Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»
на тему:
АДАПТИВНА МАРШРУТИЗАЦІЯ В БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ
08-34.МКР.002.00.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
групи АРЗ-18м
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
_____ Вознюк О.П.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТКСТБ
_____ Стальченко О.В.

«____» _____ 2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. каф. БМІ
_____ Злепко С.М.

«____» _____ 2019 р.

ВНТУ ФІРЕТ ТКСТБ МКР 2019

Вінниця ВНТУ - 2019 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Галузь знань 17– Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТКСТБ
к.т.н., професор Г.Г. Бортник

"___" _____2019 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Вознюку Олексію Петровичу .
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Адаптивна маршрутизація в безпровідних мережах передачі даних
керівник роботи Стальченко Олександр Володимирович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "02" 10 2019 року № 254
2. Строк подання студентом роботи 02 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до роботи: MANET; WSN; WMN; LEACH; SPIN; Flooding; AODV; OLSR; B.A.T.M.A.N.; AODV; OLSR; DSR; швидкість передачі даних в мережі Wi-Fi - 2.4GHz.; коефіцієнт втрат пакету, % - 0,7; час відновлення маршруту – 9,6 секунд; бездротові мережеві інтерфейси IEEE 802.11 або IEEE 802.15.4.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)1. Загальна характеристика маршрутизації в бездротових мережах; 2.Основи теорії машинного навчання; 3.Алгоритм мережевої маршрутизації на основі машинного навчання з підкріпленням; 4.Економічний розділ; 5.Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Архітектура мережі на прикладі Freifunk; Узагальнений механізм роботи навчання з підкріпленням; Процедура обміну RREQ і RREP повідомленнями; Логічна блок-схема зворотного зв'язку; Узагальнена схема програмної імплементації протоколу; Розподіл ймовірностей вибору вузлів; (довідниковий) допустимі значення виробничих чинників.

ВНТУ ФІЕН ТКСТБ МКР 2019

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Стальченко О.В., доцент кафедри ТКСТБ		
Економічна частина	Лесько О.Й. к.е.н. професор ЕПВМ		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Березюк О.В. к.т.н. доц. кафедри БЖДПБ.		

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	06.09.2019р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	13.09.2019р.	
3.	Загальна характеристика маршрутизації в бездротових мережах	04.10.2019р.	
4.	Основи теорії машинного навчання	25.10.2019р.	
5.	Алгоритм мережевої маршрутизації на основі машинного навчання з підкріпленням	08.11.2019р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	15.11.2019р.	
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	22.11.2019р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	29.11.2019р.	
9.	Нормоконтроль МКР	02.12.2019р.	
10.	Попередній захист МКР, рецензування МКР	06.12. 2019р.	
11.	Захист МКР ЕК	09.12. 2019р.	

Студент _____ Вознюк О.П.
(підпис)

Керівник роботи _____ Стальченко О.В.
(підпис)

ВПУ ФРЕН ТКСТБ МКР 2019

РЕФЕРАТ

Вознюк О.П. Адаптивна маршрутизація в безпровідних мережах передачі даних: магістерська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ 2019р., 137 - стор., 25 – рис., 17 – табл., 54 – бібл. – українською мовою.

В даній магістерській кваліфікаційній роботі проведено розробку адаптивна схема маршрутизації в багатовузлових бездротових мережах передачі даних, застосовуючи математичний апарат вибору оптимального дії з теорії машинного навчання з підкріпленням для вибору маршруту, що зменшило відсоток втрат пакетів для розробленої схеми маршрутизації на менше 1%.

У роботі було розроблено механізм передачі пакетів по маршруту із застосуванням зворотного зв'язку для оновлення ваги маршруту в залежності від успішності передачі пакета, та проведено програмну імплементацією на мові високого рівня Python.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

ABSTRACT

Vozniuk O.P. Adaptive routing in wireless data networks: Master's qualification work - Vinnitsa: VNTU 2019, 137 - pages, 25 - fig., 17 - table, 54 - bibl. - In ukrainian.

In this master's qualification, an adaptive routing scheme was developed in multi-node wireless data networks, using a mathematical machine to select the optimal action in machine learning theory with reinforcement to select a route, which reduced the percentage of packet losses for the developed routing scheme by less than 1%.

In the work, a mechanism for the transmission of packets on a route using feedback was developed to update the weight of the route depending on the success of the packet transmission, and software implementation was implemented in a high level Python language.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ……..9

ВСТУП……10

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ…….13

1.1 Аналіз бездротових багато вузлових мереж зв'язку……..…….13

1.2 Теорія машинного навчання, навчання з підкріпленням……..….21

1.3 Аналіз алгоритмів маршрутизації в бездротових багатовузлових мережах передачі даних……..24

1.4 Реактивні протоколи маршрутизації……30

1.5 Проактивні протоколи маршрутизації…….36

1.6 Вибір метрик маршрутизації…….42

2. ОСНОВИ ТЕОРІЇ МАШИННОГО НАВЧАННЯ……44

2.1 Машинне навчання з підкріпленням……44

2.2 Основні елементи теорії машинного навчання з підкріпленням……47

2.3 Розрахунок функції значень……..49

2.4 Метод зваженого вибору дії……..52

3. АЛГОРИТМ МЕРЕЖЕВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ……..53

3.1 Взаємозв'язок теорії навчання з підкріпленням і завдання Маршрутизації…….53

3.2 Процедура пошуку маршруту, алгоритм первинного поновлення ваг маршрутів……57

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

3.3 Алгоритм поновлення ваг маршрутів на основі зворотного зв'язку……..62

3.4 Алгоритм вибору маршруту……..68

3.5 Аналітичний опис розробленого алгоритму……70

3.6 Програмна імплементація розробленого алгоритму……...76

3.7 Методика оцінки продуктивності протоколів маршрутизації в умовах реальної мережі……83

3.8 Результати експериментів……86

4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА……..90

4.1 Технологічний аудит результатів проведених досліджень……...90

4.2 Розрахунок витрат на проведення досліджень……...95

4.3 Оцінювання технічного рівня проведених наукових досліджень……...99

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ……103

5.1 Технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці……103

5.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження……108

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях……110

5.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи безпровідної мережі передачі даних в умовах надзвичайних ситуацій……115

Висновки до розділу……..116

ВИСНОВКИ……117

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……....119

Додаток А (обов’язковий) технічне завдання……...124

Додаток Б (обов’язковий) Архітектура мережі на прикладі Freifunk……..…131

ВІТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Додаток В (обов’язковий) Узагальнений механізм роботи навчання з підкріпленням……..132

Додаток Г (обов’язковий) Процедура обміну RREQ і RREP повідомленнями…..133

Додаток Д (обов’язковий) Логічна блок-схема зворотного зв'язку……134

Додаток Е (обов’язковий) Узагальнена схема програмної імплементації протоколу …….135

Додаток Є (обов’язковий) Розподіл ймовірностей вибору вузлів ……..136

Додаток Ж (довідниковий) Допустимі значення виробничих чинників……137

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОЗП – Оперативно Запам’ятовуючий Пристрій

ПЗП – Постійно Запам’ятовуючий Пристрій

СКВ – Середньквадратичне Відхилення

ARQ – Automatic Repeat Query

AODV – Ad hoc On-Demand Distance Vector

B.A.T.M.A.N. – Better Approach To Mobile Adhoc Networking

DSR – Dynamic Source Routing

HWMP – Hybrid Wireless Mesh Protocol

IP – Internet Protocol

IPv4 – Internet Protocol version 4

IPv6 – Internet Protocol version 6

MANET – Mobile Ad hoc Network

OLSR – Optimized Link State Routing

VANET – Vehicular Ad hoc Network

WMN – Wireless Mesh Network

WSN – Wireless Sensor Network

WEP – Wired Equivalent Privacy

WPA – Wi-Fi Protected Access

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час, доставка інформації до звичайного користувача у багатьох випадках здійснюється за допомогою бездротових технологій передачі даних. Швидкості передачі даних по бездротових каналах зв'язку безупинно ростуть [1], тим самим стимулюючи ринок зв'язку надавати все більшу кількість контенту кінцевим користувачам, розширюючи ринок телекомунікацій. Тільки за останні 10 років, середня швидкість передачі даних по мобільній мережі виросла з 0,02 МБ / с до 300 МБ / с, а поточні сучасні стандарти бездротових мереж Wi-Fi, є де-факто основними способами первинного доступу в мережу. Інтернет для більшості мобільних пристроїв, досягають швидкостей в кілька гігабіт на секунду.

