи для організації Wi-Fi mesh	14
1.3 Огляд протоколу BATMAN.....	16
1.4 Особливості стандарту IEEE 802.11g.....	19
2 Аналіз безпроводової мережі з використанням протоколу BATMAN....	25
2.1 Особливості протоколу BATMAN-Adv.....	25
2.2 Дослідження продуктивності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11b/g/n з підтримкою BATMAN-Adv.....	29
3 Оцінка потужності сигналу з використанням стандарту IEEE 802.11g...	36
3.1 Дослідження поширення радіосигналів на коротких відстанях..	36
3.2 Оцінювання потужності сигналу на значних відстанях.....	40
4 Дослідження міжрівневого об'єднання безпроводових mesh-мереж стандарту IEEE 802.11.....	47
4.1 Поняття вартості ефірного часу.....	47
4.2 Метрика об'єднання між рівнями.....	50
4.3 Розрахунок вартості ефірного часу.....	51
4.4 Алгоритм об'єднання рівнів.....	56
4.5 Міжрівневе програмне забезпечення.....	60
4.6 Оцінка продуктивності міжрівневого об'єднання.....	63
Висновки.....	75
Перелік джерел посилання.....	77

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І
ТЕРМІНІВ

БД – база даних

БС – базова станція

AP – Access Point

AIP – Association Information Response

AIR – Association Information Request

API – Application Programming Interface

AODV – Ad-hoc On-Demand Distance Vector

BAR – Backhaul Airtime Request

BATMAN – Better Approach to Mobile Ad-hoc Networking

CJDNS – Crypto-joke Distributed Network System

CCK – Complementary Code Keying

CLSM – Cross-Layer Service Middleware

CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

DBPSK – Differential Binary Phase-Shift Keying

DQPSK – Differential Quadrature Phase-Shift Keying

DOE – Design of Experiments

DSP – Digital Signal Processing

DTN – Delay-Tolerant Networking

DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum

ELP – Echo Location Protocol

EAP – Extensible Authentication Protocol

FSPL – Free Space Path Loss

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IGW – Internet Gateway

IP – Internet Protocol

IPv4/IPv6 – Internet Protocol Version 4/6

ISM – Industrial, Scientific, and Medical

ITU-R – International Telecommunication Union Radiocommunication

LDPL – Log Distance Path Loss

LOS – Line of Sight

MAP – Mesh Access Point

MPP – Mesh Point Portal
MS – Mobile Station
MP – Mesh Point
MR – Mesh Routers
NBRF – Neighbor Ranking Sequence Frame
LOS – Non-Line of Sight
OGM – Originator Message
OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLSP – Optimized Link State Routing
OpenWrt – Open Wireless Router
OSI – Open Systems Interconnection
OSPF – Open Shortest Path First
QoS – Quality of Service
PBSS – Personal Basic Service Set
RM – Radio Metric
RSSI – Radio Signal Strength Indication
SNR – Signal-to-Noise Ratio
SQ – Sequence Number
STA – Station
TCP – Transmission Control Protocol
TR – Transmission Rate
TTL – Time to Live
UDP – User Datagram Protocol
VDE – Virtual Distributed Ethernet
VPN – Virtual Private Network
Wi-Fi – Wireless Fidelity
WiMAX – Institute of Electrical and Electronics Engineers
WLAN – Wireless Local Area Network
WMN – Wireless Mesh Network

ВСТУП

У сучасному світі інформаційних технологій безпроводові мережі є неодмінною складовою інфраструктури для передачі даних, забезпечуючи високу мобільність та доступ до мережі Internet у різних середовищах. У переліку стандартів безпроводових мереж слід виділити стандарт IEEE 802.11g, який є ключовими для розвитку цієї сфери, надаючи можливість швидкого та надійного обміну інформацією.

У контексті зростаючих вимог до якості обслуговування, продуктивності та покриття безпроводових мереж, концепція мережі на основі mesh стає дедалі актуальнішою. Мережа з технологією mesh використовується для забезпечення гнучкості, високої доступності та стабільності зв'язку, особливо в умовах, де традиційні інфраструктурні рішення можуть бути обмеженими.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження впливу технології mesh на параметри продуктивності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11g. Технологія mesh вносить значний вплив на спосіб, яким безпроводові мережі функціонують та забезпечують зв'язок. Дослідження у роботі включають аналіз не лише впливу технології mesh на продуктивність мережі, але й вивчення особливостей цієї технології.

1 АНАЛІЗ ТОПОЛОГІЙ ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ПРОТОКОЛІВ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ ЗА MESH АРХІТЕКТУРОЮ

1.1 Аналіз топологій стандартів IEEE 802.11

При використанні стандартів Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11 передача відеокадрів може здійснюватися за топологіями «точка-точка», «точка-багатоточка» або «багатоточка-багатоточка».

Топологія «точка-точка» - це однорангова мережа, у якій всі вузли мережі виконують однакові завдання або автоматично можуть змінювати набір своїх функцій залежно від умов. Архітектура однорангової мережі найбільше підходить для житлових районів і малого бізнесу в невеликих регіонах. Це пояснюється тим, що в таких мережах кожен пристрій виконує незалежну роль робочої станції, оскільки він має доступ до збереження всього набору даних у власній базі даних (БД) [1].

Безпроводова мережа «точка-точка» - сучасне високошвидкісне з'єднання, може бути як частиною більшої безпроводної або кабельної локальної мережі, так і служити своєрідним «мостом» між двома різними кабельними мережами або додавати дистанційну зв'язуючу точку до вже функціонуючої мережі. Основні переваги топології «точка-точка» зображено на рис 1.1.

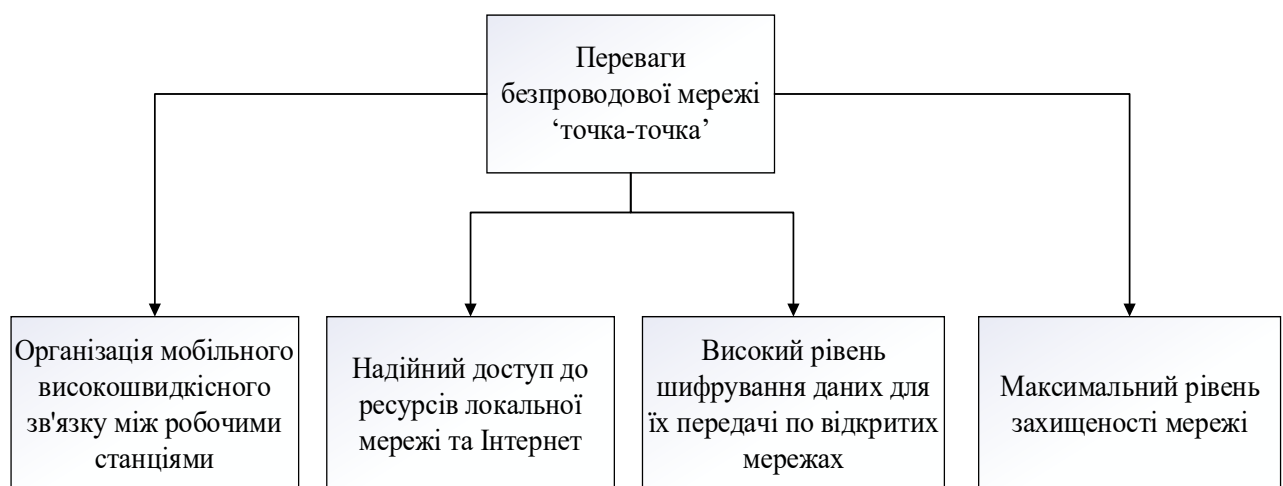


Рисунок 1.1 – Основні переваги топології «точка-точка»

Грамотно облаштована безпроводова мережа «точка-точка» - це максимальна швидкість та прохідність даних у безпечному режимі та виняткова

мобільність користувачів. Оптимальне радіопокриття будується на основі радіовимірювань мережі.

Ступінь надійності та відповідність вимогам сучасних мережних стандартів безпроводової мережі «точка-точка» обумовлено простотою процесу налаштування мережі на всіх етапах від визначення або зміни IP-адреси до налаштування механізмів захисту. У цій топології немає проблем зі зниженням швидкості передачі через проблему «прихованого» вузла, як це буває в з'єднаннях типу «точка-багатоточка», а використання технології «прозорого» моста фактично дозволяє створювати з'єднання, аналогічне проводовому, не витрачаючи додатковий час на налаштування маршрутизації [2].

Обладнання для з'єднання типу «точка-точка» складається з провідної та веденої станції. У якості веденої станції використовується звичайне клієнтське обладнання, а у якості провідної станції використовується майстер-пристрій, до якого підключається ведений пристрій. Пристрої мають вбудовані антени та повністю готові до роботи.

Топологія з єдиним вузлом зв'язку, до якого підключаються окремі абоненти, носить найменування «точка-багатоточка». У кабельних мережах аналогічна топологія називається «зірка». Широко використовуються при побудові розподілених систем зв'язку. Добре підходить для створення мереж на підприємствах, здійснення диспетчерського зв'язку, організації комплексів відеоспостереження та охорони. Приклад топології «точка-багатоточка» зображено на рис. 1.2.

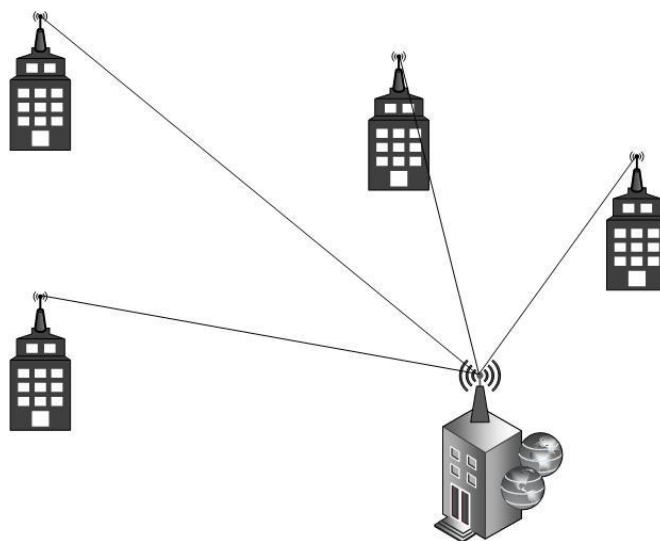


Рисунок 1.2 – Приклад топології «точка-багатоточка»

Топологія «точка-багатоточка», в якій відеокадри доставляються кільком клієнтам з централізованого сервера, є топологією, що найчастіше використовується, але в ній є недолік: якщо сервер виходить з ладу, то вся мережа руйнується [2]. Безпека кадрів даних також є першорядним завданням при використанні топології «точка-багатоточка».

На базі систем «точка-багатоточка» будуються приватні захищені мережі з обмеженням доступу. Це особливо важливо для великих виробничих та проектних установ, де відбувається обмін конфіденційною інформацією між різними підрозділами. І тут безпека зв'язку є ключовим елементом локальної мережі організації.

Для створення безпроводової мережі «точка-багатоточка» використовуються базові станції (БС), які оснащено кількома антенами. Дане обладнання встановлюється поза будівлями та спорудами, тому застосовують усі погодні виконання пристроїв.

При необхідності з'єднання кількох об'єктів, що знаходяться на значній відстані один від одного, в єдину мережу найбільш ефективним способом є створення мережі з топологією «точка-багатоточка». Дана система відрізняється гнучкістю: можна додавати і видаляти абонентів, а також змінювати ширину каналу доступу, що виділяється кожному з них. На рис 1.3 представлено основні переваги топології «точка-багатоточка».



Рисунок 1.3 – Основні переваги топології «точка-багатоточка»

Простота зміни конфігурації мережі в даній топології заключається в додаванні абонента, встановлення обмеження на підключення нових абонентів та

забороні певним пристроям доступ до ресурсів мережі. Усі перелічені налаштування вносяться програмно, під час роботи з вбудованим устаткуванням. Іншою перевагою є наявність великої кількості опцій, що налаштовуються, що дозволяє максимально ефективно задіяти ресурси обладнання. Крім того, великою перевагою є широкий асортимент пристроїв, що пропонуються виробниками. Практично під кожне завдання можна підібрати обладнання, яке найкраще впорається з його вирішенням.

Правильний підбір передавальних пристроїв дозволяє забезпечувати необхідну зону покриття. Професійні моделі дозволяють суттєво збільшити дальність передачі сигналу, а якщо не потрібні особливі параметри мережі, то можна суттєво заощадити, купуючи менш дороге обладнання.

Інформаційні мережі, організовані за топологією mesh, здобули за останні роки велике визнання. Масштаби проєктів зросли до тисяч точок доступу та десятків тисяч користувачів. Mesh-мережі представляють найбільш цікаві рішення, що інтегрують різні мережні та радіотехнології, і тому повною мірою відповідають все більшим вимогам абонентів.

Технологія mesh дозволяє повністю децентралізувати архітектуру мережі та збільшити зону її дії із забезпеченням автоматичної маршрутизації між вузлами мережі Wireless Fidelity (Wi-Fi), в якій кожен вузол для передачі інформації здатний задіяти сусідні вузли, використовуючи стрибковий механізм перерозподілу трафіку й трохи більше 5% пропускну здатності каналу. Стандарт IEEE 802.11 регламентує протоколи виявлення, ідентифікації та встановлення з'єднання між сусідніми пристроями. Таким чином, реалізується концепція поступового зростання та захоплення нових територій міста за допомогою розподіленої мережі. Розпочавши розвиток мережі в одній точці, в ідеалі можна необмежено збільшувати зону її дії, додаючи нові пристрої.

Прокладання додаткових комунікацій не потрібно. Системи Institute of Electrical and Electronics Engineers (WiMAX) та Wi-Fi mesh мають різний підхід до побудови міської мережі – від глобального охоплення до поступового розвитку. Вони повинні доповнювати один одного, а не конкурувати між собою. Система WiMAX призначена забезпечувати транспорт даних у районі зосередження абонентів, а Wi-Fi mesh має виконувати охоплення відокремлених, наприклад, «спальних» мікрорайонів. Висока мобільність mesh-мереж дозволяє використовувати їх у специфічних ситуаціях, наприклад, для створення систем зв'язку між ключовими об'єктами міської інфраструктури, розгортання мережі для

екстрених служб у місцях, де немає вільного доступу до глобальної мережі. Плюси такої реалізації очевидні: всі мобільні об'єкти мають можливість бути на зв'язку незалежно від їхнього розташування, швидкості пересування тощо. А швидке оповіщення у такій мережі забезпечить швидке реагування та вищий рівень безпеки [3,4]. Приклад використання такої мережі наведено на рис. 1.4.

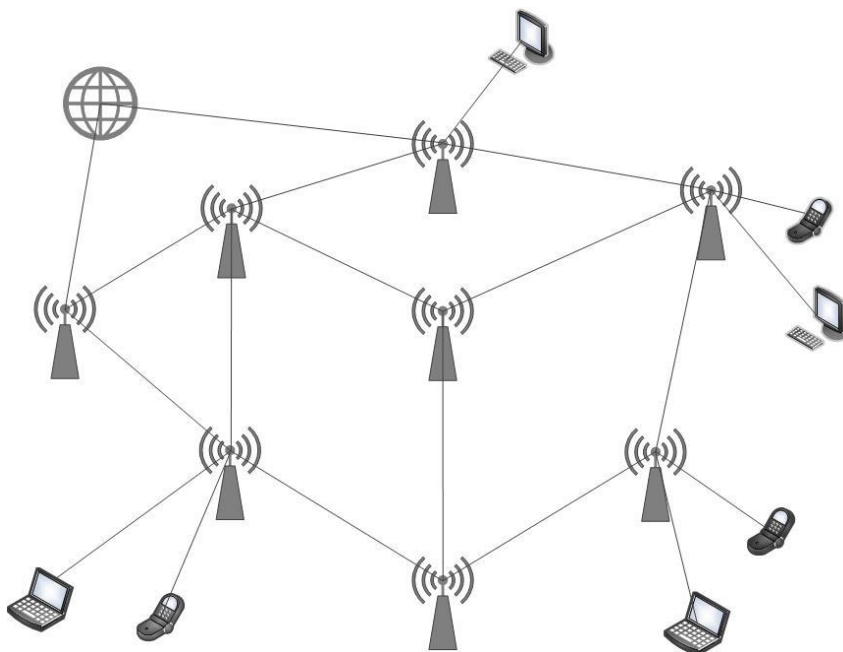


Рисунок 1.4 – Структурна схема mesh-мережі

1.2 Протоколи для організації Wi-Fi mesh

Особливістю mesh-мереж є використання спеціальних протоколів, які дозволяють кожній точці доступу створювати таблиці абонентів мережі з контролем стану транспортного каналу та підтримкою динамічної маршрутизації трафіку за оптимальним маршрутом між сусідніми точками. Найпопулярнішими протоколами для організації Wi-Fi mesh мереж є:

- CJDNS;
- BATMAN;
- DTN;
- Netsukuku;
- OSPF.

У кожного протоколу є свої переваги та недоліки, які наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння протоколів організації mesh-мережі

Протокол	CJDNS	BATMAN	DTN	Netsukuku	OSPF
Авто-призначення адреси	Так	Ні	Ні	Так	Ні
Розподільча маршрутизація	Так	Так	Так	Так	Частково
Об'єднання мереж	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Шифрування трафіку всередині мережі	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
IPv4/v6	IPv6	IPv4/v6	IPv4/v6	IPv4	IPv4
Авто-налаштування	Так	Так	Так	Ні	Так
Підтримка UNIX\Linux\Open WRT	Так	Так	Так	Так	Так
Споживання ресурсів	Низьке	Низьке	Низьке	Високе	Низьке
Оверлейний режим роботи	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Інтеграція в ядро Linux	Ні	Так	Ні	Ні	Так
Розробка	Активна	Закінчена	Активна	Ні	Закінчена

Враховуючи порівняльний аналіз протоколів CJDNS, DTN, Netsukuku, OSPF та BATMAN, прийнято рішення перевагу віддати протоколу BATMAN, як найкращому варіанту для вирішення мережних завдань. Цей вибір обумовлено низкою ключових переваг даного протоколу:

1) Оптимізація для мобільних мереж. Протокол BATMAN спеціально розроблено для мобільних мереж, де вузли можуть часто переміщатися та підключатися до мережі [3]. Завдяки алгоритму «стрибкового розсіювання», BATMAN ефективно маршрутизує пакети в мережі, що швидко змінюється, забезпечуючи мінімальні затримки і надійний зв'язок.

2) Автоматичне виявлення сусідів. BATMAN автоматично виявляє сусідні вузли в мережі. Це дозволяє вузлам швидко адаптуватися до змін у топології мережі та миттєво налаштовувати маршрути для ефективної передачі даних.

3) Робота в безпроводових мережах. Завдяки своїй адаптованості до безпроводового середовища, BATMAN ідеально підходить для міських та регіональних мереж, де проводова інфраструктура може бути обмеженою.

4) Простота встановлення та налаштування. Протокол BATMAN простий у налаштуванні, що робить його привабливим для розгортання у середовищах з обмеженим технічним персоналом. Це знижує витрати на навчання та спрощує процес впровадження [4].

Завдяки алгоритму «стрибкового розсіювання» BATMAN забезпечує здатність до самовідновлення мережі у разі збоїв або відключень вузлів. Це сприяє стабільній та надійній роботі мережі навіть в умовах мінливої топології.

Протокол BATMAN дозволяє створювати великі масштабовані мережі, в яких вузли можуть бути додані або видалені без порушення роботи мережі. Це особливо корисно для організацій та інфраструктур, що розширюються.

Протокол BATMAN розроблено спеціально для мобільних мереж, надає оптимальне рішення для мережних завдань, пов'язаних із високою рухливістю вузлів та безпроводовим середовищами. Його здатність автоматично адаптуватися до топології мережі, що змінюється, мінімізувати затримки й забезпечувати надійний зв'язок роблять його найкращим вибором для організацій та проєктів, що вимагають ефективною та надійною маршрутизацією в рухомих мережах.

1.3 Огляд протоколу BATMAN

Протокол BATMAN розробляється у рамках проєкту Open Mesh з розвитку технологій для mesh-мереж, тобто децентралізованих мереж, які не потребують наявності маршрутизаторів чи точок доступу. Кожен вузол у мережі пов'язаний через сусідні вузли, бере участь у процесі маршрутизації і динамічно перенаправляє дані до інших вузлів залежно від поточних умов зв'язності між елементами мережі [3].

BATMAN-Adv - це протокол проактивної маршрутизації для безпроводових мереж [4]. Він використовує дистанційно-векторний підхід і метрику маршрутизації, яка включає в себе надійність радіоканалів. BATMAN-Adv має простий і надійний алгоритм для створення маршрутів з кількома переходами в

ad-hoc мережах. Він не підтримує таблиці з повними маршрутами до пункту призначення, натомість кожен вузол уздовж маршруту зберігає лише інформацію про наступне посилання, через яке вузол може знайти найкращий маршрут. Мета полягає в тому, щоб максимізувати ймовірність доставки повідомлення. При цьому перевіряється не якість кожного посилання, а його існування. Протокол робить ці перевірки періодично з надсиланням пакетів привітання своїм сусідам, які відомі як вихідні повідомлення Originator Message (OGM). Структура пакета OGM:

- адреса відправника;
- адреса вузла надсилання: це змінюється вузлами-одержувачами, а потім пакет повторно транслюється;
- унікальний порядковий номер: порядковий номер використовується для перевірки паралельності повідомлення;
- прапор двонаправленого зв'язку: використовується, коли отриманий пакет OGM є власним і відправником є хтось інший;
- час життя.

Коли вузол отримує пакет OGM, є дві можливості: відправник є або його ще немає в його таблиці маршрутизації. Якщо відправник відсутній у таблиці маршрутизації, то для нього створюється новий запис, а вузол-відправник додається як сусід із одним переходом, а його кількість збільшується. Якщо відправник вже є в таблиці маршрутизації, але відправник є новим, то відправник додається як сусід одного переходу до відправника, а кількість збільшується.

Далі проводиться підрахунок - це кількість отриманих пакетів OGM відправника через певного сусіда з одним переходом. Посилання порівнюються за кількістю повідомлень автора, отриманих у поточному кожному вікні; це значення називається якістю передачі і є показником маршрутизації, який використовує BATMAN. Розсувне вікно - це фіксоване значення, яке визначає діапазон унікальних порядкових номерів, які бачать у кожному пакеті OGM, надісланому вузлом [5]. BATMAN-Adv використовує лише MAC-адресу для звернення до своїх сусідів. Результатом роботи в шарі є те, що BATMAN-Adv здатний емулювати міст Ethernet, так що всі вузли виглядають з'єднаними прямим з'єднанням. Це призводить до того, що всі протоколи вище другого рівня не знають про багатопрхідні посилання [4]. Технологія маршрутизації BATMAN забезпечує низьку вартість обробки та трафіку. Це робить його привабливим

варіантом для використання на пристроях з обмеженими ресурсами. У роботі увагу зосереджено на версії BATMAN-Adv.

Архітектура емулятора в основному складається з двох елементів: вузлів і зв'язків [3]. Кожен вузол складається по діаграмі, яка містить такі елементи:

- OpenWrt, магістральна версія для x86 з мінімальними модифікаціями;
- VirtualBox, версія, що має підтримувати Vde-switch.

Комутатор Vde повинен мати можливість запускати два екземпляри, щоб підтримувати 2,4 ГГц і мережний інтерфейс 5 ГГц.

У BATMAN-Adv немає поширення топологічних повідомлень. Кожен вузол виконує такі операції [5]:

1) Надсилання періодичних рекламних повідомлень - OGM. Розмір цих повідомлень складає всього 52 байти, що містять: IP-адресу відправника, IP-адресу вузла пересилки, значення часу життя і порядковий номер Sequence Number (SQ), що збільшується.

2) Перевірка кращого однокрокового сусіда для кожного (відомого) пункту призначення в мережі за допомогою ранжування.

3) Ретрансляція OGM, отриманих через найкращого односкачкового сусіда.

BATMAN-Adv використовує таймер для відправки OGM та SQ (OGM) для перевірки двонаправленості посилянь. Якщо SQ OGM, отриманий від конкретного вузла, потрапляє у певний діапазон, відповідний канал вважається двонаправленим.

Наприклад, припустимо, що в інтервалі часу T вузол A відправляє T_r повідомлень, де r - частота повідомлень OGM. Сусіди A будуть ретранслювати OGM A , а також OGM інших вузлів. Коли A отримує декілька OGM від сусіднього вузла, наприклад, B , то він перевіряє, чи має останнє отримане повідомлення OGM від B , у якого SQ менше або дорівнює T_r . Якщо це так, то B вважається двоспрямованим, інакше він вважається односпрямованим. Двонаправлені посилення використовуються для ранжування процедури. Величина T_r називається двонаправленим діапазоном порядкових номерів. Процедура ранжирування замінює розширення якості каналу Optimized Link State Routing (OLSR). Таким чином, кожен вузол ранжує свої сусідні вузли за допомогою простого підрахунку загальної кількості отриманих від них OGM. Процедура ранжирування виконується з урахуванням OriGinator для кожного оригінатора. Спочатку для кожної OG кожен вузол зберігає змінну під назвою

Neighbor Ranking Sequence Frame (NBRF), яка обмежена певним значенням, так званим діапазоном порядкових номерів ранжирування. У кожному вузлі є таблиця рангів, де зберігається вся інформація, що міститься в OGM. Щоразу, коли нове вітальне повідомлення приймається двонаправленим каналом, приймаючий вузол виконує наступні кроки:

- якщо порядковий номер OGM менший за відповідний NBRF, то пакет відкидається;
- в іншому випадку оновлюється NBRF SQ (OGM) у таблиці ранжування;
- якщо SQ (OGM) отримано вперше, то OGM зберігається у новому рядку таблиці ранжування;
- інакше збільшується кількість OGM на одиницю або робиться ранжування для цього OGM.

Процедури ранжування обирають найкращого сусіда з одним переходом. Один і той же пакет OGM використовується для визначення каналу, виявлення сусідів, перевірки двонаправленого каналу й механізму лавинної розсилки. Хоча ця функція усуває петлі маршрутизації, оскільки не відбувається лавинної розсилки інформації про глобальну топологію, самоінтерференція через трафік даних може викликати коливання пропускної здатності.

У BATMAN-Adv кожен вузол ретранслює отримані OGM лише один раз і тільки ті OGM, які були отримано від сусіда з найкращим рейтингом. У протоколі кожен вузол вирішує ретранслювати отримані дані з деякою ймовірністю. Це еквівалентно усуненню деяких посилань в мережі, а потім припущенню, що кожен вузол ретранслюється з ймовірністю один. У протоколі існує граничне значення для ймовірності й щільності вузлів, після якого коефіцієнт успіху майже напевно дорівнює одиниці. В BATMAN-Adv ймовірність змінюється відповідно до процедури ранжирування. Це ймовірність того, що OGM досягається через найкращого сусіда за рангом. Насправді, сукупна кількість OGM може бути більшою, ніж загальна кількість OGM, отриманих через поточного кращого сусіда [6].

1.4 Особливості стандарту IEEE 802.11g

Стандарт IEEE 802.11 має набір безпроводових стандартів IEEE, які регулюють спосіб передачі в мережі. Сьогодні вони широко використовуються у версіях IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac

для забезпечення безпроводового зв'язку у будинках, офісах та інших установах [7].

Стандарт IEEE 802.11g було засновано як розширення стандарту IEEE 802.11b. При цьому збільшено пропускну здатність до 54 Мбіт/с з використанням тієї ж смуги частот 2,4 ГГц, що і в стандарті IEEE 802.11b. Стандарт IEEE 802.11g надає високу пропускну здатність, що робить його привабливим для передачі даних із високими вимогами до швидкості, такими як потокове відео, онлайн-ігри та великий обсяг інформації.

Стандарт IEEE 802.11g на основі mesh-архітектури є цікавим і перспективним підходом до створення безпроводових мереж. Mesh-архітектура є підходом, при якому пристрої мережі працюють як активні маршрутизатори, передаючи дані один одному для створення безлічі можливих маршрутів від відправника до одержувача. Це дозволяє створювати гнучкі та стійкі мережеві топології, особливо в умовах великих чи складних просторів.

У контексті стандарту IEEE 802.11g на базі mesh-архітектури пристрої можуть обмінюватися даними безпосередньо через проміжні вузли, забезпечуючи більш надійні шляхи передачі даних й знижуючи ймовірність втрати зв'язку. Це особливо корисно в ситуаціях, коли вузли можуть переміщатися або мережа повинна забезпечувати покриття на віддалених або складних територіях [8].

Пристрої стандарту IEEE 802.11g повністю сумісні із пристроями стандарту IEEE 802.11b. Тим не менш, наявність пристрів, що працюють в мережах стандарту IEEE 802.11b, значно знижують швидкість всієї мережі ніж ті пристрої, що працюють в рамках стандарту IEEE 802.11g [8].

В стандарті IEEE 802.11g використовується Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) модуляція, що запозичено зі стандарту IEEE 802.11a зі швидкістю передачі даних 6, 9, 12, 18, 24, 45 Мбіт/с та відновленням до Complementary Code Keying (ССК) для 5,5 Мбіт/с та 11 Мбіт/с та модуляціями DBPSK/DQPSK + DSSS для 1 Мбіт/с та 2 Мбіт/с.

48 підносіїв OFDM модуляції зарезервовано для даних, в той час як 4 підносія є пілотними сигналами з розподілом носія на частоті 0,3125 МГц. Тривалість символу 4 мкс, при цьому він додатково включає захисний інтервал 0,8 мкс. Фактично генерація та декодування ортогональних компонент відбувається у смузі частот модулюючого сигналу від Digital Signal Processing (DSP). Далі вони перетворюються на частоту 2,4 ГГц у передавачі. Перевагою використання OFDM модуляції є зниження ефектів багатопроменевого

поширення сигналу до приймача та підвищення ефективності використання спектра [7].

Якісний прийом та швидка реалізація стандарту IEEE 802.11g характеризується дуже схожим рівнем перешкод в тракті передачі, які відзначаються у стандарті IEEE 802.11b у переповненому діапазоні 2,4 ГГц. Пристрої, що працюють у цьому діапазоні - це мікрохвильові печі, пристрої Bluetooth або цифрові безпроводові телефони, що часто призводить до серйозних завад. Крім того, існують часті проблеми, які пов'язані з великою кількістю користувачів та появою щільності у міських районах. Перелік частот та графічне представлення каналів стандарту IEEE 802.11g наведено в табл. 1.2 та на рис. 1.5.

Таблиця 1.2 – Перелік частот та відповідних каналів стандарту IEEE 802.11g

Канал	Центральна частота, ГГц	Ширина каналу, ГГц	Перекриття каналів
1	2,412	2,401 – 2,423	2,3,4,5
2	2,417	2,406 – 2,428	1,3,4,5,6
3	2,422	2,411 – 2,433	1,2,4,5,6,7
4	2,427	2,416 – 2,438	1,2,3,5,6,7,8
5	2,432	2,421 – 2,443	1,2,3,4,6,7,8,9
6	2,437	2,426 – 2,448	2,3,4,5,7,8,9,10
7	2,442	2,431 – 2,453	3,4,5,6,8,9,10,11
8	2,447	2,436 – 2,458	4,5,6,7,9,10,11,12
9	2,452	2,441 – 2,463	5,6,7,8,10,11,12,13
10	2,457	2,446 – 2,468	6,7,8,9,11,12,13
11	2,462	2,451 – 2,473	7,8,9,10,12,13
12	2,467	2,456 – 2,478	8,9,10,11,13,14
13	2,472	2,461 – 2,483	9,10,11,12,14
14	2,484	2,473 – 2,495	12,13

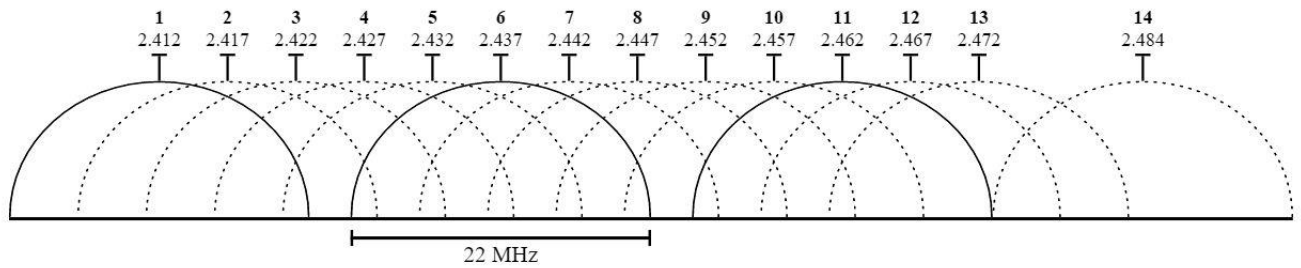


Рисунок 1.5 – Графічне представлення 14 каналів та відповідні їм центральні частоти

На рис. 1.5 відображено 14 безпроводових каналів в діапазоні частот 2,4 ГГц, які використовуються в стандарті IEEE 802.11g [7].

Однією з основних вимог до специфікації стандарту IEEE 802.11g є зворотна сумісність із пристроями стандарту IEEE 802.11b. Дійсно, у стандарті IEEE 802.11b прийнята схема ССК. В стандарті IEEE 802.11g передбачено ССК-схему для швидкостей до 11 Мбіт/с та OFDM модуляцію для більш високих швидкостей. Мережі стандарту IEEE 802.11 використовують принцип Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance (CSMA/CA) - множинний доступ до каналу зв'язку з контролем носія та запобігання колізіям. Жодний пристрій стандарту IEEE 802.11 не повинен починати передачу, доки не переконається, що ефір у діапазоні вільний від інших пристроїв. Якщо в зоні чутності виявляться пристрої стандартів IEEE 802.11b й 802.11g, причому обмін відбуватиметься між пристроями стандарту IEEE 802.11g за допомогою OFDM модуляції, то обладнання стандарту IEEE 802.11b просто не зрозуміє, що інші пристрої ведуть передачу, і спробує почати трансляцію.

Щоб подібну ситуацію не допустити, передбачено можливість роботи у змішаному режимі - ССК-OFDM. Інформація у мережах стандарту IEEE 802.11 передається кадрами. Кожен інформаційний кадр включає два основні поля: преамбулу із заголовком та інформаційне поле, що зображено на рис. 1.6.

Прембула/ заголовок	Інформаційне поле	
OFDM	OFDM	Обов'язкове
ССК	ССК	
ССК	OFDM	Можливе
ССК	PBSS	

Рисунок 1.6 – Кадри стандарту IEEE 802.11g у різних режимах модуляції

Прембула містить синхропослідовність і код початку кадру, заголовок - службову інформацію, у тому числі про тип модуляції, швидкість і тривалість передачі кадру. У режимі ССК-OFDM прембула та заголовок модулюються методом ССК шляхом прямого розширення спектру Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) за допомогою послідовності Баркера, у стандарті IEEE 802.11g цей режим називається DSSS/OFDM. Таким чином, всі пристрої стандарту IEEE 802.11b, що постійно «прослуховують» ефір, приймають заголовки кадрів і дізнаються, скільки часу транслюватиметься кадр стандарту IEEE 802.11g. У цей час вони «мовчать». Пропускна здатність мережі падає, оскільки швидкість передачі прембули та заголовка становить 1 Мбіт/с.

Для досягнення компромісу в стандарті IEEE 802.11g та 802.11b як додаткову можливість введено необов'язковий режим - Personal Basic Service Set (PBSS), в якому заголовок і прембула передаються так само, як і за схемою ССК, а інформаційне поле модулюється за схемою PBSS і передається на швидкості 22 Мбіт/с або 33 Мбіт/с [8]. В результаті цього пристрої стандарту IEEE 802.11g повинні бути сумісними з усіма модифікаціями обладнання стандарту IEEE 802.11b і не створювати взаємних завад. Діапазон підтримуваних швидкостей стандарту IEEE 802.11g відображено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Швидкості та тип модуляції у специфікації IEEE 802.11g

Швидкість, Мбіт/с	Тип модуляції	
	Обов'язково	Допустимо
1	Послідовність Баркера	-
2	Послідовність Баркера	-
5,5	ССК	PBSS
6	OFDM	ССК-OFDM
9	-	OFDM, ССК-OFDM
11	ССК	PBSS
12	OFDM	ССК-OFDM
18	-	OFDM, ССК-OFDM
22	-	PBSS
24	OFDM	ССК-OFDM
33	-	PBSS
36	-	OFDM, ССК-OFDM
48	-	OFDM, ССК-OFDM
54	-	OFDM, ССК-OFDM

Але ж виробники не будуть підтримувати режими ССК-OFDM і PBSS в силу їх необов'язковості, адже майже все вирішує ціна пристрою. Тому основною проблемою стандарту IEEE 802.11g є забезпечити безконфліктної роботи змішаних мереж стандартів IEEE 802.11b/g.

2 АНАЛІЗ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОТОКОЛУ BATMAN

2.1 Особливості протоколу BATMAN-Adv

У роботі проведено аналіз протоколу BATMAN-Adv. Проблема класичних протоколів маршрутизації полягає в тому, що вони погано підходять для безпроводових ad-hoc мереж. Це пов'язано з тим, що такі мережі неструктуровано, динамічно змінюють свою топологію й засновано на ненадійному середовищі передачі даних.

Підхід алгоритму BATMAN-Adv полягає в тому, щоб розділити знання про найкращі наскрізні шляхи між вузлами в сітці на всі вузли, що беруть участь. Кожен вузол сприймає й зберігає тільки інформацію про найкращий наступний перехід до всіх інших вузлів. Таким чином, необхідність у глобальному інформуванні щодо локальних змін топології усувається [9]. Протокол BATMAN-Adv, заснований на подіях, але не залежить від часу, тому ніколи не планує та не відкладає отримання топологічної інформації для оптимізації своїх рішень щодо маршрутизації.

Алгоритм протоколу BATMAN-Adv може бути описаний (спрощено) таким чином. Кожен вузол передає широкомовні повідомлення OGM для інформування сусідніх вузлів про своє існування. Ці сусіди за певними правилами повторно передають OGM, щоб повідомити своїм сусідам про існування первісного ініціатора цього повідомлення, тощо. Таким чином, мережа переповнюється повідомленнями ініціаторів. OGM мають невеликий розмір, стандартний розмір необробленого пакета становить 52 байт, включно з накладними витратами Internet Protocol (IP) та User Datagram Protocol (UDP). OGM містять щонайменше адресу ініціатора, адресу вузла, що передає пакет, Time to Live (TTL) й порядковий номер [10].

Однак такий підхід має і деякі недоліки [11]:

– безпроводові інтерфейси зазвичай характеризуються втратою пакетів, що змінюється з плином часу, тому бажано використовувати вищу швидкість передачі протоколу, щоб швидко реагувати на нестабільні з'єднання. Інші інтерфейси того ж хоста можуть бути підключені до локальних мереж Ethernet, VPN тощо, які рідко демонструють втрату пакетів або зміну стану з'єднання. Для

них буде корисно знизити швидкість передачі протоколу, щоб зменшити накладні витрати;

– як правило, більш бажано виявляти локальні зміни якості з'єднання з більшою швидкістю, ніж поширювати всі ці зміни всією мережею (дальній кінець мережі не повинен піклуватися про локальні коливання якості з'єднання). Інші стратегії оптимізації для зниження накладних витрат були б можливі, якби OGM не використовували для всіх завдань у мережі одночасно.

Початкова багатоканальна оптимізація BATMAN-Adv працює на локальному рівні - що досить легко реалізувати, і вона працює добре доти, доки всі вузли налаштовані однаково та мають схожі якості каналів зв'язку.

Однак локальне рішення може бути неоптимальним у масштабах усієї мережі. Так на рис. 2.1 показано роботу двох радіоканалів із частотами 2 ГГц і 5 ГГц [12].

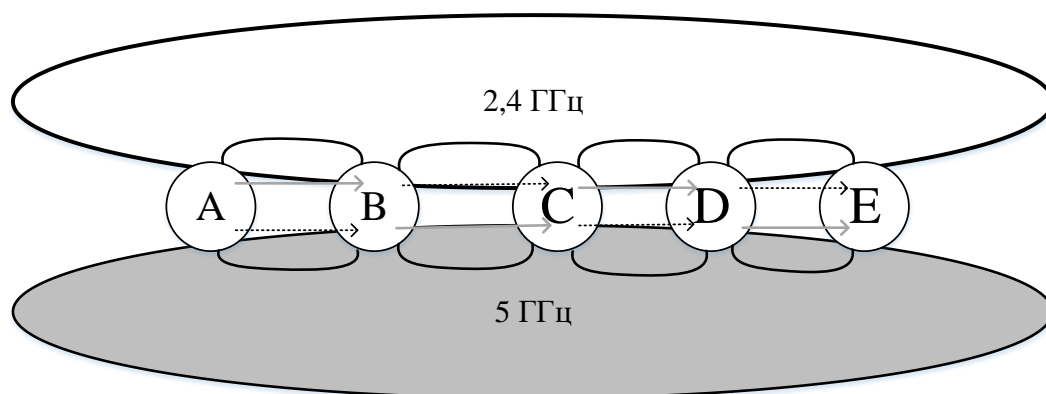


Рисунок 2.1 – Робота радіоканалів на частотах 2 ГГц і 5 ГГц

Перший вузол починає роботу на частоті 5 ГГц, але після кількох переходів (поперемінно між 2,4 і 5 ГГц) зупиняється на пристрої, що працює тільки на частоті 2,4 ГГц. Якби під час першого переходу він вибрав інший канал (2,4 ГГц), то вибору однієї і тієї ж частоти двічі можна було б уникнути, і загальна якість трафіку була б вищою.

Таке обмеження може бути вирішене шляхом ретрансляції інформації про декілька інтерфейсів по всій мережі. Це вимагає деяких змін у маршрутизації та пересиланні [11].

Основна ідея полягає у використанні не однієї, а $n+1$ таблиці маршрутизації, причому n - це кількість сконфігурованих інтерфейсів [11]:

– таблиця маршрутизації для кожного вхідного інтерфейсу;

– додаткова таблиця маршрутизації «за замовчуванням» для пакетів, що генеруються локально.

Таблицю маршрутизації вибирають залежно від того, через який інтерфейс пакет надійшов у систему. BATMAN-Adv використовує стратегію поділу, щоб краще впоратися з різними варіантами використання. Для виявлення сусідів використовується протокол Echo Location Protocol (ELP). Цей тип пакетів ніколи не пересилається і не ретранслюється в комірці. Протокол відправника повідомлень OGMv2, як і раніше, відповідає за передання в комірку інформації про якість з'єднання і визначення загальної якості передавання даних на шляху [13].

Поділ завдань (виявлення сусідів й маршрутизація мережі) має такі переваги:

– зниження накладних витрат, оскільки OGM можна відправляти з меншим інтервалом. Поширення OGM має квадратичну величину накладних витрат у найгірших сценаріях, тому повільніші інтервали є дуже бажаними;

– виявлення сусідів і збір метричних даних можуть виконуватися окремо, з різними інтервалами або навіть різними методами;

– зусилля з опрацювання декількох інтерфейсів можуть бути знижені.

У BATMAN-Adv використовується пропускна здатність пакетів як метрика для всієї сітки. Залежно від типу каналу зв'язку BATMAN-Adv може визначати пропускну здатність автоматично:

– у безпроводовій мережі. Сучасні драйвери Wi-Fi експортують розрахункову пропускну здатність на одного сусіда Wi-Fi. Це значення витягується на періодичній основі та усереднюється перед поширенням у мережі;

– у проводовій мережі. Більшість пристроїв з підтримкою Ethernet експортують свої теоретичні дуплексні можливості через Application Programming Interface (API) `ethtool`;

– `unknown/override`. BATMAN-Adv дає змогу задати значення пропускну здатності для кожного інтерфейсу через загальний мережний зв'язок. Отже, протокол BATMAN-Adv буде приймати зазначену пропускну здатність для будь-якого сусіда, виявленого через цей інтерфейс;

– лічильник пропускну здатності. Якщо пропускну здатність не можна запросити через будь-який API й налаштувати вручну, то BATMAN-Adv періодично виконуватиме тест пропускну здатності за допомогою вбудованого протоколу тестування пропускну здатності.

Оцінка пропускної здатності сусідів Wi-Fi залежить від того, наскільки драйвер Wi-Fi здатний оцінити пропускну здатність. Зазвичай для точного оцінювання драйвер Wi-Fi має надсилати трафік корисного навантаження кожному сусіду. На незайнятих каналах BATMAN-Adv буде час від часу ініціювати передачу корисного навантаження для підживлення логіки оцінки драйвера Wi-Fi [14].

Пропускна здатність шляху між вузлом А й вузлом В обчислюється як мінімальне значення між пропускними здатностями всіх заданих каналів на шляху між вузлом А й вузлом В (до розрахунків також включають інші чинники).

Для підтримки протоколів mesh модуль ядра BATMAN-Adv здатний паралельно запускати кілька незалежних mesh-мереж на одному хості. З користувацького простору цю можливість можна реалізувати шляхом створення кількох мережних інтерфейсів batX, кожному з яких призначається свій підлеглий інтерфейс чи інтерфейси для запуску мережі. Коли такий mesh-інтерфейс створено, BATMAN-Adv може бути налаштовано на використання певного mesh-протоколу.

Як приклад для оцінювання продуктивності мережі в роботі проведено аналіз продуктивності протоколу BATMAN-Adv на мережному та каналному рівнях (BATMAN-AdvL3 й BATMAN-AdvL2) з використанням результатів досліджень, отриманих у [15, 16]. На рис. 2.2 показано продуктивність зазначених протоколів.

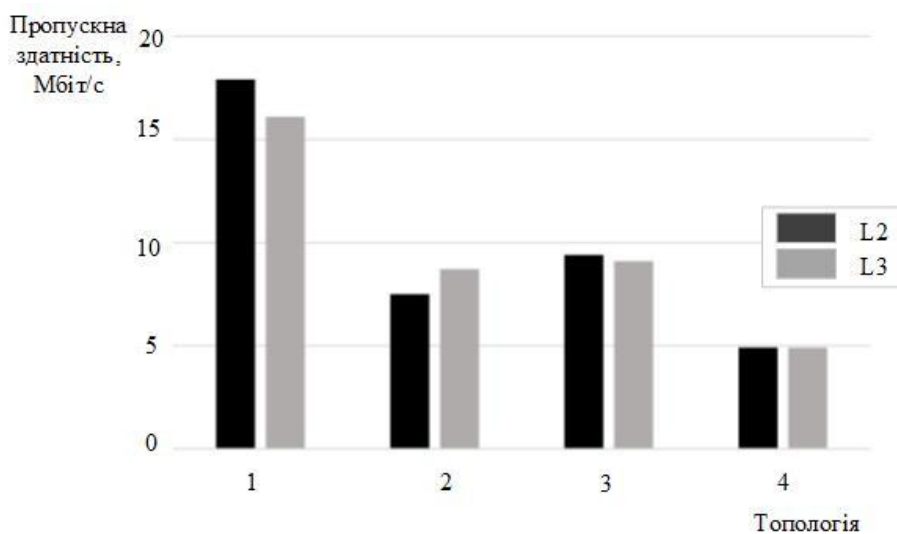


Рисунок 2.2 – Пропускна здатність протоколу BATMAN-Adv

На рис. 2.2 показані результати порівняння BATMAN-AdvL2 та BATMAN-AdvL3 для чотирьох топологій. Перша топологія представляє зону прямого зв'язку зі шлюзом за відсутності маршрутизації. Інші топології є розташуванням вузлів у довільному порядку.