Аналіз останніх досліджень. На даний момент, в бездротових ніздрюватих мережах повсюдно використовується протокол маршрутизації B.A.T.M.A.N. (Better Approach to Mobile Ad hoc Networking). Перш за все, це пов'язано з ефективною програмної імплементацією протоколу, код якого постійно підтримується і оновлюється розробниками. Протокол B.A.T.M.A.N. [2]базується на розширеному алгоритмі проактивного маршрутизації і добре використовує ресурси мережі, однак має ряд проблем, які пов'язані з динамічною топологією мережі, а також ненадійними бездротовими каналами передачі, що призводить до дуже високими відсотками втрат пакетів на маршруті. Безліч інших протоколів маршрутизації для даних мереж, на жаль, не мають актуальною програмної реалізації, що утруднює їх застосування в реальних мережах. Таким чином, протокол B.A.T.M.A.N. є де-факто основним протоколом маршрутизації в бездротових ніздрюватих мережах, але має ряд проблем з надійністю пересилання даних по маршруту.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Мета та постановка задачі. Метою даної кваліфікаційної роботи є рішення проблеми ефективної маршрутизації трафіку в багатовузлових бездротових мережах передачі даних[3].

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз моделі адаптивної маршрутизації на основі марковского процесу прийняття рішень.
- синтез механізму первинного поновлення ваг маршрутів і схеми передачі пакетів по маршруту із застосуванням зворотного зв'язку; синтез механізму збільшення / зменшення нагороди відповідно за вибір маршруту з високим / низьким відсотком втрат пакетів на маршруті;

Методи досліджень базуються на використанні: математичного моделювання на основі марковского процесу прийняття рішень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- запропоновані формули для обчислення нагороди за вибір маршруту, враховують рівень бездротового сигналу (RSSI)[4], що дозволило включити в оцінку якості маршруту поточні фізичні характеристики бездротової многоузловой мережі, на відміну від існуючих схем адаптивної маршрутизації на основі алгоритмів машинного навчання з підкріпленням;
- розроблено механізм первинного розподілу і обчислення ваг маршрутів на основі комбінації параметрів рівня сигналу (RSSI) і кількості проміжних вузлів, який дозволив більш точно оцінювати якість маршруту в бездротової многоузловой мережі;
- розроблений адаптивний алгоритм обчислення ваг маршрутів залежно від поточного відсотка втрат пакетів в каналі, який дозволив значно зменшити кількість втрачених пакетів в маршруті, по порівняно з існуючими рішеннями (протокол маршрутизації B.A.T.M.A.N.);
- розроблений алгоритм генерації негативної нагороди при передачі пакета по втрати з'єднання, який дозволив значно зменшити час перемикання на

ВПУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

альтернативний, більш надійний маршрут в порівнянні з традиційними схемами маршрутизації;

- запропонований метод оцінки ймовірностей переходів «пакет відправлений» і «Пакет видалений» для аналізу продуктивності реальної мережі, що працює за пропонованою схемою маршрутизації.

Практичне значення. Практичне значення роботи полягає в розробленому універсальному протоколі маршрутизації для багатовузлових мереж передачі даних, ефективно працює в мережах з ненадійними бездротовими з'єднаннями, а також в мережах з мінливими топологіями. Розроблений протокол відрізняється високою надійністю передачі пакетів до вузла-одержувача[5], а також механізмом адаптації до змін топології за рахунок зворотного зв'язку, що відрізняє його від існуючих імплементацій інших протоколів для подібних мереж, зокрема - протоколу маршрутизації B.A.T.M.A.N.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на І Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем" і на науковій конференції ВНТУ у 2019 році.

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Аналіз бездротових багато вузлових мереж зв'язку

Бездротові багато вузлові мережі (Wireless Multihop Networks) є узагальненням бездротових тимчасових мереж з великою кількістю проміжних вузлів зв'язку. У підмножина таких мереж входять мобільні мережі ad hoc (Mobile Ad Hoc Networks - MANET), бездротові коміркові мережі (Wireless Mesh Networks-WMN) і бездротові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks - WSN). Всіх їх об'єднує спільна концепція безлічі вузлів-передавачів, що генерують і пересилають пакетний трафік певної інтенсивності. Такі мережі можуть мати вузли-шлюзи (gateway nodes), які відіграють роль моста в зовнішні мережі передачі даних, а також вузли-точки-доступу (у випадку з WMNs), надають можливість стороннім клієнтам отримувати доступ до вузлів бездротової багато вузлової мережі. У таблиці 1.1 представлені основні класи бездротових багато вузлових мереж, з описом їх особливостей в контексті генерується і пересилається трафіку, розміру, топології, області застосування і автономності. Наведені в таблиці 1.1 мережеві протоколи рівня L3 будуть детально описані у другій частині роботи.

Таблиця 1.1- Основні класи бездротових багато вузлових мереж

	Бездротова сенсорна мережа, WSN	Бездротова коміркова мережа, WMN	Мобільна ad hoc мережа, MANET
Інтенсивність трафіку	Низька	Висока	Середня
Швидкість передачі даних	10-100 Кбіт/с	1-300 Мбіт/с	0,1-1 Мбіт/с

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Продовження таблиці 1.1

Розміри мережі	Середня- велика, 100- 1000 вузлів	Середня, 10-100 вузлів	Середня- велика, 100- 1000 вузлів
Топологія	Статична і динамічна	Статична	Динамічна
Степінь автономності	Висока	Низька	Середня
L-3 протокол	LEACH,SPIN, Flooding	AODV,OLSR, B.A.T.M.A.N.	AODV,OLSR, DSR
Сфера застосування	Системи розподіленого моніторингу	Мережа передачі даних, мережа доступу	Мережа моніторингу, мережа передачі повідомлень

Область застосування бездротових багато вузлових мереж дуже широка починаючи від мереж для моніторингу навколишнього середовища, інтернету речей, і закінчуючи мережами швидкого розгортання для військового застосування.

Прикладами мереж MANET (мобільних ad hoc мереж) є розподілені мобільні месенджери (такі як Firechat) [1], в яких передача текстових повідомлень здійснюється безпосередньо між мобільними пристроями (смартфонами), без участі централізованої інфраструктури (базових станцій, Wi-Fi точок доступу, і т.п.). Таким чином, сервіс передачі повідомлень залишається доступним навіть в разі, якщо доступ до зовнішньої мережі відсутній. За схожим принципом працює система мобільного моніторингу Serval Project [2], яка дозволяє користувачам здійснювати дзвінки, відправляти повідомлення, а також здійснювати моніторинг

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

на певної території з різними цілями, такими як контроль за навколишнім середовищем, і так далі. Як у випадку з Firechat, так і у випадку з Serval Project, вся комунікація здійснюється через смартфон користувача, з використанням стандартних бездротових інтерфейсів, таких як Wi-Fi і Bluetooth. При цьому, користувач може бути мобільним, що вносить зміни в поточну топологію, а також постійно змінює маршрути з'єднань в MANET мережі.

Однією з різновидів мереж MANET є мережі VANET (Vehicular Ad hoc Networks) [1], основною функцією яких є передачі повідомлень між рухомими автомобілями та дорожньою інфраструктурою для здійснення доступу в мережу Інтернет, а також реалізації сервісів для безпеки дорожнього руху за допомогою обміну відповідними повідомленнями, і для підтримки руху автономних транспортних засобів (Наприклад, проект Platooning [2]).

До класу бездротових коміркових мереж (Wireless Mesh Networks, WMNs) відносяться бездротові мережі передачі даних, які надають первинний доступ користувачам до зовнішніх мережі (найчастіше, в мережу Інтернет), а також здійснюють маршрутизацію і балансування трафіку користувачів в комірчастій мережі. Як правило, такі мережі, на відміну від перерахованих вище, вже мають певну ієрархію вузлів, які можна розділити на:

• вузли доступу (mesh points) - здійснюють маршрутизацію трафіку, а також надають доступ для кінцевих користувача в коміркову мережу;

• вузли-шлюзи (mesh gateways) - здійснюють маршрутизацію трафіку, і виконують функцію вузла-шлюзу в зовнішній мережі;

• вузли коміркової мережі (mesh nodes) - найпростіші, проміжні вузли коміркової мережі, які виконують тільки функцію маршрутизації і перенаправлення трафіку або в сторону вузлів-доступу, або в сторону вузлів-шлюзів.

Узагальнена схема таких мереж представлена на рисунку 1.1. Як реального і цілком ефективного застосування бездротових коміркових мереж (WMNs) на практиці є проект Freifunk (нім. "Вільне радіо") [4], який надає доступ в інтернет для користувачів за технологією Wi-Fi, без розгортання провідної інфраструктури. В даному проекті, бездротові Wi-Fi роутери об'єднуються в одну бездротову mesh-

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

мережу, яка покриває цілі райони таких міст як Гамбург і Берлін, з більш ніж 300 вузлів. Маршрутизація призначеного для користувача трафіку тут здійснюється за допомогою бездротових протоколів маршрутизації OLSR і B.A.T.M.A.N [5, 6].

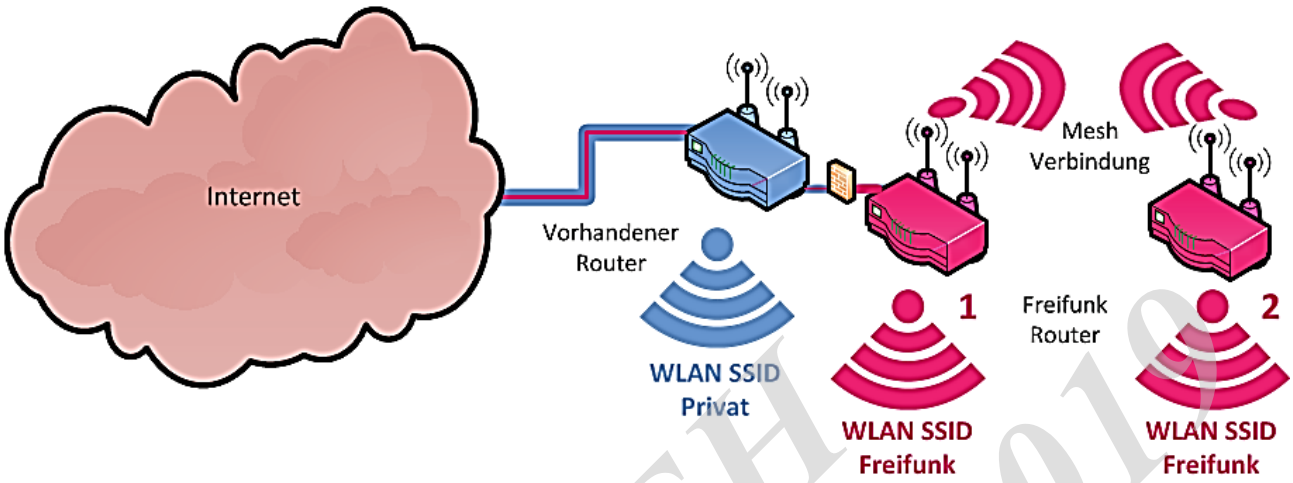


Рисунок 1.1 - Архітектура бездротової комірчастої мережі на прикладі проекту Freifunk [4]

Таким чином, бездротові багатовузлові мережі є вкрай затребуваною сферою телекомунікацій з безліччю різних ніш для застосування. Крім того, зі стрімким розвитком концепції інтернету речей, а також постійним зростанням числа бездротових пристроїв і швидкостей передачі даних, завдання пошуку ефективного алгоритму маршрутизації і розподілу потоків трафіку в таких мережах буде ставати все більш актуальною. У зв'язку з цим, все гостріше постає ряд проблем бездротових багатовузлових мереж, які будуть описані в наступному розділі, і докладний аналіз яких буде дано в відповідному розділі другій частині роботи.

1.1.1 Проблеми продуктивності бездротових багатовузлових мереж передачі даних

Продуктивність бездротових багатовузлових мереж, як згадувалося вище, залежить від багатьох факторів, але основні проблеми виникають на перших трьох рівнях моделі OSI. У таблиці 1.2 представлена п'ятирівнева схема моделі OSI з протоколами і стандартами, що використовуються на відповідних рівнях таких мереж.

ВНТУ ФРЕН ТКСТБ МКР 2019

Таблиця 1.2 - П'ятирівнева модель OSI для багатовузлових мереж передачі даних

Номер рівня моделі OSI	Назва рівня	Протоколи/ стандарти що використовуються
1	Фізичний	Фізичне середовище передачі- проводова/безпроводова
2	Канальний(ланки даних)	Стандарти MAC- доступна IEEE 802.3, 802.11, 802.15.1, 802.15.4
3	Мережевий	IPv4, IPv6, адресація,Zigbee, 6LowPAN
4	Транспортний	UDP,TCP
5	Прикладний (рівень додатку)	Додаток, генеруючий мережевий трафік

ВНТУ ФІРЕН ТКСТЬ МКР 2019

Розглянемо проблеми продуктивності в бездротових багатовузлових мережах, що виникають на різних рівнях моделі OSI:

• 1 рівень (фізичний):

На фізичному рівні на продуктивність бездротових мереж впливають фактори, пов'язані з характеристиками поширення електромагнітного сигналу в бездротовому середовищі передачі, а саме: рівень загасання, наявність відбитків сигналу від перешкод, інтерференція, а також рівень електромагнітного шуму в середовищі - як широкосмугового, так і вузькосмугового.