Як показує аналіз BATMAN-AdvL2 та BATMAN-AdvL3 відмінністю в продуктивності між маршрутизацією каналного й мережного рівнів є розмір пакета. Протоколи маршрутизації каналного рівня не вимагають заголовка IPv4/IPv6 мережного рівня й тому можуть бути меншими. Цей аргумент має мінімальне значення, оскільки протокол маршрутизації є набагато більше значущим фактором, що визначає накладні витрати. Як приклад можна стверджувати, що будь-який протокол маршрутизації (наприклад, Babel або OLSR), який використовує великий заголовок IPv6, що збільшує розмір пакета кожного повідомлення маршрутизації на 40 байт, має менші накладні витрати, ніж BATMAN-AdvL2, що працює без IP-заголовка [17].

2.2 Дослідження продуктивності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11b/g/n з підтримкою BATMAN-Adv

У якості дослідження обрано модель мережі, що аналогічна кампусу. Апаратні та програмні вимоги для дослідження наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вимоги до апаратного та програмного забезпечення

Апаратна платформа	TP-Link WR1043ND
Chipset – материнська плата	Qualcomm Atheros QCA 9558
RAM – оперативна пам'ять	Flash 64MB, 8MB
Firmware – попередньо встановлене програмне забезпечення	OpenWrt

Топологія моделі мережі для дослідження являє собою чотири маршрутизатори TP-Link WR1043ND. Моделювання проводиться на 1-му, 2-му й 3-му кроці. Обрано специфікацію роутера TP-Link WR1043ND [12]. Такий вибір зумовлено високою надійністю й високофункціональністю пристрою для роботи в

домашніх та офісних мережах. У табл. 2.2 надано основні характеристики маршрутизатора TP-Link WR1043.

Таблиця 2.2 – Характеристики маршрутизатора TP-Link WR1043

Характеристика	Опис
Стандарт безпроводового зв'язку та максимальна безпроводова швидкість передавання даних	IEEE 802.11b/g/n (до 300 Мбіт/с)
Підтримувані частоти	2,4 ГГц
Порти	4 порта Gigabit Ethernet та 1 USB порт
Процесор	400 МГц
Оперативна пам'ять	32 Мб оперативної пам'яті
QoS	Підтримується для пріоритизації мережного трафіку
Підтримка сторонньої прошивки	OpenWrt
Сумісність з IPv6	Так

З використанням прошивки OpenWrt маршрутизатор TP-Link WR1043ND дає змогу здійснити глибоке налаштування та оптимізацію мережі. Цей функціональний аспект дає змогу користувачам розширювати функціональність пристрою.

OpenWrt - це операційна система на основі ядра Linux, призначена для маршрутизаторів і шлюзів. Крім роутерів TP-Link, для мобільного відеоспостереження можна використовувати плати Raspberry Pi, інтегровані з веб-камерами. Встановлено необхідні драйвери для додаткових компонентів, таких як веб-камера та адаптер Wi-Fi. Прошивка OpenWrt надає такі переваги:

1) Встановлення сторонніх додатків. Користувачі можуть встановлювати сторонні додатки та розширення, що дає змогу додатково налаштувати маршрутизатор й додавати нові функції.

2) Просунуте налаштування мережі. OpenWrt надає доступ до розширених параметрів мережі, таких як: маршрутизація, налаштування брандмауера та керування якістю обслуговування QoS.

3) Створення віртуальних приватних мереж VPN. Користувачі можуть створювати віртуальні приватні мережі для забезпечення безпечного віддаленого доступу до своєї мережі.

4) Інтеграція в системи домашньої автоматизації. З використанням OpenWrt, маршрутизатор можна інтегрувати в системи «розумного будинку» та автоматизації для контролю над домашньою мережею.

На першому етапі моделювання налаштовано BATMAN-Adv на OpenWrt, включно з конфігурацією мережних інтерфейсів й безпроводових інтерфейсів [18]:

1) Отримання середовища збірки OpenWrt, яке містить усі необхідні інструменти для компіляції та налаштування системи OpenWrt. Це робиться в каталозі завантажених вихідних файлів OpenWrt з налаштуванням середовища збірки за допомогою команди `make menuconfig` для вибору платформи й додаткових пакетів (рис. 2.3).

```
$ cd /C:/Program Files/openwrt
$ make menuconfig
```

Рисунок 2.3 – Робота команди `make menuconfig`

2) Додавання пакетів BATMAN-Adv до середовища збірки OpenWrt (рис. 2.4).

```
scripts/feeds update
scripts/feeds install kmod-batman-adv
scripts/feeds install batctl
```

Рисунок 2.4 – Додавання пакетів BATMAN-Adv

Оновлення інформації про пакети (рис. 2.5).

```
scripts/feeds update
scripts/feeds install kmod-batman-adv-devel
scripts/feeds install batctl-devel
```

Рисунок 2.5 – Оновлення інформації про пакети

Налаштування BATMAN-Adv: вибір пакета BATMAN-Adv у меню пакетів OpenWrt (рис. 2.6).

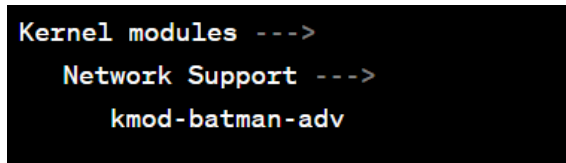


Рисунок 2.6 – Вибір пакета BATMAN-Adv

Після цього виконується компіляція OpenWrt з налаштуваннями BATMAN-Adv - виконання make у каталозі збірки OpenWrt.

Таким чином, першою конфігурацією є: вказівка BATMAN-Adv, типу інтерфейсу, який буде використовуватися для побудови mesh-мережі.

Типи інтерфейсів можуть бути такі: wlanX (для 802.11), ethX (для Ethernet), panX (для Bluetooth). У роботі використано інтерфейси мережі wlanX і ethX, що дає змогу сформувати mesh-мережу або з використанням локального кабелю, або в безпроводовій мережі з використанням стандарту 802.11 g/n. Призначення IP-адрес цим інтерфейсам не потрібне, оскільки робота BATMAN-Adv повністю базується на другому рівні моделі OSI, і пакети даних не надсилаються на ці інтерфейси.

Замість цього пакети даних пересилаються на віртуальний інтерфейс bat0, створений протоколом BATMAN-Adv [10]. Призначення IP-адреси вручну або динамічно є обов'язковим для цього інтерфейсу bat0. Модуль ядра BATMAN-Adv перевіряє всі пакети, що приходять на цей інтерфейс, щоб визначити його MAC-адресу призначення. Потім пакети пересилаються і з'являться на інтерфейсі bat0 пункту призначення. Два SSID для двох мережних інтерфейсів, а саме bat0, eth0 і adhoc0, створюються для конфігурації безпроводової мережі. Перший SSID для інтерфейсів bat0 та eth0 переводиться в режим точки доступу, щоб будь-яка зовнішня станція або клієнт могли під'єднатися до mesh-мережі, тоді як другий переводиться в режим ad-hoc. Маршрутизаторам TP-Link з відповідними SSID призначено IP-адреси від 192.168.99.25 до 192.168.99.29. На всіх маршрутизаторах встановлено пакет OpenWrt, який є інструментом моніторингу мережі. Під час надсилання пакетів UDP із сервера на кожен вузол мережі вимірювалися й відзначалися пропускна здатність мережі та затримки.

Налаштування мережного протоколу BATMAN-Adv здійснювалося за допомогою утиліти batctl [19]. Ця утиліта присутня в стандартному репозиторії, для її встановлення використано команду `sudo apt-get install batctl`. Далі відбувається виконання перевірки командою `batctl -v`, причому результат має бути таким: `batctl debian-2016.0-2 [batman-adv: 2012.1.0]`. Це означає, що batctl працює й має версію 2016.0-2, але модуль ядра batman-adv не завантажено. Далі завантажується модуль ядра, виконавши команду `modprobe batman-adv`, а після виконання команди виконується перевірка (рис. 2.7).

```
root@orangeplus2e:~# batctl -v
batctl debian-2016.0-2 [batman-adv: 2012.1.0]
```

Рисунок 2.7 – Перевірка працездатності утиліти batctl

Налаштування мережного інтерфейсу проводиться за допомогою утиліти `nmtui`, при цьому створюється точка доступу з вибором режиму `ad-hoc` [22]. Канал у всіх учасників mesh-мережі має бути однаковий.

Для оцінки продуктивності mesh-мережі отримано результати затримки й пропускної здатності на 1-му кроці, 2-му кроці і 3-му кроці. Значення затримок наведено на рис. 2.8.

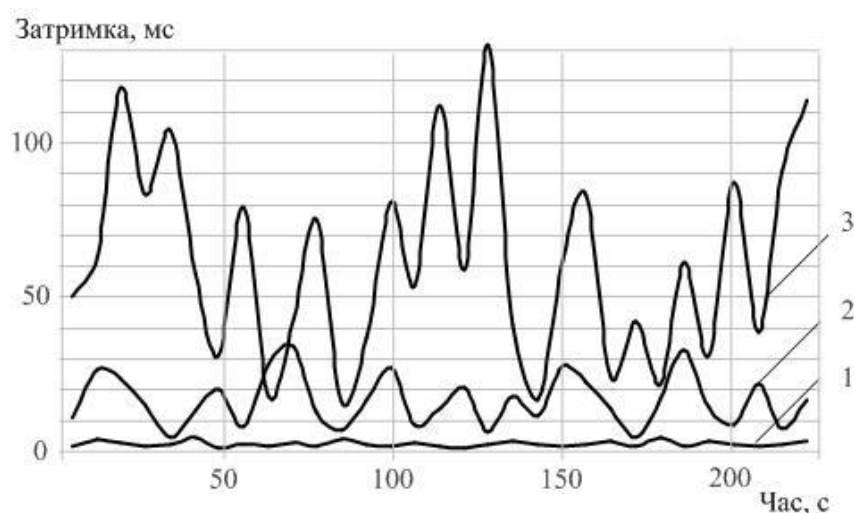


Рисунок 2.8 – Затримка мережі

Показники пропускної здатності показано на рис. 2.9.

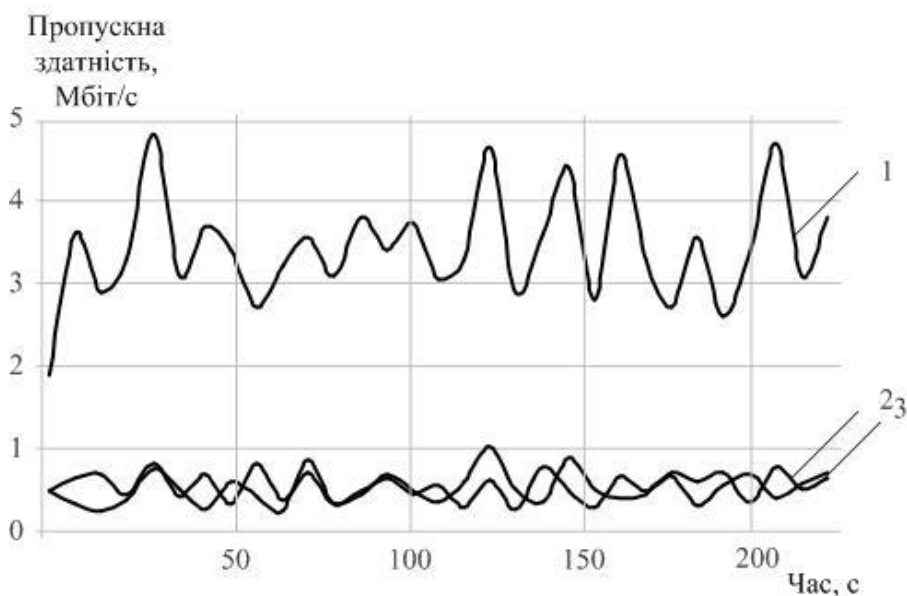


Рисунок 2.9 – Пропускна здатність мережі

Оцінка продуктивності мережі показує, що пропускна здатність поступово знижується зі збільшенням кроку дослідження, тоді як затримка збільшується. Середня пропускна здатність й затримка вказано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Середня пропускна здатність й затримка

Номер кроку	Пропускна здатність, Мбіт/с	Затримка, мс
1	3,517	2,0317
2	0,5605	15,4710
3	0,4562	39,9662

Аналіз показників середньої пропускної здатності та затримки для кожного кроку показано на рис. 2.10.

Через більш високі накладні витрати на маршрутизацію випереджувального характеру протоколу BATMAN-Adv пропускна здатність знижується зі збільшенням кроків дослідження [23]. Більш того, завади, створювані стандартами 802.11 як усередині, так і поза приміщеннями, також призводять до зниження пропускної здатності. Збільшення затримки зі збільшенням кроку переходів можна пояснити рівнянням дифузійного наближення [24].

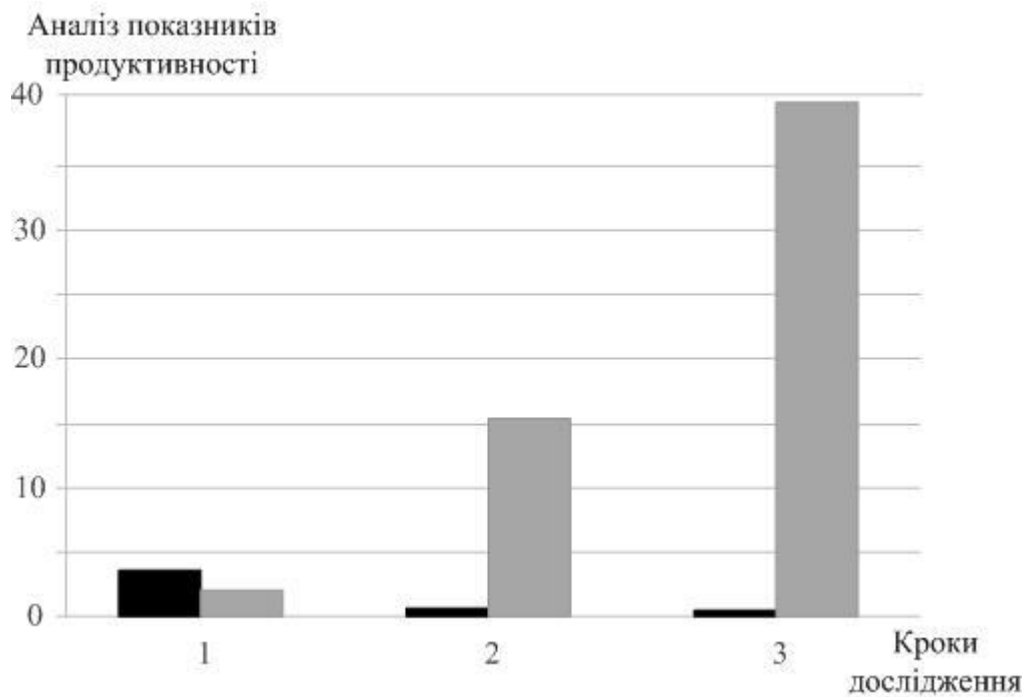


Рисунок 2.10 – Аналіз показників середньої пропускної здатності та затримки для кожного кроку

Продуктивність мережі може варіюватися залежно від типу використовуваного протоколу. Як рішення для підвищення пропускної здатності та зменшення затримки можна запропонувати: використання різних типів протоколів або використання ретрансляторів mesh-мережі для посилення потужності сигналу.

3 ОЦІНКА ПОТУЖНОСТІ СИГНАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ СТАНДАРТУ IEEE 802.11G

3.1 Дослідження поширення радіосигналів на коротких відстанях

У роботі проведено аналіз показників поширення сигналу з використанням радіоінтерфейсу стандарту IEEE 802.11g всередині приміщення, який працює в радіодіапазоні ISM (Industrial, Scientific and Medical) на частоті 2,4 ГГц. У якості математичного аналізу використано модель втрат на трасі розповсюдження Log Distance.

Сценарії роботи в приміщеннях зазвичай складніші, оскільки численні об'єкти можуть розсіювати, дифрагувати, відбивати й поглинати випромінювання. Ситуація ускладнюється через переміщення користувачів та обстановку, що швидко змінюється. Внутрішнє середовище не є стаціонарним, як у просторі, так і в часі. Можливість прогнозування поведінки сигналів у закритих приміщеннях має вирішальне значення. Таким чином, виникає необхідність у розумінні особливостей поведінки сигналів у цих безпроводових системах.

Під час аналізу проведено аналіз механізмів поширення сигналу, які впливають на поведінку сигналу в приймачі, водночас враховується, що між передавачем й приймачем є перешкоди. Залежно від конструкції та планування будівлі сигнал зазвичай поширюється коридорами та іншими відкритими просторами. У більшості випадків застосовуються умови відсутності прямої видимості Non-Line of Sight (NLOS).

Існує безліч моделей, які описують поширення сигналів у просторі [25-32]. Однак у дослідженні для прогнозування втрат сигналу під час передавання використовується модель Log Distance Path Loss (LDPL).

Типи механізмів поширення сигналу - відбиття, розсіювання та дифракція - показано на рис. 3.1.

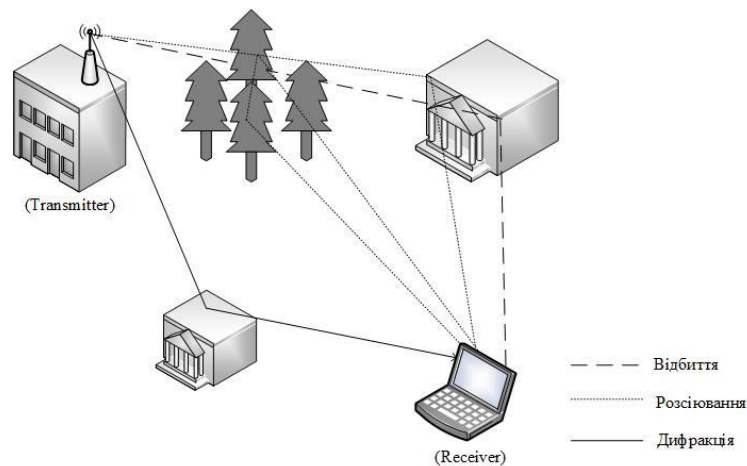


Рисунок 3.1 – Типи механізмів поширення сигналу

Механізм відбиття відбувається, коли передана хвиля стикається з об'єктом, що має великі розміри порівняно з довжиною хвилі, наприклад, з великими стінами, металевими шафами, стелями й меблями. Частина переданого сигналу буде поглинена цими об'єктами, а частина, що залишилася, відіб'ється від їхньої поверхні. Енергія переданої та відбитої хвиль залежить від геометрії й властивостей матеріалу перешкоди, а також від амплітуди, фази й поляризації падаючої хвилі [33].

Розсіювання відбувається у випадках, коли передана хвиля стикається з великою кількістю малорозмірних об'єктів, таких як металеві шафи, ліхтарні стовпи, кущі та дерева. Відбита енергія під час розсіювання поширюється в усіх напрямках, перш ніж досягне приймача. Дифракція виникає, коли поверхня перешкоди має гострі краї, що створюють вторинні хвилі, які, по суті, огинають перешкоду. Як і відбиття, дифракція залежить від фізичних властивостей перешкоди й характеристик падаючої хвилі. У ситуаціях, коли приймач сильно захищено, дифраговані хвилі можуть мати достатню силу для отримання корисного сигналу.

Модель прогнозування втрат на трасі розповсюдження - це емпіричне математичне формулювання для характеристики поширення радіохвиль. Зазвичай такі моделі розробляються для прогнозування поведінки сигналу в різних середовищах й місцях. Використана модель придатна для поширення сигналу поза приміщеннями на коротких відстанях.

Математична модель втрат сигналу на логарифмічній відстані описано формулою [34]:

$$P_L = U_L + 10n \log(d), \quad (3.1)$$

де P_L – потужність втрат в тракті;

U_L – втрати потужності (дБ) на відстані 1 м (30 дБ);

n – коефіцієнт втрат на шляху розповсюдження;

d – відстань між передавачем і приймачем.

Середовище поширення радіосигналів усередині приміщень характеризується безліччю особливостей й характеристик і є дуже складним [35-37].

Моделювання рівня сигналу виконано для трьох випадків з відповідними умовами: NLOS1 (відстань ~ 60 м), NLOS2 (відстань ~ 40 м) і Line of Sight LOS. Результати моделювання також порівнюються з теоретичними дослідженнями [34], проведеними для різних сценаріїв поширення сигналу в каналах зв'язку всередині приміщень.

На рис. 3.2 показано вимірний рівень сигналу залежно від кривої втрат на трасі Log Distance для випадку NLOS1.

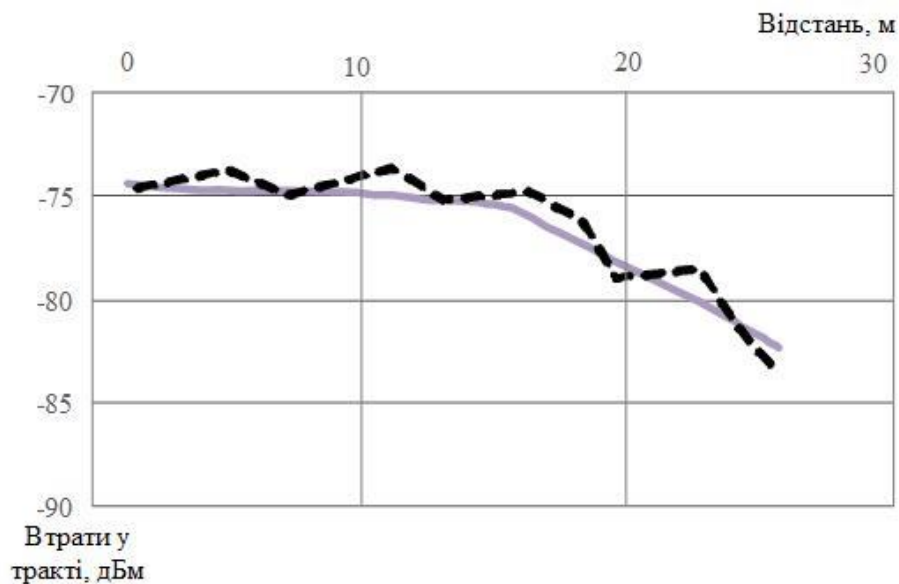


Рисунок 3.2 – Поширення в приміщенні для випадку NLOS1

На рис. 3.3 показано вимірний рівень сигналу залежно від кривої втрат у трасі Log Distance для випадку LOS.