Перш за все, це впливає на ймовірність коректного прийому і декодування інформації, що передається, що, в свою чергу, впливає на поведінку протоколів 2-

го рівня, які повинні забезпечувати надійність передачі інформації на рівні прямого каналу (ланки даних). В кінцевому підсумку, негативні умови для бездротової передачі сигналу збільшують час доставки фреймів (кадрів) з даними від одного вузла до іншого, так як механізм ARQ другого рівня вносить затримку на повторну передачу кадрів.

• 2 рівень (канальний):

Канальний рівень, крім його основної функції - надійної доставки інформації по лінку / каналу, в бездротових мережах реалізує механізм контролю множинного доступу в середовище (MAC), який здійснює контроль за доступом безлічі пристроїв до загального радіо-ресурсу в частотному, тимчасовому і просторових діапазонах. Очевидно, що чим більше пристроїв конкурують за доступ до спільного радіо-ресурсу, тим більше час очікування доступу. Відповідно, час передачі кадру до одержувача прямо пропорційно кількості одночасно конкуруючих абонентських пристроїв. Крім того, підвищене число бездротових пристроїв збільшує ймовірність інтерференції, що, в свою чергу, збільшує час доставки інформації через процедури повторної передачі кадру в механізмі ARQ.

Як правило, саме на другому рівні також відбувається шифрування даних перед відправкою, що покликане вирішувати проблему безпеки передачі даних за відкритими бездротових каналах. Наприклад, алгоритми шифрування WEP, WPA, WPA2, повсюдно застосовуються в стандарті IEEE 802.11 Wi-Fi [3].

• 3 рівень (мережевий):

На мережевому рівні проявляється ключова функція бездротових багатовузлових мереж передачі даних, а саме - пересилання пакетів даних від вузла-джерела до вузла-одержувача через проміжні вузли, використовуючи безліч можливих маршрутів. Тому, питання знаходження оптимального маршруту для передачі пакетів є основним, так як він безпосередньо впливає на всі інші показники продуктивності мережі, які можуть бути виражені в середній пропускної здатності мережі, затримки і відсоток втрат пакетів.

Традиційно, в таких мережах, головною метрикою оптимальності того чи іншого маршруту є кількість проміжних вузлів (Hop Count) в маршруті, що є

ВПУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

найбільш очевидним рішенням, тому що чим більше кількість проміжних вузлів, тим вище ймовірність втрати пакетів, а також вище загальна затримка в маршруті. Дана метрика досі є основною у багатьох сучасних протоколах маршрутизації в бездротових мережах, наприклад, OLSR, HWMP [5] і B.A.T.M.A.N. Однак, варто зазначити, що через особливостей саме бездротової середовища передачі, найменше число проміжних вузлів не завжди є оптимальним, так як часто на бездротову мережу впливають фізичні фактори середовища (такі як інтерференція і рівень сигнал / шум), які не відображаються безпосередньо даної метрикою. Тому, для протоколів маршрутизації варто враховувати ці чинники.

Інша проблема саме мережевого рівня криється в алгоритмах знаходження маршрутів в мережі. Більшість протоколів маршрутизації в бездротових багатовузлових мережах покладаються на реактивні і проактивні схеми пошуку маршрутів, детально описані у відповідному розділі другої частини роботи, в яких рішення по відправці пакета приймається з великим запізненням, за час якого сама топологія мережі може різко змінитися. Така поведінка призводить до великих втрат пакетів, як наприклад у випадку з протоколами AODV і DSDV [3]. Крім того, наявні рішення даної проблеми, а саме - зменшення інтервалу оновлення маршрутних таблиць (в проактивних схемах маршрутизації) призводить до збільшення числа широкомовних пакетів в мережі, що значно погіршує їх продуктивність [4].

Ще одним важливим фактором, що впливає на продуктивність багатовузлової мережі, є проблема так званого масштабування, тобто збільшення кількості вузлів в мережі, а також розміру і відповідної складності мережевої топології. Протоколи маршрутизації, що використовуються наразі, мають обмежену масштабованість, особливо в разі використання проактивної схеми пошуку маршрутів, в яких кількість широкомовних повідомлень (інформації з маршрутних таблиць) з ростом числа вузлів зростає за експоненціальним законом.

• 4 рівень (транспортний):

Транспортний рівень, відповідно до моделі OSI, відповідальний за логічну доставку даних через кінця-в-кінець (end-to-end), що має на увазі наявність або

ВПУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

відсутність відповідних механізмів для надійної і цілісної доставки даних. Такі транспортні протоколи, як TCP, SCTP і UDT [3,4,5] мають на увазі надійну передачу даних по шляху, в той час як протокол UDP [3] націлений лише на одноразову посилку пакетів без вбудованої логіки їх повторної передачі.

В контексті бездротових багатовузлових мереж, що пролягають нижче протоколи мережевого рівня повинні забезпечувати мінімальні показники втрат пакетів і максимальну пропускну здатність, для ефективного функціонування транспортних протоколів і верхніх додатків. Особливо це актуально для транспортних протоколів, які здійснюють гарантовану доставку даних - наприклад, TCP, який має вкрай низьку продуктивність в умовах високих показників затримки (~ 300 мілісекунд) і відсотка втрат пакетів (~ 2%), як показано в дослідженні [3].

• 5 рівень (рівень додатки):

Рівень додатки, перш за все, визначає тип і форму (Інтенсивність) пакетного трафіку, який буде передаватися по бездротовій багатовузловій мережі. Наприклад, додатки в бездротових сенсорних мережах (WSNs) зазвичай генерують трафік "вибухового" типу (burst traffic profile) [33], який має на увазі короткочасні моменти високої мережевого навантаження в напрямку вузла-шлюзу. З іншого боку, бездротові ніздрюваті мережі (WMNs) генерують трафік типу ON-OFF [6], який має двонаправлений характер (спрямований як в сторону вузла-шлюзу, так і у зворотний бік – до абонентського пристрою).

Відповідно, протоколи маршрутизації повинні враховувати форму вхідного трафіку і мати ефективні механізми для його балансування. На поточний момент, розроблено велику кількість алгоритмів маршрутизації (Особливо для бездротових сенсорних мереж), які враховують різноманітні нюанси роботи даної мережі і оптимізовані під конкретний трафік. Однак, в загальному випадку, і при наявності декількох патернів трафіку в однієї мережі, існуючі протоколи маршрутизації працюють неефективно.

Одним із завдань даної роботи є розробка узагальненого алгоритму маршрутизації, а саме, алгоритму прийняття рішення про відправку пакета, в залежності від вище визначеного трафіку, топології, числа вузлів, а також фізичних

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

умов для передачі. Для вирішення даної завдання буде використаний математичний апарат з області теорії машинного навчання [7], а саме - теорії навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) [8].

1.2 Теорія машинного навчання, навчання з підкріпленням

Теорія машинного навчання (Machine Learning) є областю комп'ютерних наук, де обчислювальні пристрої володіють можливістю навчатися без необхідності бути явно запрограмованими [9]. Іншими словами, теорія машинного навчання ставить перед собою мету знаходити і розробляти математичні моделі, які дозволяють комп'ютерам самостійно виробляти алгоритми для вирішення тієї чи іншої обчислювальної задачі. Наприклад, в якості популярних задач машинного навчання на сьогоднішній день можна виділити оптичне розпізнавання рукописного тексту, розпізнавання голосу, алгоритми фільтрації спам-повідомлень, алгоритми web-пошуку, обробка великих масивів даних (data mining) і так далі [10]. Існує безліч підрозділів теорії машинного навчання, спираються на ті чи інші моделі, і вирішують завдання певної специфіки, наприклад, нейронні мережі, метод опорних векторів, генетичні алгоритми, навчання з підкріпленням [8] і т.д.

У даній роботі, як основний математичної моделі, буде взято алгоритми з підрозділу навчання з підкріпленням теорії машинного навчання. Навчання з підкріпленням вводить поняття агента, середовища та нагороди (agent, environment і reward, відповідно), які описують процес оптимізації певного завдання. На малюнку 4 зображено узагальнений процес роботи механізму навчання з підкріпленням, де агент має якийсь набір дій A, з допомогою яких він взаємодіє із середовищем.

Виконуючи якусь дію A, агент отримує нагороду від середовища, і, відштовхуючись від величини отриманої нагороди, формує певне уявлення про оптимальність зробленого вибору. Для спрощення розуміння механізму навчання з підкріпленням, Річард Саттон (Richard Sutton) - один із співавторів даної теорії,

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

вдавався до класичного прикладу N-рукого бандита (N-armed bandit task), в якій гравець (Агент) в казино має перед собою ігровий автомат з N важелями (середовищем з N діями), і, вибираючи певний важіль, гравець отримував X монет (нагороду). Відповідно, в даному випадку, завданням гравця є отримання максимальної кількості монет за мінімальне число дій в умовах відсутність первинних відомостей про "ціну" кожного важеля, що є класичної завданням теорії навчання з підкріпленням. На рисунку 1.2 зображено узагальнений механізм роботи навчання з підкріпленням

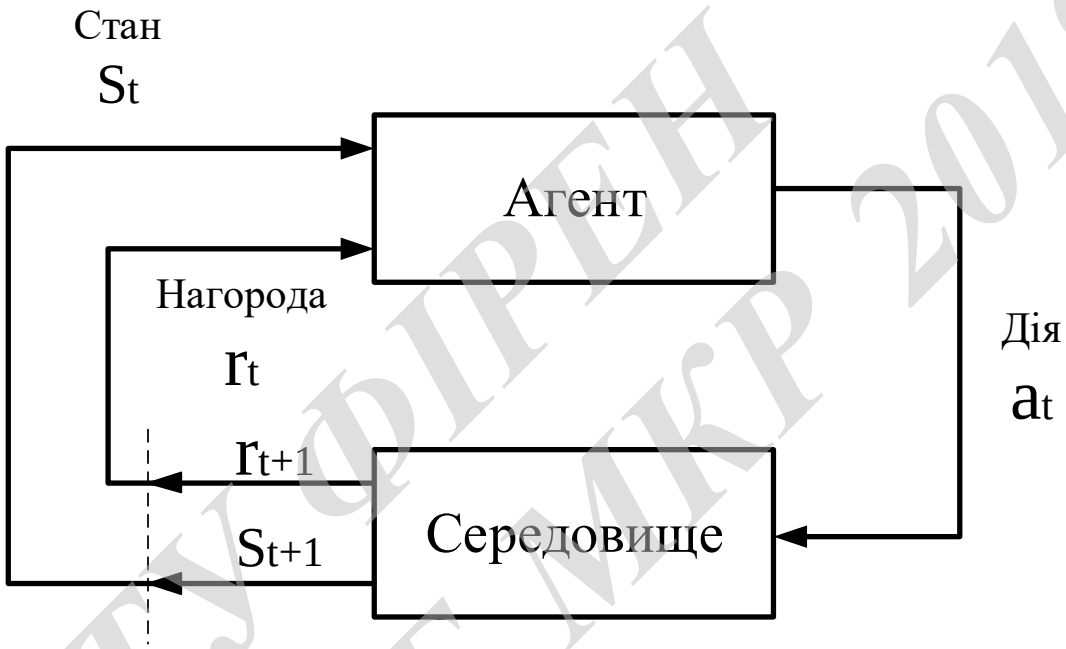


Рисунок 1.2 - Узагальнений механізм роботи навчання з підкріпленням

З математичної точки зору, така модель добре описується в рамках марковської моделі прийняття рішення (Markov Decision Process - MDP) [18], Рис. 5, яка визначає 4 основних безлічі {S, A, P, R},

де: S - безліч станів, в яких агент може знаходитися в даний момент часу;

A - безліч дій, які може виконати агент в даний момент часу;

P - безліч можливостей, що, перебуваючи в стані S, агент, виконавши дію A, перейде в стан S 'за час t + 1;

R - безліч нагород, отриманих за перехід зі стану S в стан S '.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Рисунок 1.3 зображує приклад марковського ланцюга прийняття рішення (MDP) з трьома станами і двома діями.

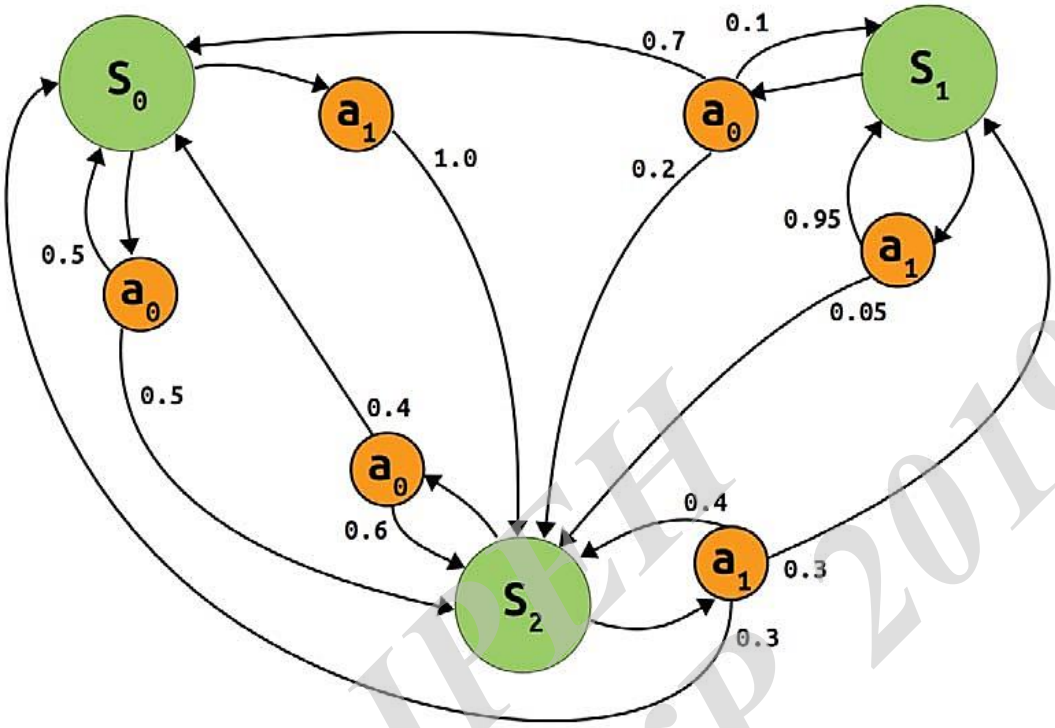


Рисунок 1.3 - Приклад марковського ланцюга прийняття рішення (MDP) з трьома станами і двома діями

В рамках теорії навчання з підкріпленням, безлічі S і P часто інтерпретуються як єдине безліч розрахункових значень (estimation values) Q, яке залежить від величини одержуваної нагороди, а також від стану (Кроку t), в якій відбувалося дана дія. Таким чином, механізм оптимізації дій в поставленому завданню можна виразити через наступну формулу [11]:

$$Q_{k+1} = Q_k + \alpha \cdot [r_{k+1} - Q_k] \ , \qquad (1.1)$$

де: Q_k- значення розрахункової величини нагороди Q на попередньому кроці;

Q_{k+1}- значення розрахункової величини нагороди Q на поточному кроці;

r_{k+1}- значення отриманої нагороди;

α - параметр кроку;

k - поточний крок.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТЬ МКР 2019

На рисунку 5 показані ймовірності переходів в одне з трьох станів {s0, s1, s2}, при виконанні одного з двох дій {a0, a1}. Таким чином, з вищеописаної моделі можна виділити дві основні завдання навчання з підкріпленням:

1) як оновлювати безліч розрахункових значень Q після отримання нагороди?