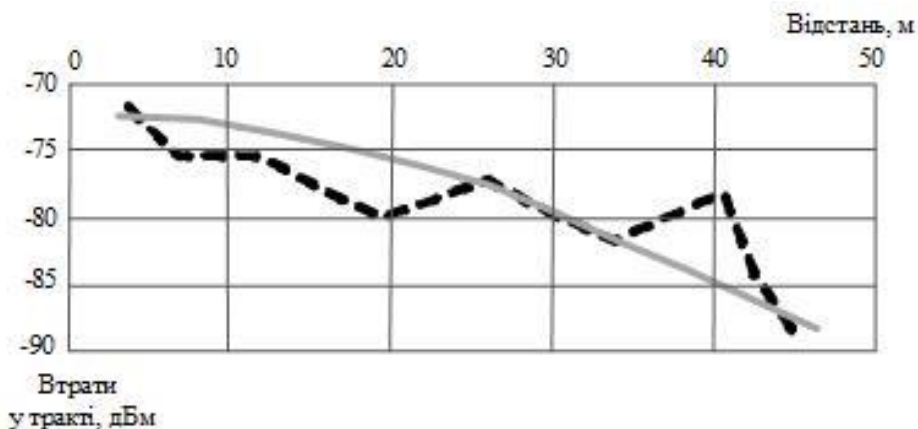


Рисунок 3.3 – Поширення в приміщенні для випадку LOS

На рис. 3.4 показано вимірний рівень сигналу залежно від кривої втрат у трасі Log Distance для випадку NLOS2.

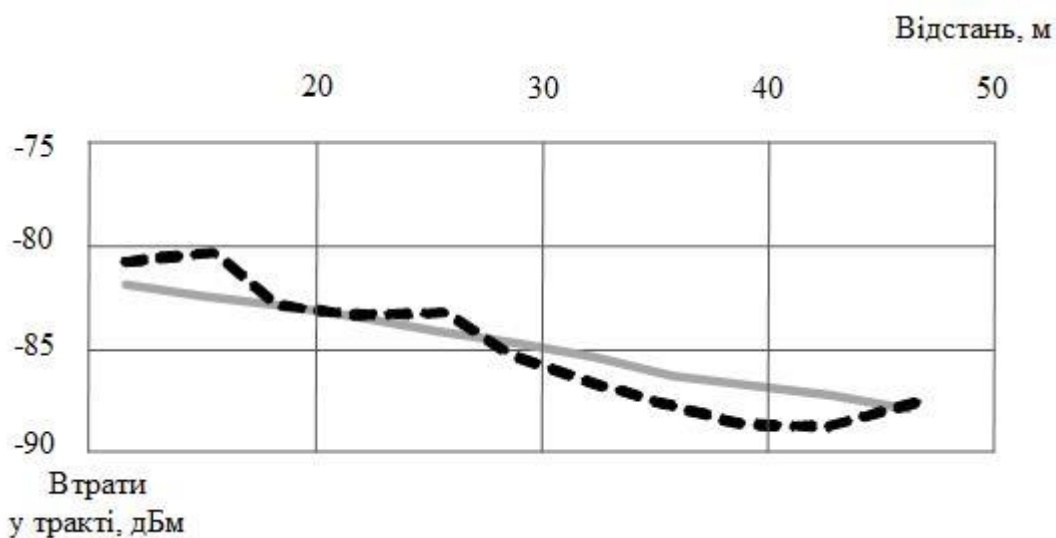


Рисунок 3.4 – Поширення в приміщенні для випадку NLOS2

В умовах NLOS1 й NLOS2 вимірні дані відповідають кривій втрат у трасі Log Distance. А в умовах LOS - вимірний сигнал не зовсім точно повторює криву втрат у трасі Log Distance. Порівняння теоретичного та змодельованого сигналу з урахуванням прямих втрат і ефектів механізму поширення показало, що модель втрат у трасі Log Distance може бути використано для прогнозування загальних втрат на трасі в приміщеннях, особливо в умовах NLOS.

У табл. 3.1 наведено значення коефіцієнта втрат на трасі для всіх трьох випадків.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнт втрат у тракті на частоті 2,4 ГГц

Поширення в приміщеннях	n
NLOS1	4
LOS	2,68
NLOS2	3,22

Остаточне значення коефіцієнта втрат на шляху для внутрішнього середовища виходить із середнього значення n. Коефіцієнт втрат шляху n для NLOS перебуває в діапазоні 3,22 - 4,00. Для LOS коефіцієнт втрат у тракті дорівнює 2,68.

3.2 Оцінювання потужності сигналу на значних відстанях

Дослідження спрямоване на аналіз рівня сигналу стандарту IEEE 802.11g для оцінювання якості сигналу, що є необхідним для проектування мережної інфраструктури та прогнозування гарного покриття. Вибір загальноприйнятого стандарту IEEE 802.11g, в основному використовуваного в житлових та комерційних додатках, обумовлено низькою вартістю розгортання та обслуговування.

Для оцінки втрат при поширенні сигналу для Wi-Fi в роботі використано модель втрат логарифмічної функції відстані LDPL.

Поширеним ефектом, що виникає під час проходження сигналу каналом зв'язку, є зниження рівня його потужності в міру збільшення відстані. Залежно від середовища, а також шляхів поширення, сигнал також зазнає спотворень. Зниження питомої потужності сигналу зумовлене загасанням. Основними причинами зменшення потужності сигналу в просторі є відбиття, заломлення, дифракція, поглинання, контури місцевості, середовище поширення (сухе або вологе), відстань тощо [38, 39].

Для розгортання безпроводового з'єднання необхідна адекватна модель втрат на шляху, оскільки вона оцінює максимально можливу відстань для успішного встановлення зв'язку [40].

Існує кілька моделей втрат сигналу, деякі з яких більш реалістичні, ніж інші. Відомі моделі, такі як модель завмирань Релея, що враховує вплив середовища поширення на сигнал (за наявності перешкод), або модель

завмирання Райса для прямої радіовидимості LOS [39]. В умовах прямої радіовидимості втрати в лінії можна спрощено розглядати як такі, що відповідають втратам у вільному просторі. Втрати у вільному просторі пов'язані з дисперсією енергії сигналу на шляху поширення й визначаються рівнянням Фрісса [41]. Потужність втрат Free Space Path (FSPL) розраховується згідно з (3.2):

$$\text{FSPL(dB)} = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 92,44 - G_t G_r, \quad (3.2)$$

де d – відстань;

f – частота;

G_t – коефіцієнт посилення передавальної антени;

G_r – коефіцієнт посилення приймальної антени.

У сценарії без прямої радіовидимості NLOS втрати на трасі між антенами передавача і приймача визначаються реалістичнішою моделлю, що має враховувати різноманітні типи перешкод, які спричиняють загасання, відбиття, заломлення сигналу, дифракцію тощо. Деякі з цих моделей враховують вплив стін і підлог у будівлях, як усередині, так і зовні.

Проста і загальноприйнята модель втрат, що враховує наявність деяких перешкод у відкритих і закритих середовищах, є логарифмічною відстанню втрат на шляху, що розраховується згідно з рівнянням 3.3 [39, 42]:

$$L(d) = L_0 + 10n \log(d), \quad (3.3)$$

де d – відстань;

L_0 – потужність сигналу з відстані 1 м від передавача (антени);

n – показник поширення (залежить від перешкод у навколишньому середовищі).

Більшість моделей втрат, заснованих на LDPL, використовують коригування показника поширення й додавання параметрів, пов'язаних із кількістю стін, поверхів тощо. У загальних рисах показник поширення змінюється залежно від середовища [43]:

– вільне поширення – 2;

– стільниковий зв'язок у місті – 2,7-3,5;

- стільниковий зв'язок у місті із завмираннями – 3 - 5;
- закрите середовище з прямою радіовидимістю – 1,6 - 1,8;
- будівля з перешкодами – 4 - 6;
- фабрика з перешкодами – 2 - 3.

У роботі проаналізовано основні дослідження з моделювання сигналу в середовищах стандартів IEEE 802.11.

Дослідження моделювання загасання сигналу в мережах стандарту IEEE 802.11b з урахуванням внутрішніх і зовнішніх комунікацій з використанням моделі LDPL показано в [42]. У [44] проведено порівняння різних моделей втрат на трасі, які можна застосувати до умов усередині приміщень, з різними рівнями потужності та частотами й оцінкою впливу факторів навколишнього середовища. Аналіз показав, що модель LDPL забезпечує гарне наближення порівняно з реальними вимірними значеннями.

У роботі [45] проведено дослідження впливу втрат на трасі в мережі безпроводових датчиків Wireless Sensor Network (WSN) у засніженому середовищі. У [46] проведено дослідження під час поширення сигналу стандарту IEEE 802.11g/n з урахуванням сценаріїв NLOS і LOS усередині будівлі з кількома перешкодами.

У роботі [47] запропоновано деякі коригування моделі LDPL стосовно передавання цифрового телевізійного сигналу. Використано водночас три набори вимірювань потужності сигналу й порівнювання їх зі значеннями, отриманими за допомогою моделей LDPL, Okumura-Hata та ITU-R.

У літературі [48] запропоновано використання недетермінованої статистичної моделі втрат. У роботі [49] проведено дослідження кореляції між висотою використовуваної антени й втратами на трасі за допомогою моделі LDPL.

Аналіз для зовнішнього середовища з високою середньою температурою і вологістю для мережі стандарту IEEE 802.11 з частотою 2,4 ГГц проведено в роботі [50]. Проведено вимірювання потужності сигналу на відстані та порівняння цих значень з оцінками, отриманими згідно з моделлю LDPL. У роботі [51] виконано аналіз рівня сигналу для розповсюдження сигналу в двох сценаріях (LOS і NLOS) на таких частотах: 1,1 ГГц, 1,6 ГГц, 2,55 ГГц і 3,5 ГГц.

Загалом, простежується тенденція, спрямована на краще планування й розгортання мережної інфраструктури стандарту IEEE 802.11.

У роботі розглянуто інфраструктуру стандарту IEEE 802.11g. Основна увага спрямована на визначення оціночних значень рівня сигналу за допомогою моделі LDPL. Мережну архітектуру показано на рис. 3.5.

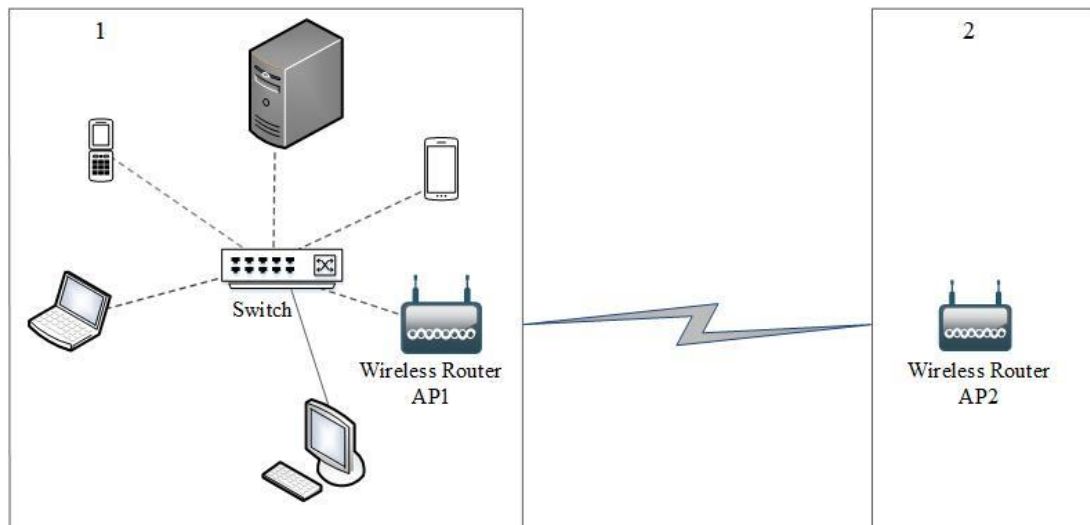


Рисунок 3.5 – Архітектура мережі

Вузол 1 знаходиться всередині приміщення 1, вузол 2 знаходиться всередині приміщення 2. Основний канал з'єднує канали 1 і 2 та оснащено двома антенами, що працюють на частоті 2,4 ГГц, з пропускнуою здатністю до 150 Мбіт/с, сумісними зі стандартами IEEE 802.11b/g. Параметри для аналізу взято з [52]: це вбудовані антени WOG 212 з коефіцієнтом посилення 12 дБі та номінальною потужністю 27 дБм, точки доступу TP-Link з ефективною випромінюваною потужністю 20 дБ.

Дослідження потужності сигналу спрямовано на оцінку потужності сигналу в окремих точках у приміщенні 1 (у точках P1, ..., P5).

Для проведення тестів (тобто отримання рівня сигналу в кожній точці) використано ноутбук під управлінням Linux Ubuntu 14. У якості основних інструментів використано інструменти iwconfig і linssid. Iwconfig - це інструмент Linux для налаштування безпроводових мережних інтерфейсів, що дає змогу налаштовувати та перевіряти такі параметри, як частота каналу та рівень сигналу [53]. Linssid - це засіб відстеження безпроводової мережі для Linux, що графічно представляє виявлені мережі з відповідними каналами в частотній області, включно з такою інформацією: якість сигналу, рівень сигналу, ідентифікатор мережі, канал та рівень шуму [54].

З використанням даних обчислено середнє значення для кожної точки, що дало змогу порівняти таку репрезентативну одиницю з рівнем сигналу, оціненим за допомогою моделі LDPL зі зміною показника поширення (n) від 3 до 6. Для розрахунку втрат у кожній точці враховано еталонні втрати в -20 дБ на відстані 1 м від точки доступу, засновані на роботі [42], у якій представлено точку доступу з такими самими характеристиками та на тій самій еталонній відстані. Середні значення рівня сигналу для кожної точки й для кожного виконання тесту показано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Середні значення рівня сигналу

Точки для виміру	Відстань, м	Середній рівень сигналу, дБ	Рівень сигналу з $n=3$, дБ	Рівень сигналу з $n=4$, дБ	Рівень сигналу з $n=5$, дБ	Рівень сигналу з $n=6$, дБ
P1	7	-45,2	- 25,35	- 33,8	- 42,26	- 50, 71
P2	31	-60,6	-44,74	-59,66	-74,57	-89,48
P3	66	-69	-54,59	-72,78	-90,98	-109,17
P4	102	-79	-60,26	-80,34	-100,43	-120,52
P5	137	-84,2	-64,10	-85,47	-106,84	-128,20

Крім того, у таблиці 3.2 також наведено оціночні значення рівня сигналу, розраховані з урахуванням результатів втрат на шляху з моделі LDPL. LDPL n представляє значення потужності сигналу, отримані з використанням моделі LDPL з показником поширення n (3, 4, 5 і 6). Під кожною точкою в першому стовпчику вказано відстань у метрах (м) від точки виміру до точки доступу.

Середні значення рівня сигналу представлено на рисунку 3.6.

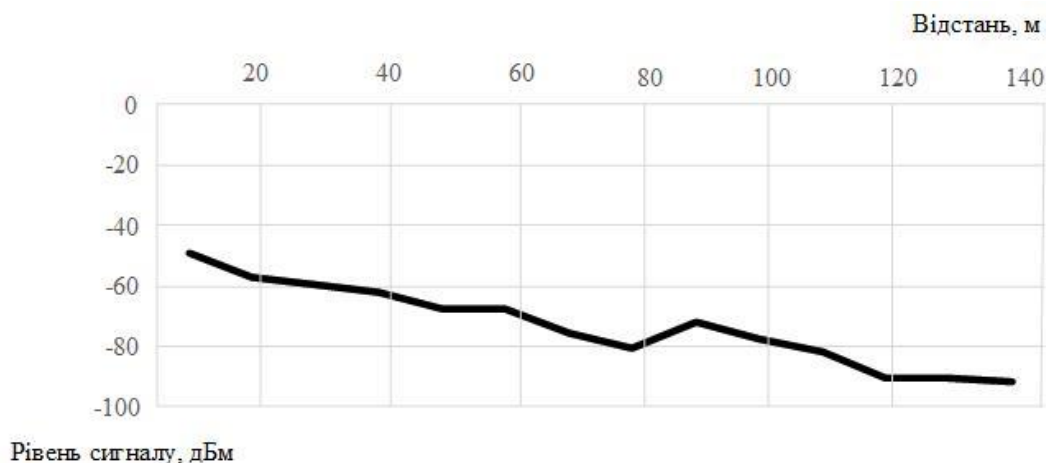


Рисунок 3.6 – Середні значення рівня сигналу

На рис. 3.7 показано реальну потужність сигналу (середнє значення) разом з оцінкою (враховуються результати втрат на трасі з моделлю LDPL для кожного значення показника поширення).

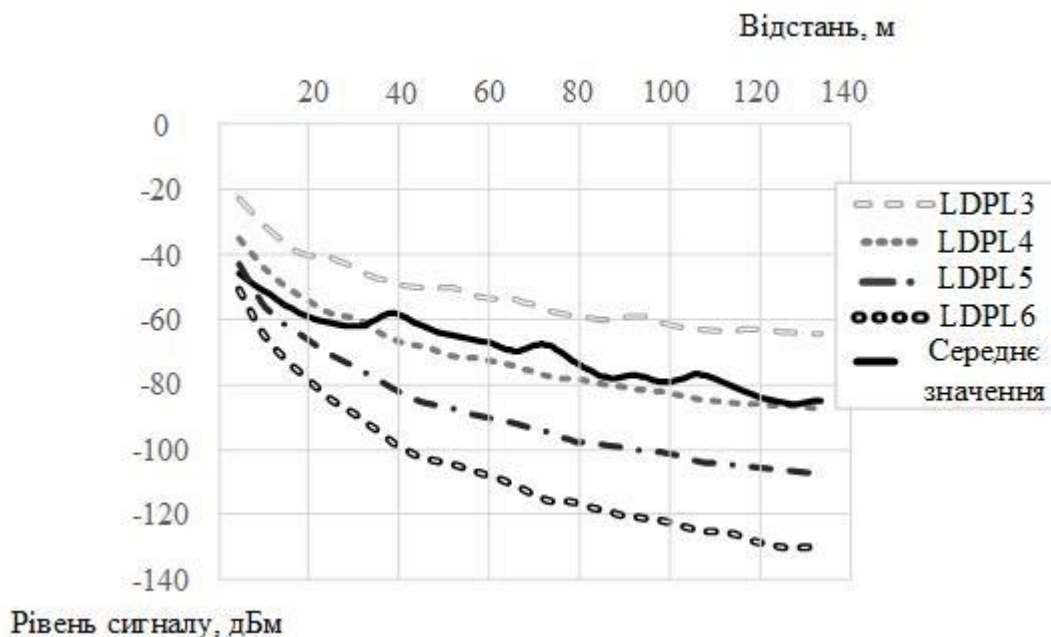


Рисунок 3.7 – Реальна та розрахункова потужність сигналу

Як видно на рис. 3.7, розрахункові значення, найближчі до реальних, отримано з показником поширення 4 (LDPL4). Розраховано відносну похибку між реальними значеннями та оціночними значеннями з LDPL4 (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Відносна похибка між виміряними та розрахунковими значеннями сигналу для LDPL4.

Real x LDPL4
P1 – 25%
P2 – 2%
P3 – 5%
P4 – 2%
P5 – 2%

За винятком деяких розбіжностей для кількох точок усі відносні помилки нижче 15%.

Виконана оцінка сигналу, заснована на розрахункових значеннях і порівняннях, демонструє, що модель LDPL можна використовувати для оцінки рівня сигналу стандарту IEEE 802.11g у середовищі на значних відстанях з помилкою менш ніж 15% за більшістю розглянутих точок. Це можливо, встановивши показник поширення n , рівний 4.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖРІВНЕВОГО ОБ'ЄДНАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ MESH-МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

4.1 Поняття вартості ефірного часу

Широко використовувана стратегія об'єднання в традиційних безпроводових локальних мережах стандарту IEEE 802.11 дає змогу мобільній станції Mobile Station (MS) сканувати безпроводові канали доступу та потім об'єднуватися з точкою доступу Access Point (AP), що має найкраще значення рівня сигналу Signal Strength Indication (RSSI), що приймається. На відміну від традиційних безпроводових локальних мереж, безпроводові mesh-мережі на основі стандарту IEEE 802.11 складаються з multi-hop безпроводової транспортної мережі.

Таким чином, продуктивність MS після об'єднання з певною точкою доступу Mesh Access Point (MAP), сильно залежить від умов як каналу доступу (наприклад, від навантаження на пов'язані станції, частоти помилок кадрів між MS і MAP), так і транспортної мережі (наприклад, наскрізної затримки та асиметричних транспортних витрат за висхідною та низхідною лініями). Тобто вибір MAP, що забезпечує «найкращу» продуктивність, залежить від декількох чинників і не може бути визначено тільки за RSSI каналу доступу MS-MAP.

У роботі запропоновано використовувати метрику вартості ефірного часу з кінця в кінець для визначення MAP, до якої MS має підключитися. Метрику вартості ефірного часу було використано в стандарті IEEE 802.11s. Вона включає вартість ефірного часу на каналі доступу та вартість ефірного часу на транзитній лінії. Запропоновано модель об'єднання, що враховує частоту помилок кадрів за різних розмірів пакетів, доступну пропускну здатність каналу доступу після об'єднання нового MS, а також асиметричні витрати на транспортування висхідною та низхідною лініями зв'язку.

Для моніторингу стану мережі та збору метрик і значень коефіцієнтів дослідження використано модуль Cross-Layer Service Middleware (CLSM) з підтримкою Linux [55].

Безпроводові mesh-мережі Wireless Mesh Network (WMN) на основі стандарту IEEE 802.11 складаються з mesh-маршрутизаторів Mesh Routers (MR), які з'єднуються між собою за допомогою безпроводових радіоканалів, утворюючи

великомасштабні безпроводові широкосмугові мережі. На рис. 4.1 показано типову архітектуру безпроводових mesh-мереж на основі стандарту 802.11.

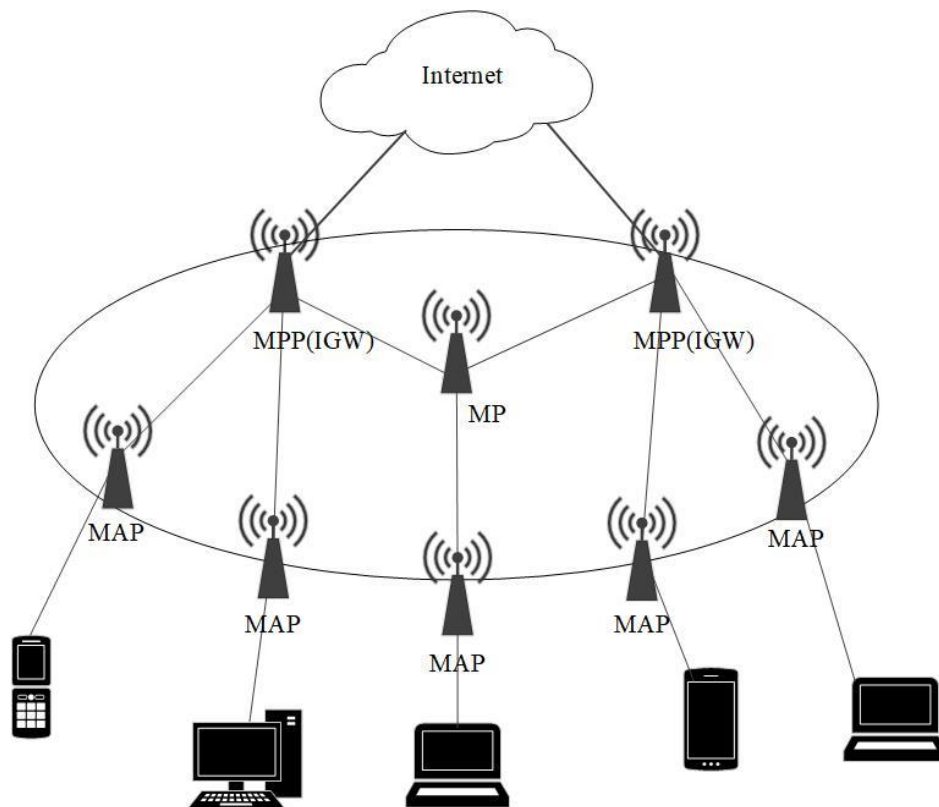


Рисунок 4.1 – Архітектура безпроводових mesh-мереж на основі стандарту IEEE 802.11

Mesh-маршрутизатори, які розташовані на ділянці транспортної мережі, зв'язуються один з одним та під'єднують MS до мережі, використовуючи стандарти IEEE 802.11a та/або 802.11b/g [56, 57]. Залежно від функцій маршрутизатора мережі, він може бути: точкою доступу MAP, що надає послуги точки доступу на додаток до послуг мережі; порталом точки мережі Mesh Point Portal (MPP), що з'єднує мережу із зовнішніми мережами; або тільки точкою мережі Mesh Point (MP) без функцій AP і порталу [58]. Коли MPP з'єднує мережу з мережею Інтернет, його також називають Internet GateWay (IGW). Транзитна мережа у WMN повністю безпроводова.

Стандарт IEEE 802.11 залишає стратегію об'єднання на розсуд розробок. Широко використовувана стратегія об'єднання в поточних реалізаціях полягає в тому, щоб дозволити MS об'єднуватися з точкою доступу AP, яка має найкраще значення рівня сигналу RSSI, що приймається, під час сканування [59].

У роботі проаналізовано дослідження, які показали, що схема об'єднання, заснована на найсильнішому рівні сигналу SSS, не може забезпечити MS найкращу продуктивність мережі. При цьому було оптимізовано вибір точки доступу у Wireless Local Area Network (WLAN) на основі умов каналу доступу [60-63]. У роботі [64] показано, що під час об'єднання у WMN слід враховувати і затримку під час транспортування транспортною мережею, і вартість ефірного часу для оцінювання якості каналу доступу та продуктивності транспортної мережі під час об'єднання, визначеної в проєкті IEEE 802.11s [58]. Однак, у цій схемі об'єднання з урахуванням транзиту не було враховано завантаженість трафіком кандидатів MR, ефективну пропускну здатність каналу доступу після об'єднання нового MS, вплив різних розмірів пакетів та асиметричні витрати на транспортування транзиту висхідною та низхідною лініями.

У роботі запропоновано дослідити модель міжрівневого об'єднання для безпроводових mesh-мереж із розглядом двох рішень. Перше рішення - визначення MAP, що забезпечить найвищу наскрізну пропускну здатність для мобільної станції. Друге рішення - досягнення загальної тривалості роботи мережі, прийнятної для більшості класів користувачів. Для визначення MAP, з якою MS повинна об'єднатися, використовується вартість ефірного часу, адаптована з стандартом IEEE 802.11s [58], що містить у собі вартість ефірного часу на каналі доступу і вартість ефірного часу на транзитній лінії.

Вартість ефірного часу каналу доступу визначається накладними витратами на доступ до каналу, накладними витратами протоколу, домінуючим розміром пакета, частотою помилок кадру й очікуваною доступною смугою пропускання після підключення нового MS до MAP. Очікувана доступна смуга пропускання розраховується на основі поточного навантаження MAP і очікуваного навантаження, створюваного новим MS, що дає змогу визначити, чи буде MAP насичена після прийому MS. Вартість транзитного ефірного часу є середньозваженим значенням вартості транзитного ефірного часу висхідного каналу та вартості транзитного ефірного часу низхідного каналу залежно від моделі трафіку додатка MS (наприклад, домінантний трафік низхідного каналу - відео за запитом або домінантний трафік висхідного каналу - відеоспостереження).

Порівняно з роботами [64-68], модель об'єднання враховує:

– частоту помилок кадрів і вартість ефірного часу для різних категорій розмірів пакетів;

– вплив навантаження трафіку, створюваного новим MS, на стан насичення і доступну пропускну здатність каналу доступу;

– вплив асиметричних витрат на транспортування висхідним і низхідним каналами на наскрізну продуктивність MS.

У роботі дослідження засноване на пристроях Wi-Fi і драйвері Madwi з відкритим вихідним кодом [69]. На кожному вузлі (MR або MS) у мережі WMN працює модуль CLSM, який використовується в роботі, який збирає метрики, пов'язані з об'єднанням, з модифікованого драйвера Madwifi і повертає їх демону об'єднання, який працює в користувацькому просторі.

4.2 Метрика об'єднання між рівнями

Вартість ефірного часу введено в проєкт IEEE 802.11s як функцію витрат на створення радіозалежних шляхів протоколом маршрутизації в безпроводових mesh-мережах [58]. Вартість ефірного часу визначає кількість ресурсів каналу, споживаних під час передавання кадру певним каналом, і її розрахунок розроблено для простоти реалізації та здатності до взаємодії. Тому в моделі об'єднання адаптовано вартість ефірного часу до метрики об'єднання. Рівняння (4.1) показує розрахунок вартості ефірного часу:

$$C_a = O_{ca} + O_p + \frac{B_t}{r} \cdot \frac{1}{1 - e_{pt}}, \quad (4.1)$$

де O_{ca} – накладні витрати на доступ до каналу;

O_p – накладні витрати на протокол, які є постійними величинами для кожної модуляції;

B_t – розмір тестового кадру, значення якого 8224, байт;

r – швидкість передачі на фізичному рівні, Мбіт/с. Залежить від локальної реалізації адаптації швидкості і являє собою швидкість, з якою точка доступу мережі передаватиме кадр стандартного розміру B_t , виходячи з поточних умов;

e_{pt} – коефіцієнт помилок кадру, це ймовірність того, що кадр стандартного розміру B_t буде зіпсовано під час передавання кадру з поточною швидкістю передавання r .

Вартість ефірного часу відображає середню тривалість, протягом якої канал зайнятий STA_i для передачі одного кадру в точку доступу α . Таким чином, вона еквівалентно відображає радіоресурси, використовувані STA_i.

У роботі проаналізовано роботи, спрямовані на поліпшення схеми об'єднання за рівнем сигналу, яка використовується в сучасних мережах стандарту IEEE 802.11.

Існують варіанти, коли користувач вимірює рівень сигналу, що приймається, від усіх точок доступу, які працюють на поточному каналі та його додаткових каналах, і вибирає точку доступу, ґрунтуючись на мінливих тенденціях цих сигналів [60]. Цікавим рішенням є оцінка потенційної пропускну здатності точки доступу на основі затримки, яку несуть сигнальні кадри стандарту IEEE 802.11 від цієї точки, і використання цієї метрики для визначення точки доступу, з якою має об'єднатися MS [61]. На основі цього рішення також використано метрику об'єднання, яка пропорційна очікуваній кількості успішно переданих кадрів даних за одиничною спробою передачі [62]. У системі автоматичного виявлення і вибору точок доступу MS сканує всі доступні незашифровані точки доступу, під'єднується до кожної з них і оцінює якість з'єднання з кожною з них [63].

Зазначені схеми об'єднання запропоновано для безпроводових локальних мереж на базі стандарту IEEE 802.11. Схему міжрівневого об'єднання для безпроводових mesh-мереж, що об'єднує каналні умови клієнтського каналу доступу та метрику транзитної маршрутизації Radio Metric (RM)-AODV, запропоновано в [64]. Така схема об'єднання використовує вартість ефірного часу, визначену в проєкті IEEE 802.11s для оцінювання якості каналу доступу та продуктивності транзиту [58]. Однак, вона не враховує фактичне навантаження на трафік кандидата MAP і вплив різних розмірів пакетів на вартість ефірного часу.

4.3 Розрахунок вартості ефірного часу

Запропонована модель об'єднання враховує частоту помилок кадрів і вартість ефірного часу для різних категорій розмірів пакетів, а також потенційну доступну смугу пропускання після об'єднання MS на основі прогнозованого навантаження на трафік. При цьому використано вартість ефірного часу для вимірювання продуктивності транзиту кандидата MR. Таким чином, немає обмежень на протокол маршрутизації, що працює на транзитній лінії, і не

залежить від метрики маршрутизації. При цьому вимірювання продуктивності транзиту розглядається окремо для висхідної та низхідної ліній зв'язку, щоб підтримати додатки, які мають значні асиметричні витрати на транспортування висхідною та низхідною лініями зв'язку.

Пояснення цього рішення показано на рис. 4.2. Це mesh-мережа, у якій STA1 від початку пов'язана з MAP1, а STA2 - з MAP2.

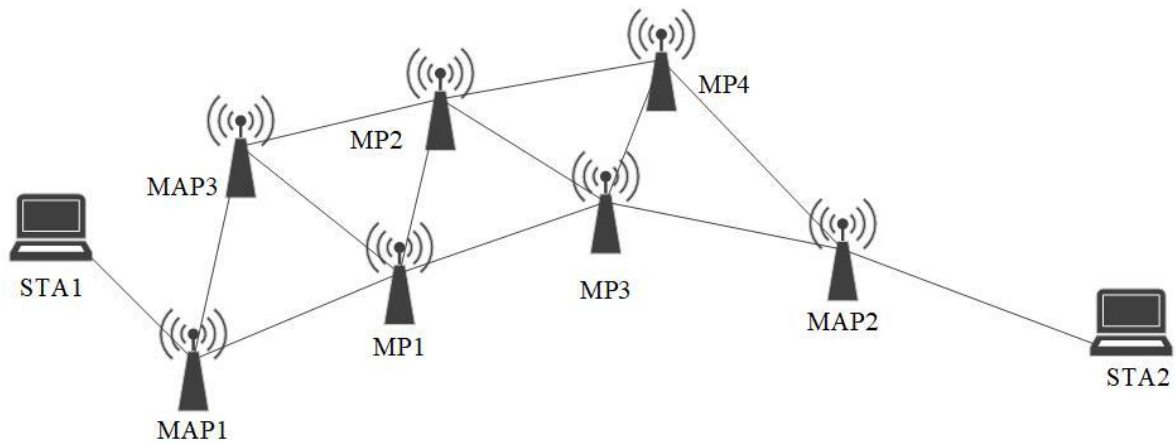


Рисунок 4.2 – Безпроводова mesh-мережа

Дані, які STA1 відправляє STA2, спрямовуються через MAP1, MP1, MP3 і MAP2, де цей маршрут має мінімальну сумарну вартість ефірного часу, за припущенням, що STA1 має можливість об'єднатися з MAP1 або MAP3. На етапі повторного об'єднання STA1 переглядає своє об'єднання. Таким чином, STA1 отримує від MAP3 і MAP1 інформацію, що необхідна для розрахунку вартості ефірного часу об'єднання для кожної MAP. Згідно з моделлю об'єднання ефірного часу STA1 зв'язується з тією MAP, яка забезпечує мінімальну вартість ефірного часу для об'єднання. Однак, згідно з міжрівневим підходом з урахуванням QoS, на рішення STA1 про об'єднання впливають відповідні маршрути між MAP1-MAP2 і MAP3-MAP2. На етапі об'єднання, якщо MAP1 і MAP3 інформують STA1 про передбачувану загальну вартість ефірного часу маршрутизації до MAP2, то STA1 може використати цю інформацію для визначення MAP із найкращим кінцевим QoS. Асиметрія каналів і мінливість умов у мережі можуть вплинути на наскрізний QoS. Тому STA1 періодично інформується про вартість ефірного часу під час передавання даних, щоб за необхідності ініціювати повторне об'єднання.

Метрика об'єднання ґрунтується на вартості ефірного часу, введеної в проєкті стандарту IEEE 802.11s, яка відображає середню затримку передачі пакета

одиночного розміру на конкретному каналі. Метрика об'єднання - це наскрізна загальна вартість ефірного часу ($TC_{i,\alpha}$) від MS_i до IGW через MR_α (тобто весь безпроводовий шлях), і під час її розрахунку враховується фактичний розмір пакета трафіку, відповідна частота помилок кадрів для цього розміру пакета і потенційна доступна смуга пропускання на каналі доступу після об'єднання клієнтів:

$$TC_{i,\alpha} = (1 - \alpha)AC_{i,\alpha} + \alpha BC_\alpha. \quad (4.2)$$

Як показано в рівнянні (4.2), $TC_{i,\alpha}$ включає T – вартість ефірного часу $AC_{i,\alpha}$ на каналі доступу між MS_i і MR_α , і вартість транзитного часу BC_α між MR_α і IGW , до якого він підключається.

Параметр α , що налаштовується, задовольняє умові $0 \leq \alpha \leq 1$, зважає вплив $AC_{i,\alpha}$ і BC_α . Значення α є статичним для конкретного сценарію розгортання. Щоб визначити значення α , яке максимізує продуктивність MS після об'єднання, розроблено емпіричну модель для α з використанням методології статистичного проектування експериментів Design of Experiments (DOE), що показує оптимальні значення α у просторі проектування [70].

Після того як MS_i отримає вартість ефірного часу від кожного MR -кандидата, вона підключиться до MR_α , якщо $TC_{i,\alpha}$ буде найменшою серед вартості ефірного часу всіх MR -кандидатів.

Рівняння (4.3) показує вартість ефірного часу на каналі доступу між MS_i і MR_α :

$$AC_{i,a} = \left(O_{ca} + O_p + \frac{B_i}{R_{avl}^i} \right) \frac{1}{1 - e_{pt}^i}, \quad (4.3)$$

де e_{pt}^i – частота помилок кадрів між MS_i і MR_α ;

R_{avl}^i – доступна смуга пропускання, яку MS_i може отримати від MR_α ;

V_i – домінуючий розмір пакета очікуваного трафіку, що генерується MS_i , або зареєстрований середній розмір пакета очікуваного трафіку, що генерується MS_i , байт;

O_{ca} і O_p – це накладні витрати на доступ до каналу і накладні витрати на протокол відповідно, які є постійними величинами, визначеними в проєкті IEEE 802.11s [58].

Коли додаток, запущений на MS , має певний домінуючий розмір пакета (наприклад, MS передає відео в реальному часі, зняте відеокамерою з використанням стандарту H.264), то буде використано цей домінуючий розмір пакета для V_i . Якщо домінуючий розмір пакета невідомий, то буде встановлено V_i на середній розмір пакета в бітах трафіку, згенерованого MS до цього, який було записано модифікованим драйвером на PC . Якщо ця інформація також недоступна, то для V_i використовуватиметься постійний розмір тестового кадру (8224 байт), визначений у проєкті IEEE 802.11s [58].

Розрахунок e_{pt}^i показаний у формулі (4.4):

$$e_{pt}^i = 1 - \frac{N_{or} - N_{dr}}{N_{or} - N_r}, \quad (4.4)$$

де N_{or} – кількість оригінальних одноадресних даних, переданих MS_i ;

N_r – кількість повторно переданих пакетів;

N_{dr} – кількість відкинутих одноадресних пакетів.

Для розрахунку очікуваної доступної смуги пропускання R_{avl}^i вимірюється поточне навантаження на канал доступу MS і визначається, чи буде канал насичений після підключення MS_i . При цьому кожен MR відстежує час передачі і час прийому протягом періоду часу T . Коли MS_i проводить розрахунок R_{avl}^i , то він може отримати коефіцієнт простою каналу від MR_a таким чином:

$$R_{\text{ovl}}^i = \begin{cases} \lambda_\alpha R_{i,\alpha} & \lambda_\alpha \geq \hat{\lambda}_\alpha \\ \frac{1}{\sum_{j \in C_\alpha \cup i} \frac{1}{R_{j,\alpha}}} & \lambda_\alpha < \hat{\lambda}_\alpha \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\lambda_\alpha = \frac{T - (\sum_{j=1}^{N_{\text{sent}}} t_j + \sum_{k=1}^{N_{\text{received}}} t_k)}{T}, \quad (4.6)$$

де t_j і t_k – час передавання (включно зі зворотним передаванням, ретрансляцією тощо) пакета j і час приймання пакета k .

Якщо $AC_{i,\alpha}$ перевищує очікувану затримку додатків, що працюють на MS_i , як показано у формулі (4.7), то канал доступу MR_α завантажено:

$$\left(O_{ca} + O_p + \frac{B_i}{\lambda_\alpha R_{i,\alpha}} \right) \frac{1}{1 - e_{pt}^i} \geq \frac{B_i}{R_{\text{req}}^i}, \quad (4.7)$$

де $R_{i,\alpha}$ – швидкість передачі даних на фізичному рівні між MS_i і MR_α ;

R_{req}^i – вимоги до пропускної здатності додатків на MS_i .

Згідно з дослідженнями, під час насичення MS , що пов'язано з MR_α , справедливо ділять смугу пропускання з верхньою межею, показаною в рівнянні (4.5), де C_α – безліч наявних клієнтів MR_α [71].

При порівнянні λ_α MR_α з $\hat{\lambda}_\alpha$ у рівнянні (4.8) MS_i може визначити, чи буде канал доступу MR_α насиченим після його об'єднання, і оцінити доступну пропускну здатність, використовуючи рівняння (4.5):

$$\hat{\lambda}_\alpha = \frac{B_i}{R_{i,\alpha} \left[(1 - e_{pt}^i) \frac{B_i}{R_{\text{req}}^i} - (O_{ca} + O_p) \right]}. \quad (4.8)$$

Розрахунок вартості транзитного ефірного часу показано в рівнянні (4.9):

$$BC_{\alpha} = (1 - \beta)BC_{\text{uplink}}^{\alpha} + \beta BC_{\text{downlink}}^{\alpha} . \quad (4.9)$$

Вага ($0 \leq \beta \leq 1$) визначається шаблоном трафіку додатків MS. Якщо схема трафіку невідома, то β встановлюється рівним 0,5. Якщо домінуючий трафік застосунків, що працюють на MS, є низхідним трафіком (наприклад, Video-on-Demand), то β присваюється значення вище за 0,5; якщо переважний трафік - висхідний (наприклад, відеоспостереження), то β призначається з меншим значенням, ніж 0,5.

Рівняння (4.9) показує вартість транзитного ефірного часу MR, що є середньозваженим значенням вартості транзитного ефірного часу висхідного каналу (4.10) та вартості транзитного ефірного часу низхідного каналу (4.11) між цим MR та IGW:

$$BC_{\text{uplink}}^{\alpha} = \sum_{k=1}^{H_{\text{uplink}}} \left(O_{ca} + O_p + \frac{B_i}{R_k} \right) \frac{1}{1 - e_{pt}^k}, \quad (4.10)$$

$$BC_{\text{downlink}}^{\alpha} = \sum_{k=1}^{H_{\text{downlink}}} \left(O_{ca} + O_p + \frac{B_i}{R_k} \right) \frac{1}{1 - e_{pt}^k}, \quad (4.11)$$

де R_k – швидкість передавання даних каналом k у транзитному каналі;

e_{pt}^k – коефіцієнт помилок кадрів цього каналу;

H_{uplink} і H_{downlink} – кількість hop для висхідної та низхідної ліній відповідно.

Частота помилок кадрів для кожного транзитного каналу відстежується модифікованим драйвером для різних категорій розмірів пакетів. У роботі використано розміри пакетів трьох категорій: малі пакети, коротші за 250 байт; великі пакети, довші за 1100 байт; середні пакети мають розмір між 250 і 1100 байт.

4.4 Алгоритм об'єднання рівнів

На рис. 4.3 показано модель об'єднання рівнів мережі.

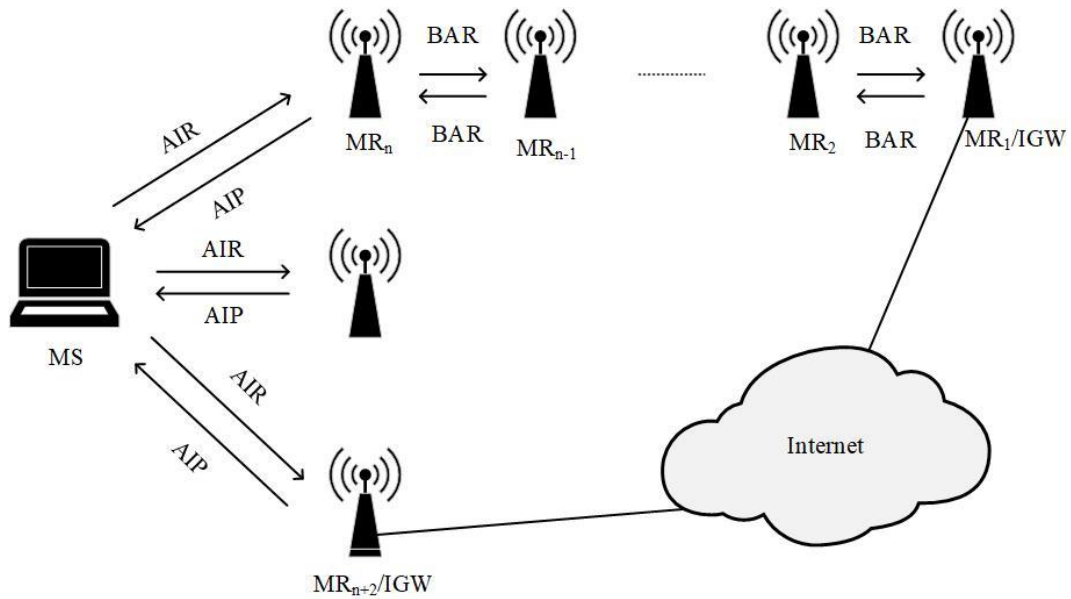


Рисунок 4.3 – Модель об'єднання рівнів мережі.

Коли MS намагається приєднатися до безпроводової mesh-мережі через MAP, вона скануватиме всі канали AP по черзі, щоб виявити MAP, що працюють на кожному каналі. Якщо якість сигналу, що приймається від MAP, вища за поріг h (встановлений як 15 дБ для чипсета Atheros 5212 у SNR [72,73]), то MS надсилає цьому кандидату MAP повідомлення Association Information Request (AIR), яке запитує необхідну інформацію як для каналу доступу і транзитного каналу, так і для розрахунку вартості ефірного часу.

Коли MAP, яка не є IGW (наприклад, MR_n на рис. 4.3), отримує повідомлення AIR від MS, вона надсилає IGW (що зберігається в її таблиці маршрутизації) повідомлення Backhaul Airtime Request (BAR) зі своєю вартістю ефірного часу у висхідному каналі (для з'єднання з наступним hop).

Заголовок повідомлення BAR - це біт напрямку, який вказує, чи передається повідомлення по висхідній або низхідній ліній зв'язку. Призначений IGW відправить назад MAP, що ініціює, це BAR-повідомлення з накопиченою вартістю транзитного ефірного часу висхідного каналу і вартістю транзитного ефірного часу низхідного каналу. Будь-який проміжний MR між MAP, що ініціює, і IGW буде оновлювати вартість ефірного часу висхідної або низхідної ліній зв'язку, що міститься в повідомленні BAR, відповідно до біта напрямку в заголовку повідомлення, коли це повідомлення надіслано. У роботі розроблено алгоритм об'єднання на MS (рис. 4.4).