Найпростіший спосіб - оновлювати і зберігати середнє значення одержуваних нагород від дії A (так званий, метод Sample Average) [12].

2) яким чином, маючи безлічі P і S, вибирати дію з безлічі A? Найбільш часто зустрічаються способи - це вибір дії з максимальним значенням нагороди (greedy метод), а також - e-greedy метод, softmax метод і інші [13].

На цих двох завданнях грунтуються всі існуючі алгоритми навчання з підкріпленням, які включають в себе алгоритми поновлення ймовірностей дії, а також алгоритми вибору дії, в залежності від поставленої прикладної задачі.

У другій частині роботи буде дано докладний опис алгоритмів вибору дії, розрахунку проміжних значень ймовірностей вибору дії, коефіцієнта кроку, а також представлені формули розрахунку цих значень в контексті завдання маршрутизації в бездротової багатовузлової мережі передачі даних.

1.3 Аналіз алгоритмів маршрутизації в бездротових багатовузлових мережах передачі даних

1.3.1 Основні схеми маршрутизації

Протоколи маршрутизації в бездротових багатовузлових мережах передачі даних, в основному, ставлять перед собою завдання мінімізувати такі характеристики з'єднань в мережі, як середня затримка, відсоток службових повідомлень (мережева надмірність), відсоток втрат пакетів, інтенсивність споживання енергії (особливо актуально для бездротових сенсорних мереж), а також максимізувати середню пропускну здатність маршруту в мережі.

Зазвичай, такий клас протоколів маршрутизації прийнято розділяти на три великих підкласу, що використовують той чи інший алгоритм пошуку і вибору

ВПУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019

маршруту, а саме - реактивні, проактивні і гібридні протоколи. Нижче наведено докладний опис кожного з підкласів даних протоколів маршрутизації.

• реактивні протоколи маршрутизації (протоколи за запитом - ondemand):

Дані протоколи використовують, так званий, реактивний метод маршрутизації, який означає, що вузол-джерело заздалегідь, на момент передачі пакета, не має інформації про маршрут до вузла-одержувача. Таблиця маршрутизації оновлюється тільки при безпосередній необхідності в передачі пакета до певного вузла-одержувача. Іншими словами, процес пошуку маршруту ініціалізується тільки за фактом необхідності в передачі даних, тим самим, витрачаючи енергію і обчислювальні ресурси тільки в моменти активності трафіку, що призводить до значної економії цих ресурсів, так як відпадає необхідність в постійному оновленні таблиці маршрутів і моніторингу поточної топології мережі.

Такий підхід дозволяє економити обчислювальні, енергетичні та бездротові ресурси мережі, що є вирішальним фактором при їх застосуванні в бездротових сенсорних мережах передачі повідомлень, які, найчастіше, мають статичну топологію, а також мають необхідність в довгій автономної роботи в складних умовах бездротової середовища передачі з наявністю інтерференції і відносно малим рівнем сигнал / шум.

Зазвичай, під час процедури пошуку маршруту, вузол-джерело широкомовно посилає в мережу спеціальне службове повідомлення, зване запит маршруту (Route Request - RREQ), яке містить інформацію про мережевому адресу вузла-джерела і вузла-одержувача. потім, проміжні вузли мережі приймають дане повідомлення і пересилають його далі в мережу, поки RREQ не дійде до вузла-одержувача. Після прийому RREQ повідомлення, вузол-одержувач відправляє нове службове повідомлення в сторону вузла-джерела, яке містить маршрут у зворотний бік - від одержувача до джерела. Таке повідомлення називається відповідь на маршрут (Route Reply - RREP). Після того, як вузол-джерело отримує RREP повідомлення, процедура пошуку маршруту закінчується, результатом якої є оновлення даних про маршрут від вузла-джерела до вузла-одержувача і назад, яке відбулося в кінцевих, а також у всіх проміжних вузлах мережі.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Таким чином, можна зробити висновок, що в реактивних протоколах маршрутизації особливу роль відіграє механізм пошуку маршрутів, який ініціалізується кожен раз при необхідності в передачі пакетів даних, який повинен бути максимально швидким і енергоефективним. Крім того, важливим фактором є механізм оновлення застарілих маршрутів в процесі довгого функціонування мережі, так як дані протоколи не мають механізмів для періодичного моніторингу зміни топології і інтенсивності трафіку в поточному стані бездротової багатовузлової мережі.

Найбільш відомі протоколи, що використовують реактивну схему маршрутизації: AODV, DSR [13, 14]. Рисунок 1.4 зображує приклад реактивної схеми маршрутизації.

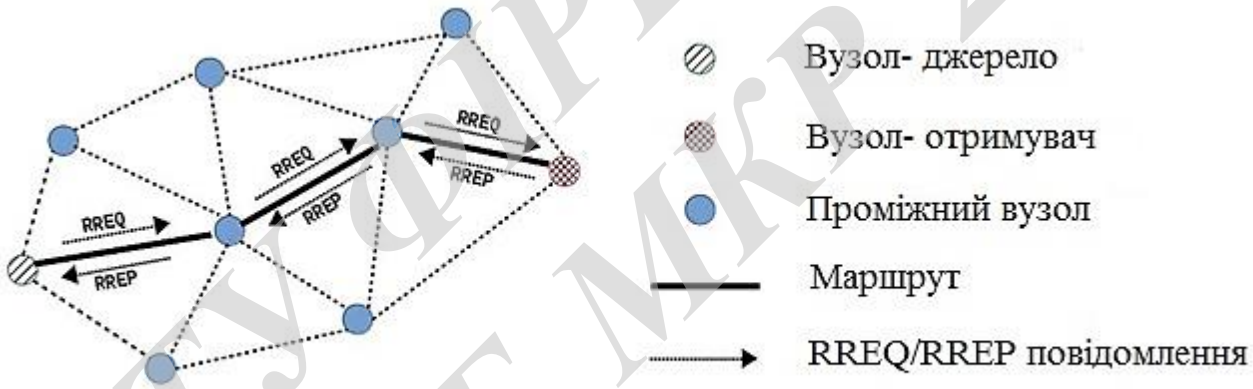


Рисунок 1.4 - Приклад реактивної схеми маршрутизації

• проактивні протоколи маршрутизації:

Існує другий великий підклас протоколів маршрутизації в бездротових багатовузлових мережах передачі даних, який спирається на інший підхід в схемі встановлення маршрутів в мережі, а саме, використовує принцип глобальної маршрутної таблиці, який означає, що кожен вузол в мережі Рисунок 1.6 - Приклад реактивної схеми маршрутизації має повну інформацію про всю топології мережі, що включає в себе знання про кількості вузлів, ланок, їх місце розташування, а також інформацію про "вагах" тих чи інших ланок мережі. Така глобальна таблиця

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

маршрутизації генерується кожним вузлом в мережі окремо, і доповнюється за рахунок періодичного мовлення маршрутної інформації кожним вузлом. За рахунок такого механізму, з часом, кожен вузол в мережі отримує повні відомості про глобальну таблиці маршрутизації від своїх сусідів. При такій схемі маршрутизації, відпадає необхідність в імплементації процедури пошуку маршруту, так як кожен вузол мережі може самостійно обчислити будь-який маршрут до будь-якого адреса- одержувача в мережі, використовуючи класичні алгоритми теорії графів, такі як алгоритм Дейкстри [40], Беллмана-Форда [15] і т.п.