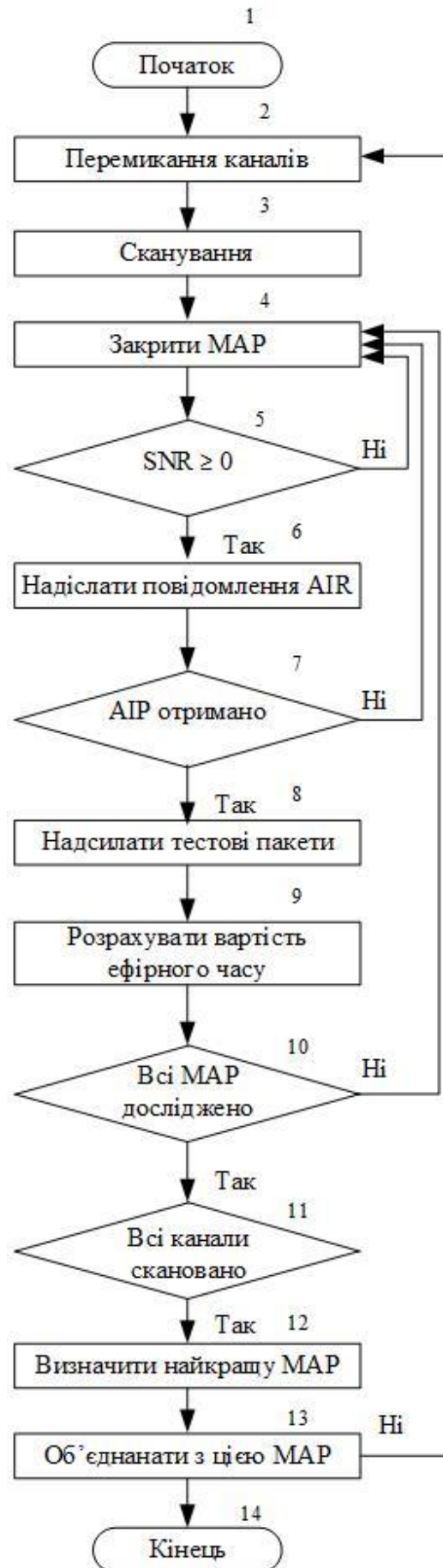


Рисунок 4.4 – Алгоритм об'єднання на MS

Після того як MAP, що ініціює, отримає повідомлення BAR, ініційоване нею самою, вона надішле MS повідомлення Association Information resPonse (AIP), що містить метрики його каналу доступу, а також окремі витрати на висхідний канал і вартість ефірного часу у зворотному напрямку. Якщо MAP, з якою зв'язалася MS, також є IGW (наприклад, MR_n+2 на рис. 4.3), то вищезгаданий процес зворотного передавання виключається, і вартість ефірного часу у висхідному та низхідному каналах у повідомленні AIP дорівнюють нулю.

Якщо MS не отримала жодного повідомлення AIP від MAP після кількох спроб, вона ігнорує це повідомлення і переходить до наступного кандидата. В іншому разі MS передасть цьому MAP безліч пакетів даних зондування розміром B_i , які використовуються для вимірювання частоти помилок кадрів між MS і MAP. Грунтуючись на результатах зондування і метриках у повідомленні AIP, MS може обчислити наскрізну вартість ефірного часу, що витрачається через дану MAP.

Після вимірювання вартості ефірного часу для всіх кандидатів MAP, MS підключиться до тієї, через яку вартість ефірного часу наприкінці шляху буде найменшою. MS знадобилося менше однієї секунди для отримання метрик, зондування каналу точки доступу та обчислення вартості ефірного часу для кожного кандидата MAP. Таким чином, загальний час очікування об'єднання є терпимим для користувачів, навіть якщо кількість кандидатів MAP досягає 10.

У такій моделі передбачено підтримку повторного об'єднання.

Об'єднання виконується тоді, коли MS приєднується до WMN. Якщо поточне з'єднання розірвано або рівень сигналу, що приймається, SNR нижчий за 10 дБ [73], то ініціюється повторне об'єднання для MS автоматично. Однак повторне об'єднання не ініціюватиметься автоматично в пошуках кращої наскрізної продуктивності для MS, якщо поточне з'єднання стабільне. Основна причина, з якої слід уникати агресивних повторних об'єднань, полягає в підтримці стабільності мережі та мінімізації накладних витрат, викликаних переадресацією.

У роботі [68] показано, що частота автоматичних повторних об'єднань дуже висока, і продуктивність MS може погіршитися, якщо поріг повторного об'єднання не буде правильно обрано для конкретної конфігурації мережі та схеми трафіку. У моделюванні, проведеному в [68], 30 MAP випадковим чином розподілені на площі 1000 м, і тільки 8 потоків представлені в цій mesh-мережі. Середня кількість повторного об'єднання становить 170 на станцію протягом 1000

с без порога повторного об'єднання і, як і раніше, досягає 50 на станцію, коли поріг повторного об'єднання налаштовується для досягнення найкращої продуктивності MS для даної конфігурації мережі. Коли кількість активних MS збільшується (наприклад, кожна MAP має активну MS), накладні витрати на агресивне повторне об'єднання можуть швидко зрости, і стан мережі може бути важко налаштувати.

Крім того, особистість користувачів дуже різноманітна. Деякі користувачі задоволені поточною продуктивністю мережі і не хочуть перепідключати свої пристрої до нових MAP для невеликого підвищення продуктивності, оскільки продуктивність додатків реального часу, що використовуються на їхніх пристроях, може бути порушено під час перепідключення. Інші користувачі можуть бути агресивними і прагнуть підвищити продуктивність мережі настільки, наскільки це можливо. Вибір повторного об'єднання залишається за користувачами, коли з'єднання між MS і його поточним MR все ще стабільне. Користувачі можуть ініціювати повторне об'єднання, якщо вони не задоволені поточною продуктивністю мережі.

4.5 Міжрівневе програмне забезпечення

В роботі використано міжрівневе програмне забезпечення, взяте з [69] для Linux. Драйвер Madwifi було модифіковано для підтримки функцій міжрівневого об'єднання на MS і програмному MR.

Надано архітектури міжрівневого об'єднання на MR і на MS, які містять у собі модифікований драйвер, що працює в просторі ядра, daemon, що працює в просторі користувача, і модуль CLSM. Модуль CLSM надає API для daemon міжрівневого об'єднання на MR або MS. Daemon може отримувати метрики, пов'язані з об'єднанням, від CLSM через його API, а не API конкретного драйвера. CLSM отримає необхідні метрики від драйвера для зазначеного безпроводового інтерфейсу.

CLSM - це загальна платформа, що надає додаткам, які працюють у користувацькому просторі, дані з нижніх рівнів мережного стека і можливість змінювати конфігурацію протоколів нижнього рівня. Мотивація створення такої платформи полягає в тому, щоб полегшити застосункам запит даних і приховати деталі реалізації нижніх рівнів. Наприклад, протокол MAC-рівня безпроводової мережної карти на базі стандарту IEEE 802.11 може підтримуватися драйвером

Madwifi, драйвером HostAP або іншим драйвером залежно від чіпсета цієї карти [74]. Додаткам, що працюють у користувацькому просторі, наприклад, демону міжрівневого об'єднання, не потрібно знати інформацію про конкретний драйвер. Замість цього вони можуть отримувати інформацію про MAC і фізичні рівні від CLSM, який знає відповідні API і формати параметрів, що надаються різними драйверами.

CLSM отримує доступ до мережних протоколів/модулів у просторі ядра, використовуючи виклики `Ioctl` у Linux, і надає застосункам два типи інтерфейсів: локальні API доступні локальним застосункам; сервер, що прослуховує, на TCP/IP-socket очікує на запити застосунків, що працюють на віддалених машинах (або локальних застосунків). За запитом додатків CLSM повертає метрики, отримані з нижніх рівнів, наприклад, кількість переданих оригінальних одноадресних пакетів і кількість повторних спроб передавання пакетів та/або обчислює деякі комплексні метрики, наприклад, коефіцієнт помилок, на основі цих показників. CLSM може також налаштовувати конфігуровані параметри мережних протоколів, наприклад, розмір буфера TCP і підтримку тимчасових міток TCP, відповідно до запитів додатків.

Архітектура міжрівневого об'єднання на MR показана на рис. 4.5.

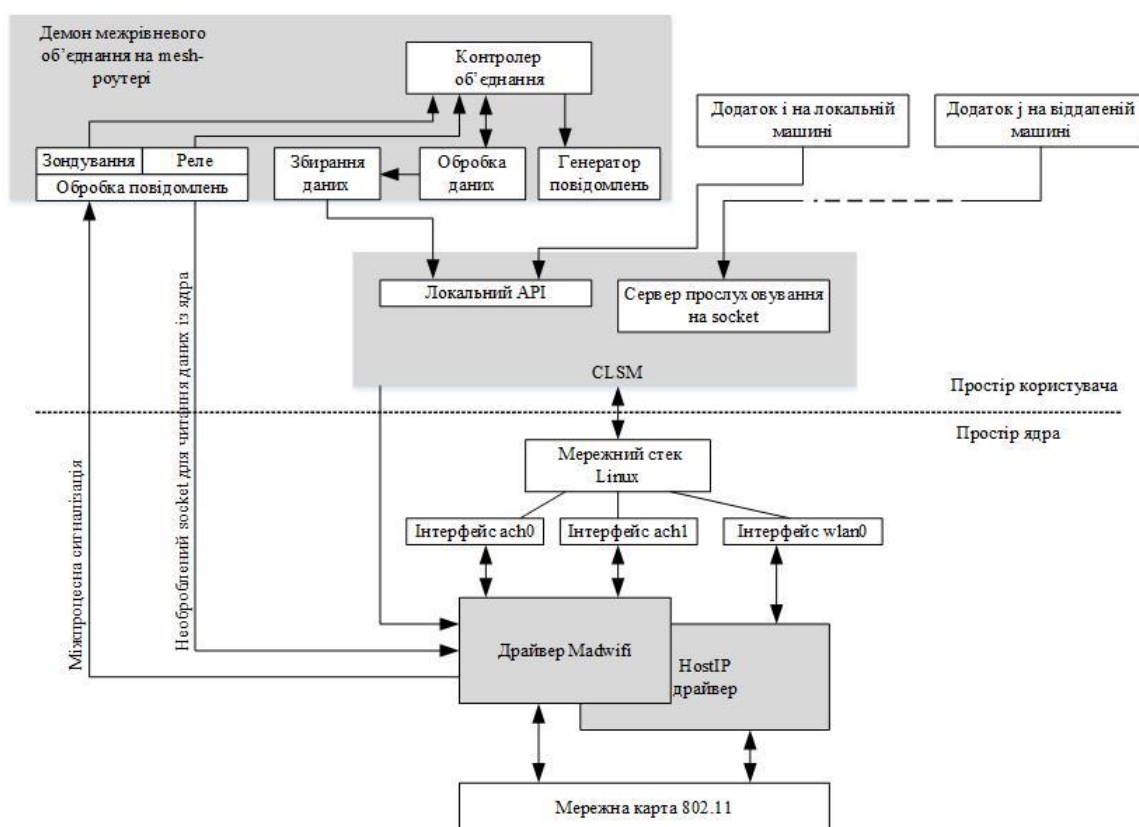


Рисунок 4.5 – Архітектура міжрівневого об'єднання на MR

Модифікований драйвер Madwifi на MR відповідає за відстеження умов каналу доступу, наприклад, за час передавання пакетів у кожному часовому слоті, і умови транзиту, наприклад, кількість повторних спроб передавання пакетів для кожного каналу протягом кожного часового інтервалу. За замовчуванням модифікований драйвер записує дані налаштованих метрик за останні 20 с, у яких кожен тайм-слот дорівнює 1 с. Тобто внаслідок використання міжрівневого об'єднання daemon може отримати статистичну інформацію за період до 20 с, а крок часової тривалості становить 1 с.

Архітектура міжрівневого об'єднання на MS показана на рис. 4.6.

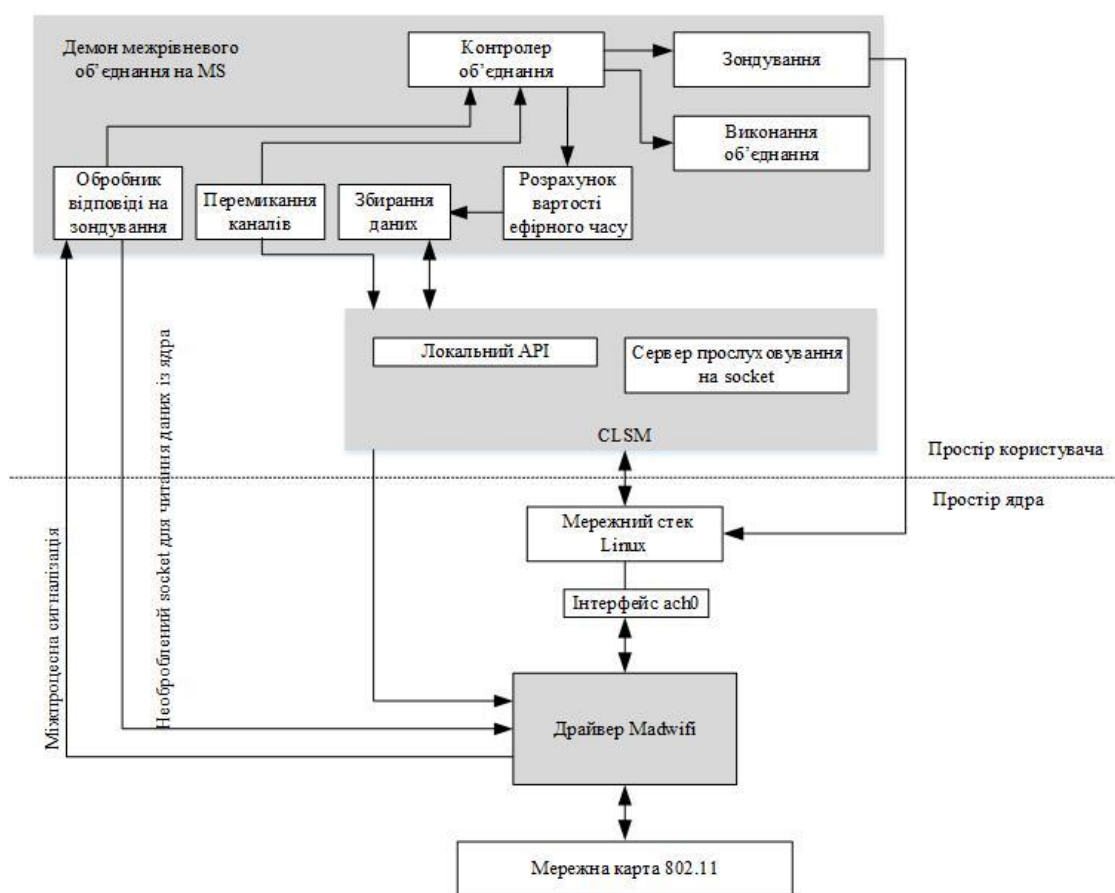


Рисунок 4.6 – Архітектура міжрівневого об'єднання на MS

Драйвер також перевіряє кожен отриманий пакет одноадресних даних, щоб визначити повідомлення AIR від MS або повідомлення BAR від сусідніх MR. Драйвер витягує інформацію з цих повідомлень, подає сигнал до daemon міжрівневого об'єднання на обробку отриманого запиту і доставляє дані daemon через необроблений socket. Проміжний MR між MR, що ініціює, відкидає отримане повідомлення BAR після витягнення його даних (як заголовка, так і корисного

навантаження) і генерує нове повідомлення BAR для свого наступного hop з оновленою вартістю ефірного часу у висхідному або низхідному каналах, але з тими самими IP-адресами джерела і призначення. Як повідомлення BAR, так і повідомлення відповіді на інформацію про об'єднання AIR, MR генеруються і передаються з використанням необробленого socket.

Драйвер Madwifi на MS працює в режимі монітора - режим під час виявлення MAP і зондування каналу AP. Daemon міжрівневого об'єднання генерує повідомлення AIR і пакети даних зондування (для вимірювання ept), використовуючи socket, щоб їх можна було передавати в режимі монітора. Пакети даних зондування будуть підтверджені MR у разі успішного приймання, хоча вони не будуть доставлені на верхній рівень, оскільки MS не є об'єднаним. Поки режим роботи - Monitor Mode, модифікований драйвер Madwifi перевіряє кожен отриманий одноадресний пакет для ідентифікації повідомлення AIR від MR. Отримавши повідомлення AIR, драйвер подає сигнал daemon міжрівневого об'єднання для отримання інформації, витягнутої з цього повідомлення через необроблений socket. Після того як MS визначить MR, він перемкне драйвер Madwifi в керований режим для стандартного обміну повідомленнями мережі стандарту IEEE 802.11 і подальшого регулярного обміну даними. Модифікований драйвер записує розмір кожного переданого пакета і періодично оновлює середній розмір пакетів, що корисно для майбутнього об'єднання.

4.6 Оцінка продуктивності міжрівневого об'єднання

У роботі порівнюється продуктивність запропонованої моделі міжрівневого об'єднання зі схемою об'єднання на основі рівня сильного сигналу SSS і схемою об'єднання з урахуванням транзиту, запропонованою в [9] (позначено Ath07), з погляду наскрізної продуктивності MS через MR, обраною кожною схемою об'єднання.

4.6.1 Дослідження впливу розміру пакета на вартість ефірного часу

Для оцінки використано модуль Wireless Module з можливістю моделювання всіх аспектів безпроводової передачі. Поведінка фізичного рівня моделюється за допомогою конвейєра Transceiver Pipeline, при цьому можна керувати властивостями каналу. Ці властивості каналу моделюються шляхом

управління налаштуваннями моделювання на кожному етапі конвейєра. Для реалізації механізмів об'єднання використано базові процедури, визначені стандартом IEEE 802.11: частота помилок за час передавання, вартість ефірного часу, кількість пов'язаних вузлів. Водночас синхронізація пакетів не змінювалася, що не впливає на загальну продуктивність мережі стандарту IEEE 802.11.

Завданням цього дослідження є аналіз впливу розміру пакета на вартість ефірного часу і вибір відповідного MR, який забезпечить MS найкращу продуктивність на виході. На рис. 4.7 показано модель мережі для дослідження.

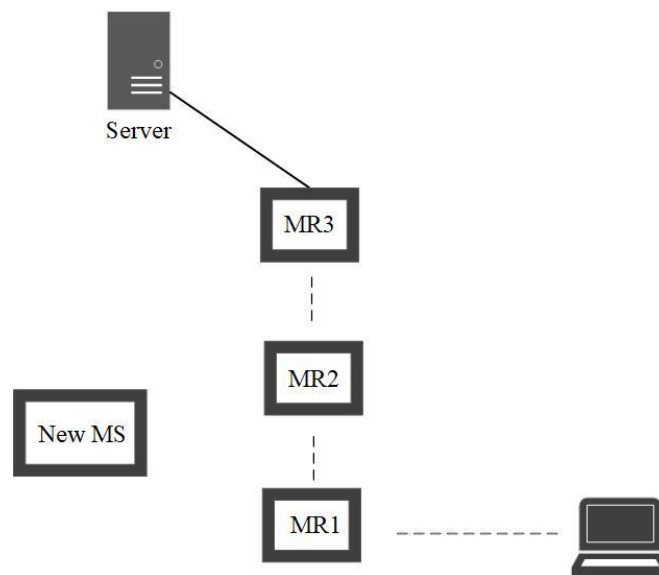


Рисунок 4.7 – Модель мережі для дослідження

Три MR (MR1, MR2 і MR3) використовують стандарт IEEE 802.11a для транзиту і три канали, що не перетинаються (канали 1, 6 і 11) стандарту IEEE 802.11g для каналів клієнтського доступу, відповідно. MR3 також є IGW і підключений до сервера в мережі Інтернеті через Ethernet. Існуючий клієнтський вузол, пов'язаний з MR1, генерує фоновий трафік для дослідження, це UDP-потік зі швидкістю 10 Мбіт/с від клієнтського вузла до сервера з розміром пакета 8224 байт. Швидкість передачі даних каналу AP MR3 встановлено на рівні 9 Мбіт/с, щоб збільшити вартість ефірного часу на каналі доступу.

Розмір пакетів зондування варіюється від 100 до 1400 байт, так само, як і розмір пакетів UDP-потіку, що генерується новим MS. Потужність передавання MR1, MR2 і MR3 налаштовується так, щоб рівень сигналу MR1, що приймається, на новому MS завжди був найвищим серед усіх MR.

Рівні прийнятих сигналів MR1, MR2 і MR3 на MS становлять: - 31 дБм, - 40 дБм і - 48 дБм, а рівень шуму становить - 95 дБм на їх клієнтських каналах доступу. Таким чином, SSS постійно вибирає MR1 для MS. Ath07 враховує тільки постійний розмір тестового кадру (8224 байт) під час розрахунку вартості ефірного часу, і вартість ефірного часу, розрахована Ath07 для MR1, MR2 і MR3, становить 1446 мс, 594 мс й 554 мс, відповідно. Таким чином, MR3 вибирається Ath07 постійно.

Домінуюча швидкість передавання даних каналу точки доступу MR2 становить 48 Мбіт/с, а домінуюча швидкість передавання даних каналу транзиту між MR2 і MR3 також становить 48 Мбіт/с у дослідженні.

На рис. 4.8 показано загальну (наскрізну) вартість ефірного часу для MS через кожен MR для різних розмірів пакетів.

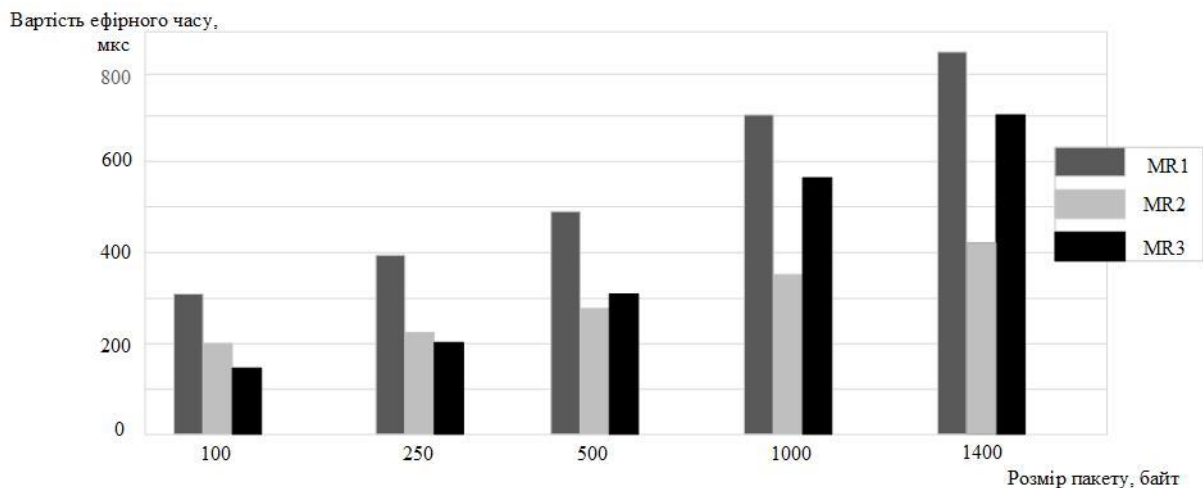


Рисунок 4.8 – Загальна вартість ефірного часу для різних розмірів пакетів

Вартість ефірного часу через MR1 завжди найвища, оскільки канал доступу MR1 перебуває під високим навантаженням трафіку і має найбільшу кількість hop від IGW (MR3). Коли розмір пакета відносно малий (тобто 100 і 250 байт), вартість ефірного часу через MR3 найнижча. Причина полягає в тому, що перевага нульової вартості транзитного ефірного часу (пряме під'єднання до Інтернету) перебиває недоліком більш низької швидкості передачі даних каналу AP (рис. 4.9).