Проактивна схема маршрутизації має перевагу перед реактивної схемою в контексті загальної затримки пакету в маршруті, так як проактивний підхід не має на увазі витрата часу на процедуру пошуку маршруту і, крім того, за рахунок глобального періодичного поновлення маршрутної інформації, має завжди актуальну інформацію про поточну топології мережі, що є великим плюсом у випадках, коли багатовузловий мережу є дуже мобільною (Наприклад, автомобільні ad hoc мережі VANET [16]). Як наведено на рисунок 1.5 приклад проактивної схеми маршрутизації.

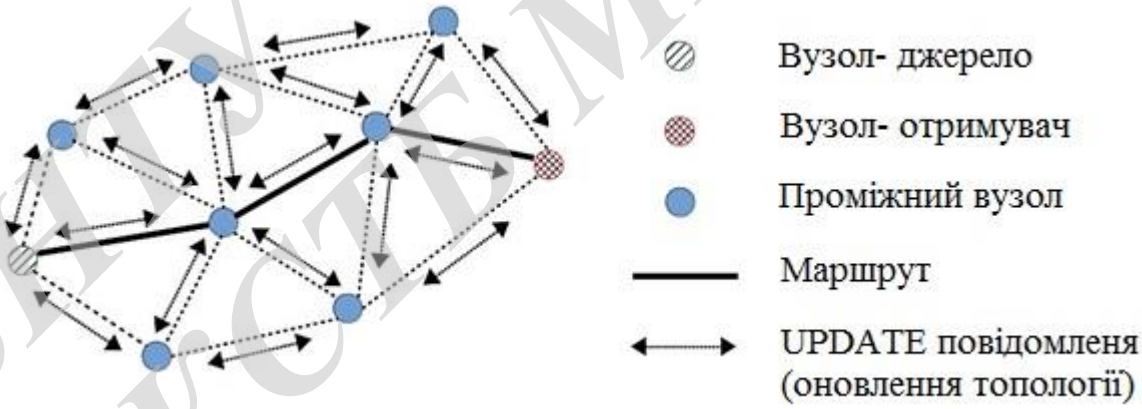


Рисунок 1.5 - Приклад проактивної схеми маршрутизації

Однак, дана схема маршрутизації має ряд істотних недоліків, через які протоколи, засновані на ній, не отримали широкого поширення на практиці. В першу чергу, періодичне мовлення повідомлень з оновленнями маршрутів означає підвищене енергоспоживання всіх вузлів мережі, що є неприйнятним, наприклад,

ВНЗУ ФІРЕН ТКСТБМКР 2019

для автономних сенсорних мереж, особливо в разі бездротової багатовузлової мережі зі статичної топологією. По-друге, принцип періодичної відправки сервісні повідомлення дуже погано масштабується. Це означає, що при збільшення розміру мережі, тобто, при зростанні числа вузлів в мережі і відповідних зв'язків між ними, кількість службових повідомлень, періодично відправляються в мережу, зростає експоненціально, що значно погіршує всі основні показники продуктивності мережі, і в першу чергу, середню пропускну здатність маршруту.

Таким чином, можна зробити висновок, що протоколи маршрутизації з проактивного схемою встановлення маршруту менш пристосовані для застосування в мережах з критично важливими показниками автономної роботи (тобто мережі WSN), однак, у випадках коли мережа має динамічну топологію, а також де фактор автономної роботи не є критичним (наприклад, мережі WMN), вони знаходять широке застосування. Наприклад, протоколи маршрутизації OLSR і B.A.T.M.A.N., на сьогоднішній день, є основними протоколами маршрутизації даних в бездротових ніздрюватих мережах.

• гібридні протоколи маршрутизації:

Гібридні протоколи, виходячи з назви, використовують обидві вищеописані схеми маршрутизації. Наприклад, протокол HWMP, який є гібридним протоколом маршрутизації для пористих мереж в стандарті IEEE 802.11s [17], спочатку працює в реактивному режимі маршрутизації, але, в Якщо показник якості маршруту падає нижче певного порогу, то протокол автоматично перемикається на менш енергоефективний, але більш продуктивний проактивний режим роботи. У протоколі HWMP, даними показником якості маршруту є метрика Airtime Link Metric (метрика затримки пакета на лінк - ланці маршруту) [18], яка показує середнє час доставки фрейму з даними за прямим лінком між двома бездротовими вузлами.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

1.3.2 Порівняння існуючих протоколів маршрутизації, які використовуються в бездротових багатовузлових мережах

В даному розділі будуть розглянуті чотири основних протоколу маршрутизації в бездротових багатовузлових мережах: AODV (Ad Hoc On-demand Distance Vector), DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector), OSLR (Optimized Link-State Routing) і DSR (Dynamic Source Routing) [18,19,20].

Через величезної кількості варіацій протоколів маршрутизації для багатовузлових бездротових мереж передачі даних існуючих на даний момент, завдання дослідження та порівняння продуктивності кожного з них стає нетривіальною. Однак, беручи до уваги той факт, що переважна більшість таких протоколів засновані на трьох вищеописаних схемах маршрутизації (реактивної, проактивного і гібридної), кількість досліджуваних протоколів було скорочено до перерахованих вище чотирьох, так як саме дані протоколи відображають основні концепції маршрутизації в бездротових багатовузлових мережах, а також широко використовуються на практиці та в реальних проектах таких мереж. У таблиці 1.3 представлені узагальнені дані про основні характеристиках обраних протоколів.

Таблиця 1.3 - Основні характеристики обраних протоколів

Протокол	AODV	DSDV	OLSR	DSR
Схема маршрутизації	Реактивна	Проактивна	Проактивна	Реактивна
Місце зберігання мережевої топології	Маршрутна таблиця	Маршрутна таблиця	Маршрутна таблиця	Кеш маршрутів
Підтримка альтернативних маршрутів	Ні	Ні	Ні	Так

ВНТУ-ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Продовження таблиці 1.3

Метрика оптимальності маршруту	Hop Count	Hop Count	Hop Count	Hop Count
Алгоритм пошуку маршруту	Distance-Vector	Distance-Vector	Link-State	Маршрутизація від джерела (Source Routing)
Підтримка асиметричних з’єднань	Ні	Ні	Так	Так

1.4 Реактивні протоколи маршрутизації

1.4.1 AODV протокол

AODV (Ad-Hoc On-demand Distance Vector) протокол використовується в мережах MANET. Він здатний встановлювати і підтримувати в актуальному стані з'єднання як типу точка-точка (unicast), так і з'єднання типу точка- многоточка (multicast).