Вартість ефірного часу,

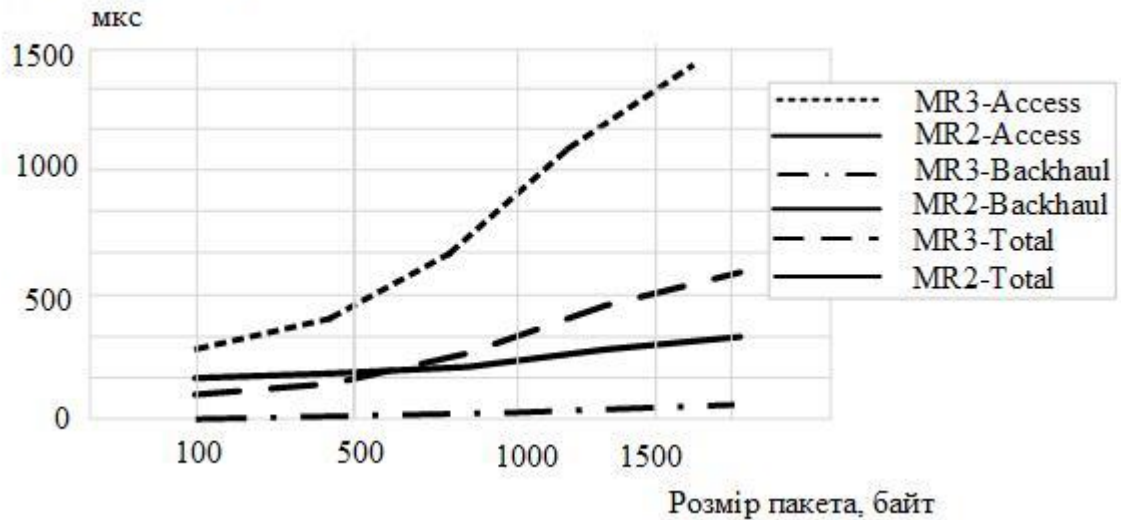


Рисунок 4.9 – Порівняння витрат ефірного часу через MR2 і MR3

Коли розмір пакета збільшується до 500 байт і вище, перевага вищої швидкості передавання даних каналом AP перекиває недолік вищої вартості транзитного ефірного часу. Таким чином, загальна вартість ефірного часу через MR2 є найнижчою для середнього і великого розміру пакетів (тобто 1000 і 1400 байт).

На рис. 4.10 показано пропускну здатність UDP-сесії між MS і сервером в мережі Інтернеті, що виміряно інструментом Iperf [75].

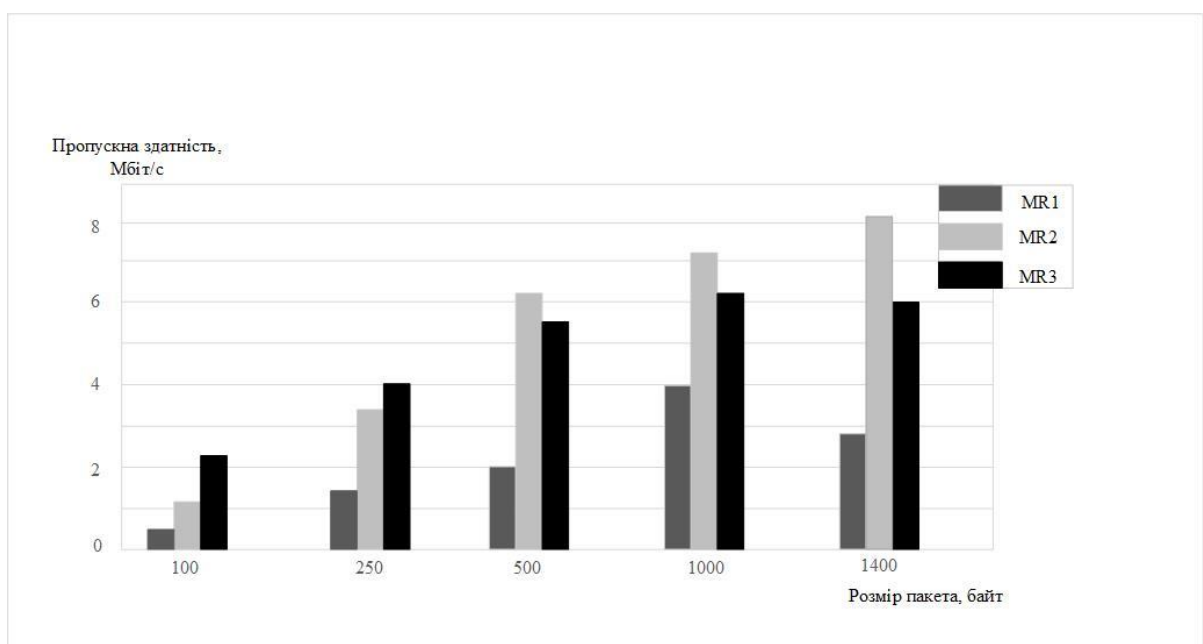


Рисунок 4.10 – Пропускна здатність MS через різні MR

Згідно з рис. 4.10 видно, що MR1, обраний SSS, завжди забезпечує найнижчу пропускну здатність для MS. MR3, обраний Ath07, забезпечує MS найбільшу пропускну здатність за умов малого розміру пакета, але не забезпечує її для середнього та великого розміру пакетів. Модель міжрівневого об'єднання враховує вплив розміру пакета на вартість ефірного часу.

4.6.2 Дослідження впливу завантаження трафіку на вартість ефірного часу

У роботі досліджено, як навантаження трафіку на канал доступу MR впливає на вартість ефірного часу MS. На рис. 4.11 показано модель мережі для дослідження.

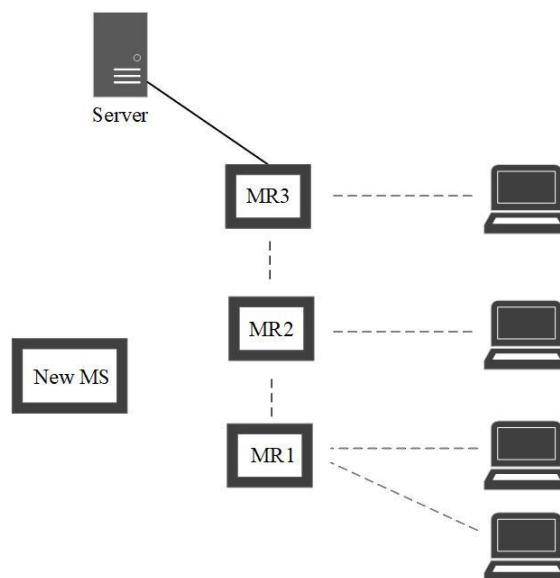


Рисунок 4.11 – Модель мережі для дослідження

MR1 має два клієнтські вузли, між якими проходить UDP-потік зі швидкістю 10 Мбіт/с; MR3 має клієнтський вузол, який пропускає UDP-потік зі швидкістю 20 Мбіт/с до сервера; MR2 також має пов'язаний з ним клієнтський вузол, але його трафік дуже малий. Розмір пакетів фонового трафіку і трафіку нового MS становить 8224 біт, щоб виключити вплив розміру пакета, який відрізняє продуктивність Ath07 і модель міжрівневого об'єднання. Швидкість передавання даних усіх клієнтів, каналу точки доступу та транзитного каналу кожного MR встановлено в режим Auto Mode.

На рис. 4.12 показано витрати ефірного часу на канал доступу, витрати ефірного часу на транзитний зв'язок і загальні витрати ефірного часу для Ath07 і моделі міжрівневого об'єднання через різні MR.

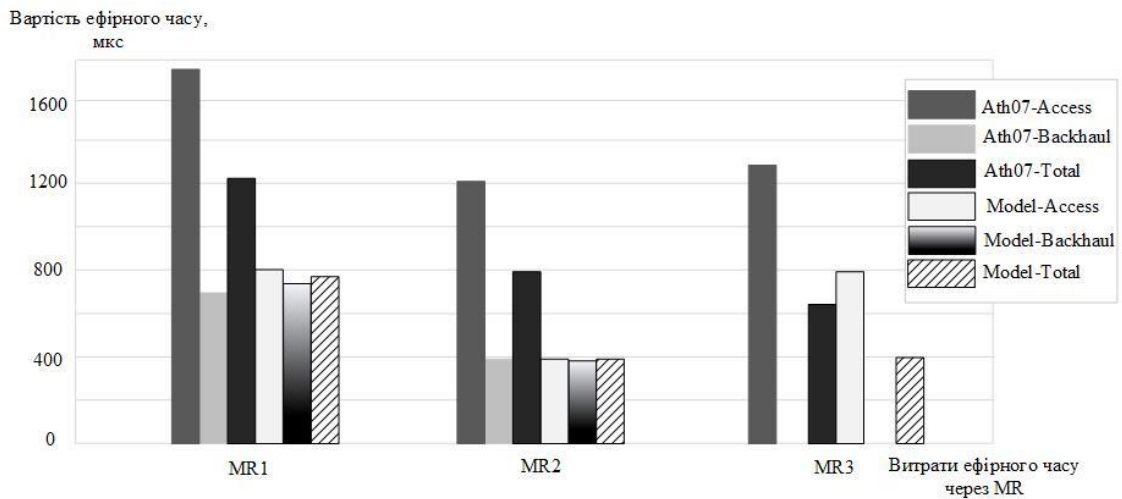


Рисунок 4.12 – Витрати ефірного часу через MR

Вартість ефірного часу Ath07 і вартість ефірного часу моделі міжрівневого об'єднання не можна порівнювати одна з одною, оскільки вони розраховуються у різний спосіб. Вимірювання вартості ефірного часу каналу доступу в Ath07 не враховує реального навантаження на трафік MR. Таким чином, MR3 вибирається в Ath07, оскільки вартість ефірного часу на транзитній лінії дорівнює нулю, що призводить до найнижчої загальної вартості ефірного часу серед трьох MR.

Модель міжрівневого об'єднання враховує навантаження трафіку на канал доступу і, таким чином, визначає, що MR2 є найкращим вибором для MS для підключення. На рис. 4.13 показано пропускну здатність UDP-сесії між MS і сервером, коли він об'єднується з різними MR.

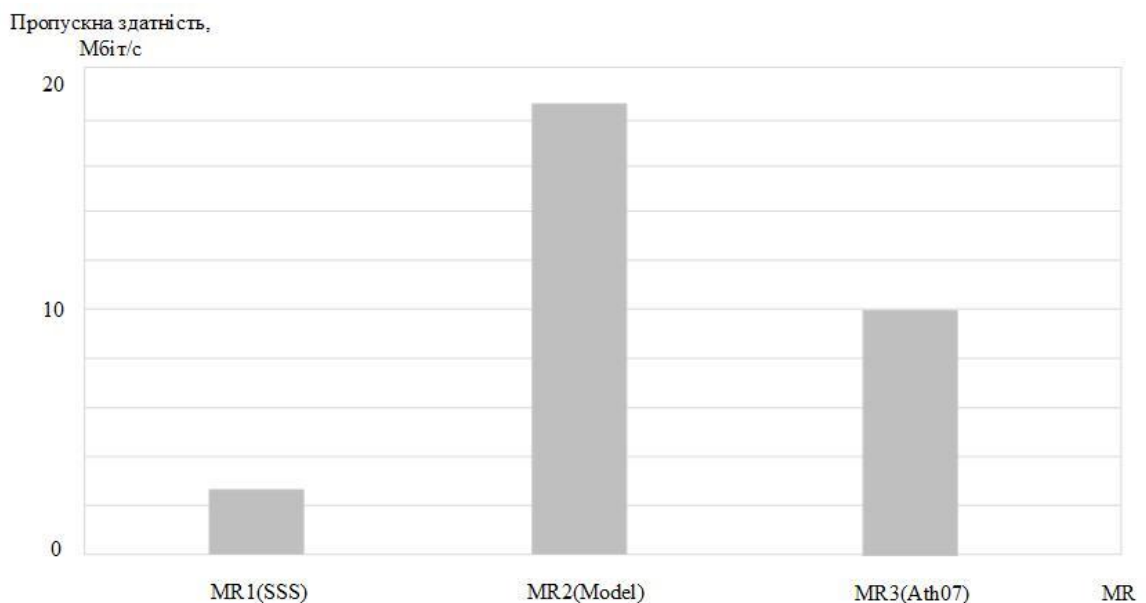


Рисунок 4.13 – Пропускна здатність MS через різні MR

Результат показує, що MR, обраний моделлю міжрівневого об'єднання, забезпечує MS вищу пропускну здатність, ніж MR, які обрано іншими схемами, що вказує на те, що врахування навантаження на трафік є важливим для ухвалення правильного рішення про об'єднання для MS.

4.6.3 Дослідження впливу асиметричних витрат на транспортування висхідним і низхідним каналами на вартість ефірного часу

Завданням цього дослідження є оцінка впливу асиметричних транспортних витрат на транспортування висхідного і низхідного каналів на вартість ефірного часу. На рис. 4.14 показано модель мережі.

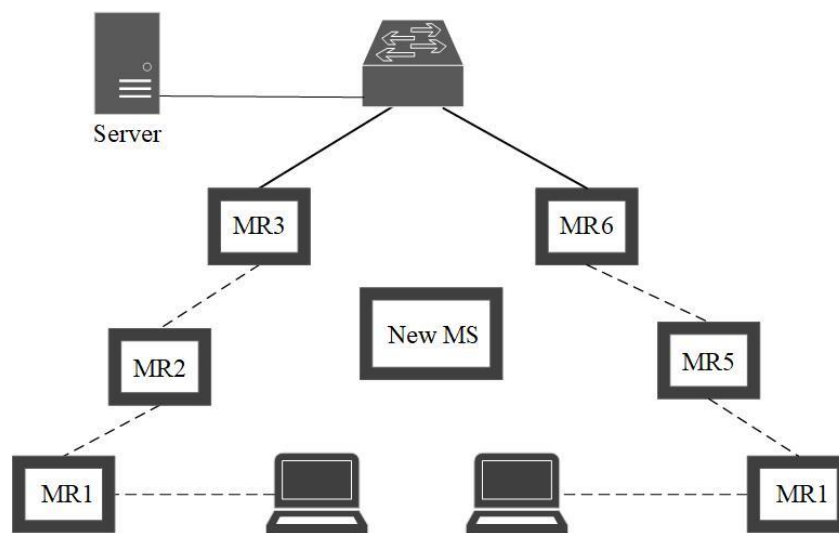


Рисунок 4.14 – Модель мережі для дослідження

У мережі WMN використовується шість MR. MR1, MR2, MR4 і MR5 є MAP, а MR3 і MR6 - тільки MP. Магістраль MR1, MR2 і MR3 працює на каналі 40 стандарту IEEE 802.11g, а магістраль MR4, MR5 і MR6 працює на каналі 60. Таким чином, дві транзитні гілки, що не перекриваються, під'єднано до мережі Інтернет для цієї WMN. MR1 має клієнтський вузол зі швидкістю 10 Мбіт/с, завантажуючи UDP-трафік на сервер, а MR4 має клієнтський вузол зі швидкістю 10 Мбіт/с, завантажуючи UDP-трафік з цього сервера. Трафік нового MS є завантаженням UDP-трафіку з сервера, наприклад, це трафік відео за запитом.

На рис. 4.15 показано витрати ефірного часу на канал доступу, витрати ефірного часу на транзитний зв'язок і загальні витрати ефірного часу для Ath07 і моделі міжрівневого об'єднання через різні MR.

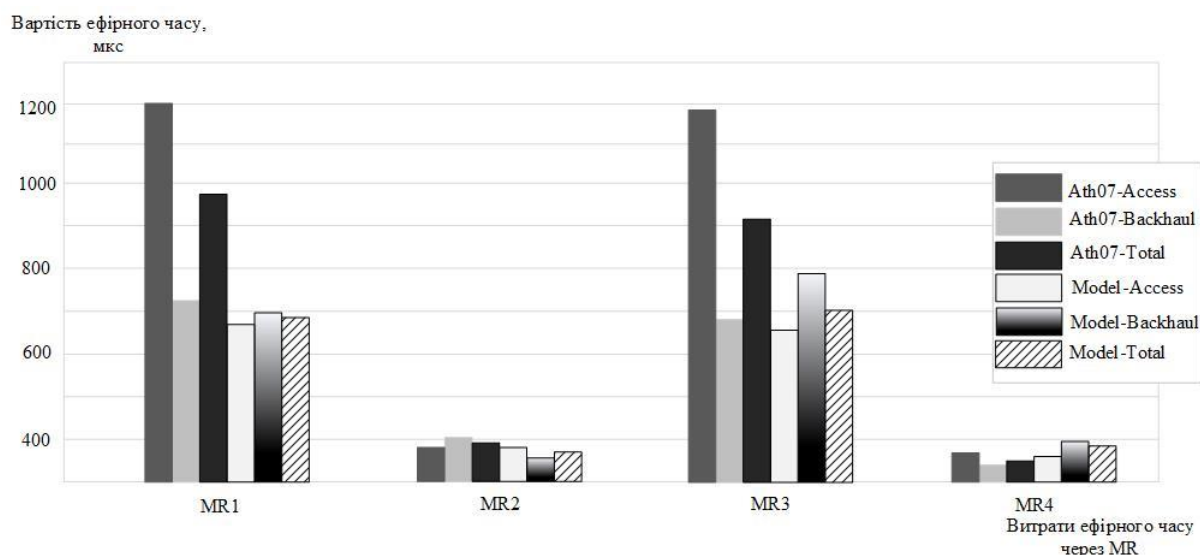


Рисунок 4.15 – Витрати ефірного часу через MR

Оскільки Ath07 враховує тільки вартість маршрутизації висхідного каналу для вартості ефірного часу транзиту, а трафік завантаження в гілці MR1-MR2-MR3 вищий, ніж у гілці MR4-MR5-MR6, то MR1 (2 hop від IGW) і MR2 (1 hop від IGW) приносять більше вартості ефірного часу для MS, ніж MR4 і MR5 у вимірах Ath07 MS, ніж MR4 і MR5 у вимірі Ath07, відповідно.

MR2 обирається моделлю міжрівневого об'єднання за найменшою загальною вартістю ефірного часу і забезпечує MS найбільшу пропускну здатність (рис. 4.16).

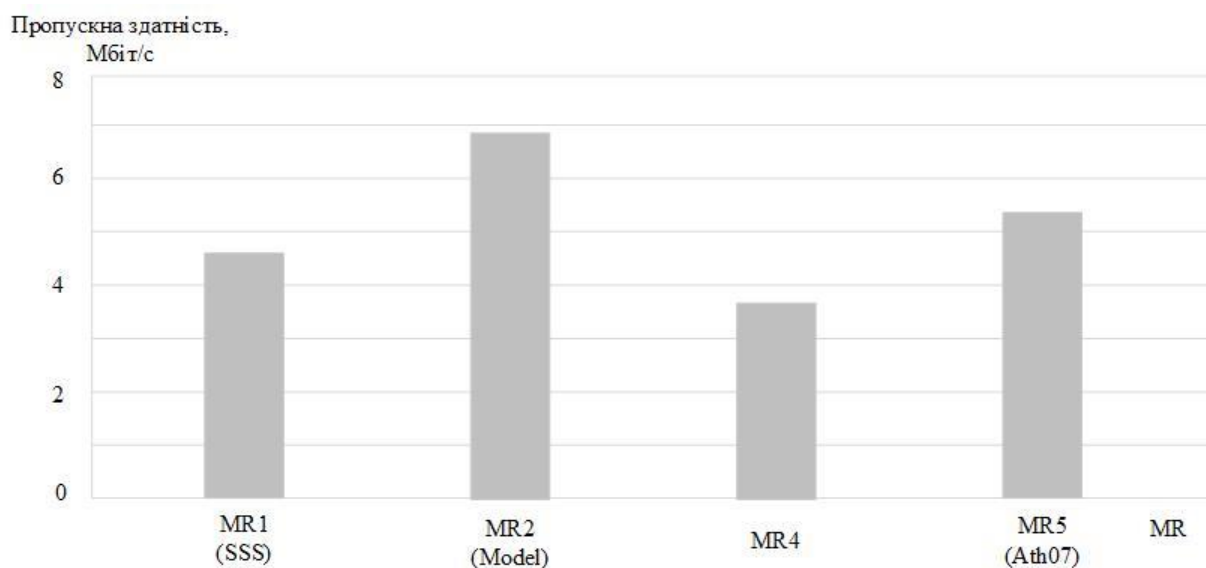


Рисунок 4.16 – Пропускна здатність MS через різні MR

Модель міжрівневого об'єднання оцінює вартість транзитного ефірного часу через кожен MR, ґрунтуючись на структурі трафіку MS, і надає 0,9 значенню β . Таким чином, на відміну від Ath07, MR1 і MR2 приносять меншу вартість ефірного часу для MS, ніж MR4 і MR5 відповідно.

Таким чином, врахування асиметричних витрат на транспортування висхідною і низхідною лініями зв'язку під час вимірювання вартості ефірного часу показало, що важливо визначити правильний MR, який забезпечує MS найкращу наскрізну продуктивність.

4.6.4 Дослідження затримки

Ключовою метою міжрівневого об'єднання є вибір MAP, що забезпечує максимальну наскрізну пропускну здатність для MS. Цей результат визначається після фактичного процесу об'єднання. Другою основною метою міжрівневого об'єднання є підтримання прийнятної низької загальної затримки об'єднання з точки зору користувача. На практиці поняття прийнятної та допустимої затримки може бути засноване на сприйнятті користувача.

Щоб краще зрозуміти загальну затримку, у роботі досліджено затримку кожного кроку, що бере участь у процедурі міжрівневого об'єднання. MS перемикається на кожен можливий канал AP та сканує всі MAP на цьому каналі.

Затримка на кожному каналі складається з чотирьох складових:

- 1) Затримка перемикання каналу для MS для перемикання на канал AP.
- 2) Затримка сканування каналу для MS для виявлення сусідніх MAP, що працюють на каналі AP.
- 3) Затримка для MS для надсилання повідомлень AIR і отримання повідомлень AIR.
- 4) Затримка передачі пакетів даних для кожної кандидатної MAP для вимірювання частоти помилок кадрів.

На рис. 4.17 показано затримку перемикання каналів для десяти повторів.

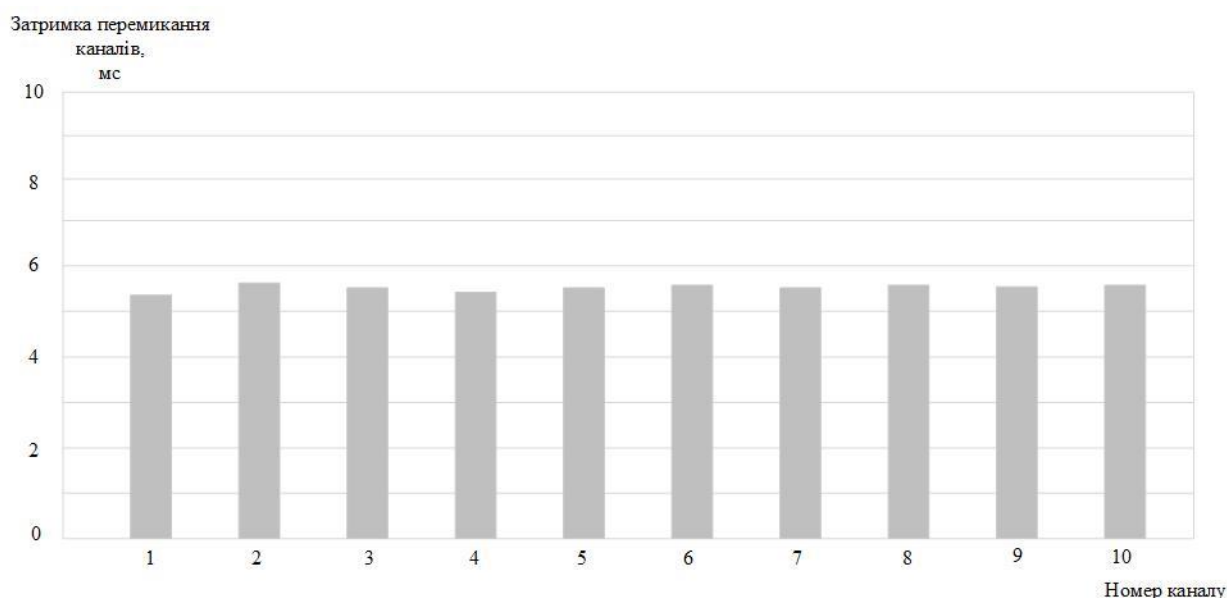


Рисунок 4.17 – Затримка перемикання каналів

Середня затримка перемикання каналів становить 5,425 мс, що узгоджується з експериментальними результатами досліджень, показаних у [76,77].

Виявлено, що повідомлення MAP не може бути успішно отримано MS у тому випадку, коли високий трафік каналу AP або високий рівень завад. Таким чином, встановлено таймер сканування каналу 220 мс, що дає MS дві можливості отримати повідомлення від кожної MAP (інтервал трансляції на MAP становить близько 100 мс) і, таким чином, підвищує ефективність виявлення MAP.

На рис. 4.18 показано затримку на одному каналі AP як функції від кількості MAP.

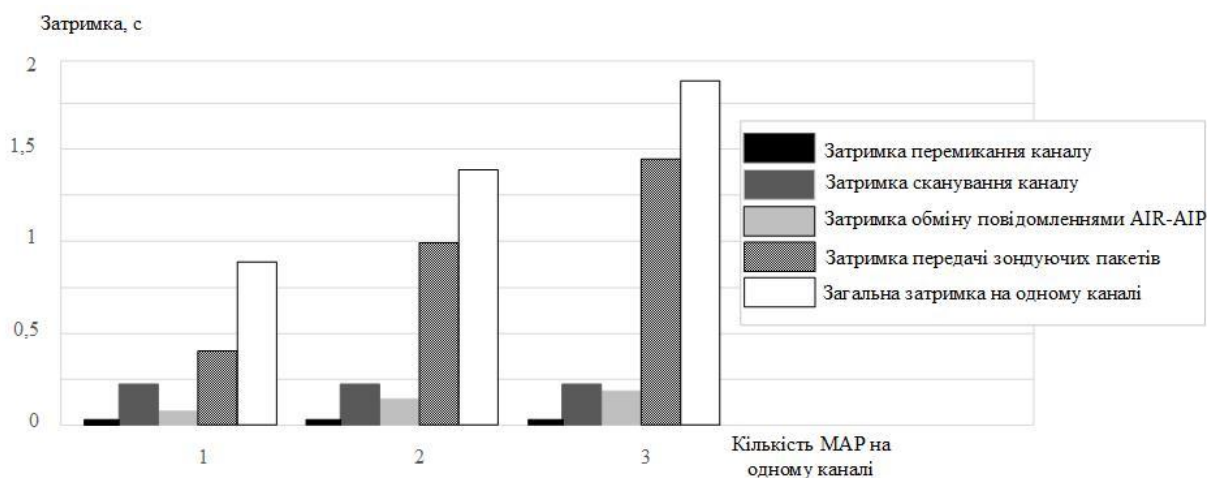


Рисунок 4.18 – Затримка на одному каналі

Усі MAP знаходяться на відстані двох hop від IGW, і обмін повідомленнями AIR-AIR для кожного MAP займає 50-60 мс. Сорок пробних пакетів даних передаються на кожному MAP з інтервалом 10 мс, і відповідна затримка становить близько 480 мс для кожної MAP. Як показано на рис. 4.18, загальна затримка на одному каналі AP варіюється від 0,758 с до 1,828 с, коли кількість MAP-кандидатів на цьому каналі збільшується з 1 до 3. Коли MS сканує всі одинадцять каналів стандарту IEEE 802.11b/g, то загальна затримка може досягати 20 с, якщо середня кількість MAP на кожному каналі становить 3.

На практиці більшість MAP розгорнуто на трьох непересічних каналах для стандарту IEEE 802.11b/g (тобто каналах 1, 6 і 11), і тому кількість MAP на інших каналах значно менша. Кандидатні MAP обирають тільки в тому разі, якщо якість сигналу повідомлень, що приймається, вища за заданий поріг h . Тому на практиці фактична кількість MAP, що підлягають зондуванню, менша за вищезазначену кількість. Подальша оптимізація процедури зондування полягає в тому, щоб пропустити канали, що перекриваються, якщо MS виявила MAP на будь-якому з трьох каналів, що не перетинаються, за якими загальна вартість ефірного часу MS нижча за заданий поріг.

Припускаючи, що більшість MAP працюють на одному з трьох каналів, що не перетинаються, ця стратегія в більшості випадків дозволяє виявити найкращу MAP для MS і ще більше скоротити затримку. Після того як MS визначить найкращу MAP для об'єднання, він переключиться на канал AP цієї MAP (якщо MS не перебуває на цьому каналі в цей момент), автентифікується, а потім об'єднується з цією MAP, як зазначено стандартом IEEE 802.11 [59].

На рис. 4.19 показано, що затримки об'єднання (включно із затримками перемикання каналів) для 10 реплік становить менш як 11 мс. Таким чином, сама затримка об'єднання нехтувано мала порівняно із затримкою зондування об'єднання.

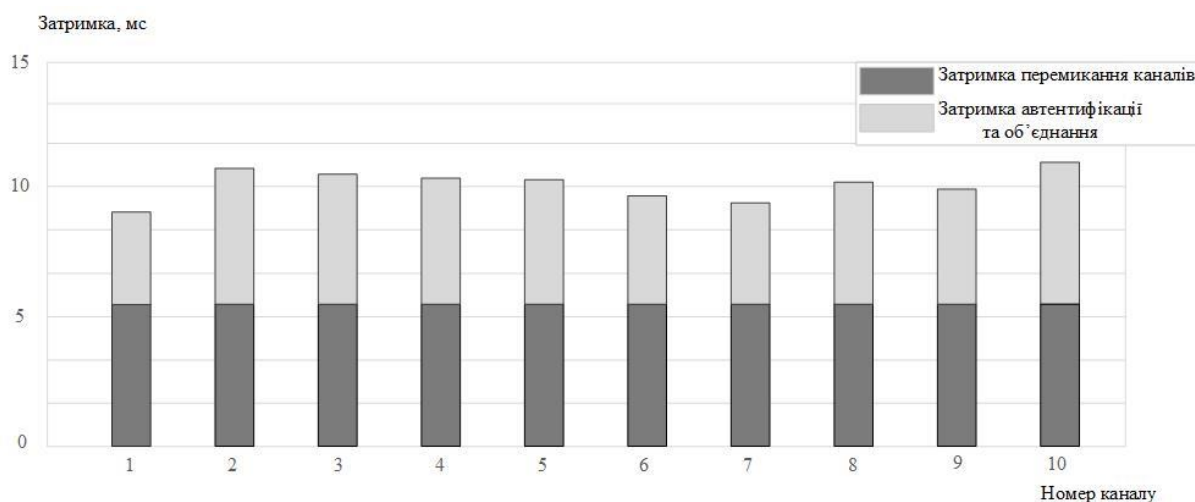


Рисунок 4.19 – Затримка об'єднання

Слід зазначити, що затримка об'єднання може збільшитися, якщо використовується складний метод автентифікації, наприклад, повна автентифікація стандарту IEEE 802.1X EAP [78].

Дослідження показали, що вагові коефіцієнти вартості ефірного часу каналу доступу та транзитного ефірного часу дорівнюють під час розрахунку наскрізної вартості ефірного часу, що виключає вплив вагових коефіцієнтів на порівняння продуктивності між моделями міжрівневого об'єднання та Ath07. Зроблено оцінку загальної затримки моделі об'єднання, а також затримки, що вноситься кожним кроком у процедурі об'єднання, згідно з алгоритмом (рис. 4.3).

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проведено дослідження показників продуктивності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11g на основі mesh архітектури.

Проведено огляд протоколів для організації Wi-Fi mesh-мереж, надано їх переваги та недоліки. Для дослідження обрано протокол BATMAN, як найкращий варіант для вирішення мережних завдань, що обумовлено низкою його ключових переваг. В роботі увагу зосереджено на версії BATMAN-Advanced. Для оцінювання продуктивності мережі проведено аналіз продуктивності протоколу BATMAN-Adv на мережному та каналному рівнях (BATMAN-AdvL3 й BATMAN-AdvL2).

В роботі проведено дослідження продуктивності мережі стандарту IEEE 802.11b/g/n з підтримкою BATMAN-Adv з використанням моделі мережі, що аналогічна кампусу. Використано програмне забезпечення OpenWrt та роутер TP-Link та проведено налаштування BATMAN-Adv на OpenWrt, включно з конфігурацією мережних та безпроводових інтерфейсів з використанням необхідних утиліт. Отримано результати затримки й пропускної здатності. Показано, що пропускна здатність знижується зі збільшенням кількості переходів, а затримка збільшується.

Проведено аналіз показників поширення сигналу з використанням радіоінтерфейсу стандарту IEEE 802.11g всередині приміщення, який працює на частоті 2,4 ГГц. Для дослідження використано модель LDPL. Моделювання рівня сигналу виконано для трьох випадків: NLOS1, NLOS2 і LOS. Результати моделювання порівняно з теоретичними дослідженнями, проведеними для різних сценаріїв поширення сигналу в каналах зв'язку всередині приміщень. Показано, що в умовах NLOS виміряні дані практично відповідають теоретичній кривій втрат, а в умовах LOS - вимірний сигнал не зовсім точно повторює криву втрат на трасі Log Distance.

В роботі проведено дослідження, спрямоване на аналіз рівня сигналу стандарту IEEE 802.11g для оцінювання якості сигналу з метою прогнозування покриття мережної інфраструктури. Основну увагу приділено визначенню оціночних значень рівня сигналу за допомогою моделі LDPL. Отримано середні й оціночні значення рівня сигналу з різними показниками поширення. Доведено, що розрахункові значення, найближчі до реальних, отримано з показником

поширення 4 (LDPL4). Розраховано відносну похибку між реальними значеннями та оціночними значеннями з LDPL4.

У роботі запропоновано використовувати метрику вартості ефірного часу з кінця в кінець для визначення MAP, до якої має підключитися MS. Запропоновано модель міжрівневого об'єднання, що враховує частоту помилок кадрів за різних розмірів пакетів, доступну пропускну здатність каналу доступу після об'єднання нового MS, а також асиметричні витрати на транспортування висхідною та низхідною лініями зв'язку. У моделі передбачено підтримку повторного об'єднання. Використано пристрої Wi-Fi і драйвер Madwi з відкритим вихідним кодом.

Розроблено модель об'єднання рівнів мережі та алгоритм об'єднання на MS. В роботі використано міжрівневе програмне забезпечення для Linux та проведено модифікацію драйвера Madwifi для підтримки функцій міжрівневого об'єднання на MS і MR.

В роботі проведено ряд досліджень, спрямованих на оцінку продуктивності міжрівневого об'єднання: дослідження впливу розміру пакета на вартість ефірного часу, дослідження впливу завантаження трафіку на вартість ефірного часу, дослідження впливу асиметричних витрат на транспортування висхідним і низхідним каналами на вартість ефірного часу.

Враховано порівняння продуктивності запропонованої моделі міжрівневого об'єднання зі схемою об'єднання на основі рівня сильного сигналу SSS і схемою об'єднання з урахуванням транзиту (Ath07), з погляду наскрізної продуктивності MS через MR, обраною кожною схемою об'єднання. Дослідження показали, що вагові коефіцієнти вартості ефірного часу каналу доступу та транзитного ефірного часу дорівнюють під час розрахунку наскрізної вартості ефірного часу, що виключає вплив вагових коефіцієнтів на порівняння продуктивності між моделями міжрівневого об'єднання та Ath07.

Проведено оцінку загальної затримки моделі об'єднання, а також затримку, що вноситься кожним кроком у процедурі об'єднання згідно з алгоритмом об'єднання на MS. Доказано, що метою міжрівневого об'єднання є вибір MAP, що забезпечує максимальну наскрізну пропускну здатність для MS і підтримання прийнятної низької загальної затримки об'єднання з точки зору користувача.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Singh M. S., Talasila V. A Practical Evaluation for Routing Performance of BATMAN-ADV and HWMN in a Wireless Mesh Network Test-bed. *1st IEEE Conference IC-SSS*. 2015. Vol. 6. P. 67–82.
2. Zeiger F. Mobile robot teleoperation via wireless multihop networks - parameter tuning of protocols and real world application scenarios. *Informatics in Control, Automation and Robotics*. 2009. Vol. 10. P. 139 – 152.
3. Johnson D. Comparison of two routing metrics in OLSR on a grid based mesh network. *Journal on Ad-Hoc Networks*. 2009. Vol. 7. P. 374–387.
4. Abdulhaq B., Mokhtar M. B., Sali A. Wireless Mesh Networks Protocols: State of the Art Review. *International Journal of Advances in Computing and Information Technology*. Vol. 11. 2012. P. 181–200.
5. Zeiger F. Mobile robot teleoperation via wireless multihop networks - parameter tuning of protocols and real world application scenarios. *Informatics in Control, Automation and Robotics, ser. LNEE*. 2009. Vol. 37 P. 139–152.
6. B.A.T.M.A.N. Advanced Documentation. URL: <https://www.open-mesh.org/projects/batman-adv/Doc-overview> (дата звернення: 03.07.2023).
7. Бутман І. Wi-Fi. Технологія і практика безпроводового зв'язку. Київ: НТ Пресс, 2009. 256 с.
8. Линник Ю. Беспроводові мережі. Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LTE. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2006. 245 с.
9. Kulla E. Performance comparison of OLSR and BATMAN routing protocols by a MANET testbed in stairs environment. *Computers & Mathematics with Applications*. 2012. Vol. 21. P. 139–149.
10. Linder M., Neumann A. Better Approach To Mobile Ad Hoc Networking. URL: <http://open-mesh.net/batman> (дата звернення: 15.07.2023).
11. Singh M. S. Design and development of wireless mesh test-bed for large area monitoring. *International Conference on Circuits, Controls, Communications and Computing*. 2016. P. 1–4.
12. Neumann A. Better Approach to Mobile Ad-hoc Networking (B.A.T.M.A.N.). URL: [draft-openmesh-b-a-t-m-a-n-00.pdf](#) (дата звернення: 16.07.2023).

13. Gianni C., Ducatelle F., Gambardella M. AntHocNet: An Adaptive Nature-inspired Algorithm for Routing in Mobile Ad hoc Networks. *European Transactions on Telecommunications*. 2005. Vol. 16. P. 443–455.
14. Ворончихін О.А. Особливість протоколу В.А.Т.М.А.Н для організації Wi-Fi mesh мереж. *Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті: матеріали 27-го Міжнародного молодіжного форуму*, Харків, 2023. С. 28–29.
15. Abolhasan M. Real-world performance of current proactive multi-hop mesh protocols. *15th Asia Pacific Conference on Communications (APCC 2009)*. 2009. Vol. 8. P. 44–47.
16. Johnson D. Simple pragmatic approach to mesh routing using BATMAN. *2nd IFIP International Symposium on Wireless Communications and Information Technology in Developing Countries*. 2008. P. 1–10.
17. Murray D. An experimental comparison of routing protocols in multi hop ad hoc networks. *Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference*. 2010. P. 159–164.
18. Integrating an OpenWrt network device in network. URL: <https://openwrt.org/docs/network/integrating-openwrt> (дата звернення: 20.06.2023).
19. Testing distribution packages system. URL: <https://www.debian.org/distrib/packages> (дата звернення: 25.06.2023).
20. Batman-adv: Implement multicast packet reception and forwarding. URL: <https://github.com/open-mesh-mirror/batman-adv> (дата звернення: 30.06.2023).
21. B.A.T.M.A.N advanced operates. URL: https://manpages.ubuntu.com/manpages/impish/_/batctl.8.html (дата звернення: 10.07.2023).
22. Installing and configuring a DNS server in ISP manager Lite. URL: <https://my.keyweb.net/index.php/knowledgebase> (дата звернення: 18.06.2023).
23. Abdulhaq B. Wireless Mesh Networks Protocols: State of the Art. *International Journal of Advances in Computing and Information Technology*. 2012. P. 259–264.
24. Yan Y., Cai H. & Seo S.-W. Performance Analysis of IEEE 802.11. Wireless Mesh Networks. *IEEE International Conference on Communications (ICC 2008)*. 2008. P. 2547–2551.
25. Devasirvatham D.M. Radio propagation measurements at 850 MHz, 1,7 GHz and 4,0 GHz inside two dissimilar office buildings. *Electronics Letters*. 1990. P. 445–447.

26. Rappaport T. S. Wide-band microwave propagation parameters using cellular and linear polarized antennas for indoor wireless channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1992. P. 231–242.
27. Tarnig J. H. Three-dimensional modeling of 900MHz and 2.44 GHz radio propagation in corridors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1997. P. 519–526.
28. Gibson T. B. Prediction and measurements of wall intersection loss. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1999. P. 55–57.
29. Seidel S. Y. Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1994. P. 879–891.
30. Seidel S. Y. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communication in multifloored buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1992. P. 207–217.
31. Honcharenko W. Mechanisms governing UHF propagation on single floors in modern office buildings. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1992. P. 496–504.
32. Dersch U. Propagation mechanisms in microcell and indoor environments. *IEEE Transactions*. 1994. P.1058–1066.
33. Asmussen A., Rodriguez R., Roshak L. MC1319x Range Performance Freescale Semiconductor. URL: <https://www.nxp.com.cn/docs/en/application-note/AN2902.pdf> (дата звернення 02.01.2024).
34. Ali A. H. Investigation of indoor WIFI radio signal propagation. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*. 2019. P.117–119.
35. Chen Z., Delis A., Bertoni H. L. Radio-wave propagation prediction using ray-tracing techniques on a network of workstations (now). *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2004. Vol.64. P.1127–1156.
36. Rappaport T. S. Wireless communication principles and practice. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 205 p.
37. Saunders S. R. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2nd Edition. John Wiley & Sons, 1999. 560 p.
38. Ali A. H. Investigation of indoor Wi-Fi radio signal propagation. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*. 2010. P. 117 – 119.

39. Ndzi D. Signal propagation analysis for low data rate wireless sensor network applications in sport grounds and on roads. *Progress in Electromagnetics Research*. 2012. Vol. 125. P. 1 – 19.
40. Grant A. M. Path loss models for two small airport indoor environments. URL: <https://scholarcommons.sc.edu/etd/5258> (дата звернення: 26.08.2023).
41. Shaw J. A. Radiometry and the fry's transmission equation. *American Journal of Physics*. 2013. P. 33–37.
42. Faria D. B. 802.11g Signal Strength Evaluation in an Industrial Environment. *Elsevier Internet of Things Journal*. 2020. P. 1–22.
43. Srinivasa S. Path loss exponent estimation in large wireless networks. *Information Theory and Applications Workshop*. 2009. P. 124–129.
44. Lkhagvatseren T., Hruska F. Path loss aspects of a wireless communication system for sensors. *International Journal of Computers and Communications*. 2011. Vol. 5. P. 18–26.
45. Cheffena M. Empirical path loss models for wireless sensor network deployment in snowy environments. *IEEE Antennas and Wireless Propagation*. 2017. P. 2877–2880.
46. Japertas S. Research of IEEE 802.11 standard signal propagation features in multi partition indoors. *Second International Conference on Digital Information Processing and Communications*. 2012. P. 1–4.
47. Fern´andez J. An improvement of the log-distance path loss model for digital television in Lima. *XXX Simp´osio Brasileiro de Telecomunicações*. 2012. P. 1–4.
48. Rath H. K. Realistic indoor path loss modeling for regular Wi-Fi operations. *Twenty-third National Conference on Communications*. 2017. P. 1–6.
49. Rubio L. Path loss characterization for vehicular-to-infrastructure communications at 700 MHz and 5,9 GHz in urban environments. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*. 2015. P. 93–94.
50. Alhammadi M. Large-scale empirical model for a 2.4 GHz wireless network in an outdoor environment. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*. 2019. P. 1–4.
51. Kun Z. Channel measurement and characterization for industrial internet of things. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. 2019. P. 1–5.
52. Valadares D. C. G., de Araújo J. M. F. R., Perkusich Â., Spohn M. A., Melcher E. U. K. & Albuquerque N. P. Towards 802.11g Signal Strength Estimation in

an Industrial Environment: A Practical Study. *Developments in Primatology: Progress and Prospects*. 2019. P. 559–570.

53. Linux man page. URL: <https://linux.die.net/man/8/iwconfig> (дата звернення: 23.09.2023).

54. LinSSID. Graphical wireless scanning for Linux. URL: <https://sourceforge.net/projects/linssid/> (дата звернення: 30.09.2023).

55. He Y. Design and implementation of CLASS: A Cross-Layer Association scheme for wireless mesh networks. *Ad Hoc Networks*. 2011. P. 10–27.

56. IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999. 90 p.

57. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and Metropolitan networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz band. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000. 97 p.

58. Joint SEE-Mesh/Wi-Mesh Proposal to 802.11 TGs, RWTH Aachen University. URL: <https://www.https://slideplayer.com/slide/14403897/> (дата звернення 08.01.2024).

59. IEEE Standard for Information Technology: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.11-2020_Cor_1/10836/ (дата звернення 18.01.2024).

60. Mhatre V. & Papagiannaki K. Using smart triggers for improved user performance in 802.11 wireless networks. *Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys)*. 2006. P. 246–259.

61. Vasudevan S. Facilitating access point selection in IEEE 802.11 wireless networks. *Proceedings of USENIX Internet Measurement Conference*. 2005. P. 293–298.

62. Lee H. Available bandwidth-based association in IEEE 802.11 wireless LANs. *Proceedings of the 11th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. 2008. P. 132–139.

63. Pralhad D., Kashyap A., Sung C., Das S. R. Predictive methods for improved vehicular Wi-Fi access. *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys)*. 2009. P. 263–276.

64. Athanasiou G. Dynamic crosslayer association in 802.11-based mesh networks. *Proceedings of IEEE Infocom*. 2007. P. 2090–2098.

65. Giannoulis A. Supporting vehicular mobility in urban multi-hop wireless networks. *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys)*. 2008. P. 54–66.

66. Makhlof S. A network-assisted association scheme for 802.11-based mesh networks. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. 2008. P. 1339–1343.

67. Luo L. Improving end-to-end performance of wireless mesh networks through smart association. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. 2008. P. 2087–2092.

68. Hui Wang. Dynamic association in IEEE 802.11 based wireless mesh networks. *Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Communication Systems*. 2009. P. 81–85.

69. RPM resource madwifi. URL: <https://rpmfind.net/linux/rpm2html/search.php?query=madwifi> (дата звернення: 10.10.2023).

70. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 2013. 757 p.

71. Kumar A. New insights from a fixed-point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs. *Proceedings of IEEE Infocom*. 2005. P. 109–140.

72. Guha R.K. Characterizing temporal SNR variation in 802.11 networks. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. 2006. P. 1408–1413.

73. Geier J. Define Minimum SNR Values for Signal Coverage. URL: <https://www.enterprisenetworkingplanet.com/standards-protocols/wi-fi-define-minimum-snr-values-for-signal-coverage/> (дата звернення: 10.10.2023).

74. Malinen J. Host AP driver for Intersil Prism2/2.5/3. URL: <https://hostap.epitest.fi/> (дата звернення 09.12.2023).

75. Tirumala A. Iperf: The TCP/UDP bandwidth measurement tool. URL: <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/> (дата звернення 29.11.2023).

76. Ramani I., & Savage S. SyncScan: practical fast handoff for 802.11 infrastructure networks. *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. P. 685-684.

77. Chereddi C. System Architecture for Multichannel Multi-interface Wireless Networks. Illinois: University of Illinois at Urbana Champaign, 2006. 67 p.

78. IETF RFC 2865-2000 - Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS). URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2865> (дата звернення 22.11.2023).