Як і будь-який інший протокол, який використовує реактивну схему маршрутизації, AODV не збирає глобальну інформацію про топології мережі, а тільки знаходить маршрути від даного вузла-джерела до вузла-одержувача, для яких існує необхідність в передачі даних в поточний момент часу. Для того, щоб успішно виконати функцію маршрутизації трафіку, AODV протокол спирається на процедуру пошуку і підтримки маршруту в актуальному стані. Для цього, протокол використовує 3 види службових повідомлень: RREQ (запит маршруту, route request), RREP (відповідь на запит маршруту, route reply) і RERR (помилка маршруту, route error). В результаті обміну цими повідомленнями, кожен вузол

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

вибудовує власну "картину" мережі, а саме, ту частину глобальної таблиці маршрутів, яка необхідна тільки для маршрутизації трафіку на даний момент часу.

Таблиця маршрутизації на кожному вузлі мережі має наступний вигляд: <Адреса одержувача> <Адреса наступного вузла> <Порядковий номер одержувача (DSN)> <Час життя маршруту>. Важливо відзначити, що AODV протокол зберігає тільки актуальну інформацію про маршрути, яка відображається в відповідному полі <Час життя маршруту>, яке вимірюється в секундах. Якщо дане значення перевищує певний поріг - відповідний маршрут видаляється з таблиці, і, в разі якщо необхідно знову передати дані по ньому, инициализируется нова процедура пошуку маршруту.

Далі, буде приведено опис процедур пошуку і підтримки маршруту в актуальному і робочому стані.

А. Процедура пошуку маршруту

Процедура пошуку маршруту в мережі по заданому адресою вузла-одержувача инициализируется в разі, якщо вузол-джерело не має інформації про даний маршруті, або дана інформація не є актуальною на поточний момент часу. Процедура пошуку маршруту складається з чотирьох основних фаз:

• вузол-джерело генерує службове повідомлення RREQ (запит маршруту), що містить адресу вузла-одержувача, і широкомовно відправляє його своїм прямим вузлів-сусідам;

• проміжні вузли мережі (або вузли-сусіди) приймають RREQ і перевіряють свою таблицю маршрутів на факт наявності актуального маршруту до вказаної адреси вузла-одержувача. Якщо маршрут відсутній – RREQ пересилається далі в мережу, якщо маршрут присутній і він актуальний – перехід на наступну фазу;

• коли вузол-одержувач, або будь-який інший проміжний вузол з актуальним маршрутом до вузла-одержувача, приймає RREQ, то він генерує відповідне службове повідомлення RREP (відповідь на запит маршруту), і відправляє його назад по найкоротшому шляху. При цьому, всі проміжні вузли, які переказують RREP назад до вузла-джерела, оновлюють відповідний маршрут в своїх таблицях маршрутів;

ВПУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

• вузол-джерело приймає RREP повідомлення, оновлює таблицю маршрутів, і починає передачу пакетів з даними до вузла-одержувача. В разі, якщо вузол-джерело не змогло прийняти RREP повідомлення за певні таймаут, всі пакети з даними, що зберігаються в буфері на передачу, видаляються, а процедура пошуку маршруту починається спочатку;

• додатково, спеціальне RREP-ACK (повідомлення-підтвердження) може бути відправлено вузлу-одержувачу, в разі, якщо в настройках AODV протоколу включена відповідна опція. На рисунку 1.6 зображено процедуру пошуку маршруту в протоколі AODV

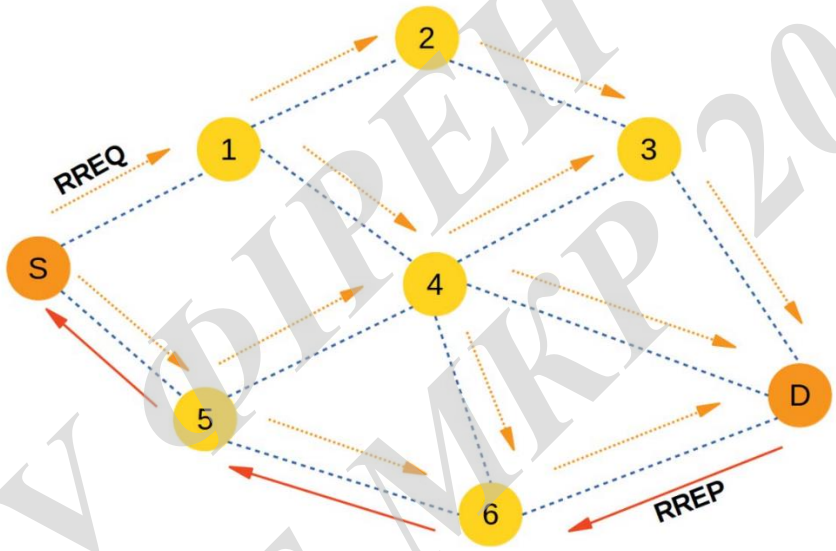


Рисунок 1.6 - Процедура пошуку маршруту в протоколі AODV

Б. Фаза підтримки маршруту

Фаза підтримки маршруту настає після успішного завершення процедури пошуку маршруту, і є важливим елементом функціональності в реактивних протоколах маршрутизації, так як бездротова сенсорна мережа часто піддається змінам топології через ненадійну бездротової середовища передачі, а також в разі мобільності вузлів бездротової сенсорної мережі. Фаза підтримки маршруту працює за наступною схемою.

По-перше, мобільність вузлів і ненадійна середовище передачі впливають на встановлений маршрут пакетів тільки в тому випадку, якщо вузли мережі є безпосередніми учасниками передачі пакетів по маршруту. Іншими словами, на

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

встановлений маршрут впливають тільки ті вузли мережі, які є складовою частиною даного маршруту. Решта вузли мережі, безпосередньо не беруть участь в процесі передачі пакетів даних по маршруту, називаються пасивними і не можуть ініціювати дії, що ведуть до перебудові маршруту. Вузли, які є складовою частиною маршруту, можна розділити на три види - вузол-джерело, вузол-одержувач, а також всі проміжні вузли що знаходяться між ними. Відповідно, маршрут може зазнати змін тільки в даних вузлах. Залежно від того, в якому саме вигляді вузла (джерело, одержувач або проміжний вузол) відбулося зміна маршруту, протокол AODV реагує відповідним чином.

Якщо вузол-джерело маршруту змінив своє місце розташування, він ініціює процедуру пошуку маршруту заново, яка, в процесі свого поширення по мережі, оновлює таблиці маршрутів на всіх проміжних вузлах нового шляху, включаючи вузол-одержувач. У разі, якщо встановлений маршрут змінив будь-який проміжний вузол або вузол-одержувач, то він генерує і відправляє спеціальне службове повідомлення помилка маршруту (Route Error - RERR) назад в сторону вузла-одержувача. У міру проходження RERR повідомлення до одержувача, все проміжні вузли оновлюють таблиці маршрутів, позначаючи поточний маршрут як неактивний. В кінцевому підсумку, вузол- одержувач, прийнявши RERR повідомлення, ініціює нову процедуру пошуку маршруту.

Таким чином, протокол AODV, в теорії, повинен показувати хороші результати продуктивності в бездротових багатовузлових мережах передачі даних, особливо з динамічної топологією. Протокол має невелику надмірність, яка визначається інтенсивністю обміну службовими повідомленнями, а також завжди оптимізує маршрути по метриці найкоротшого шляху. Так як AODV є чисто реактивним протоколом маршрутизації, в мережах з високо динамічною топологією, кількість службових повідомлень залишається мінімальним, що позитивним чином позначається на показниках пропускної здатності маршрутів в мережі.

Однак, на практиці, на сьогоднішній день, протокол AODV є застарілим і не має актуальною програмної імплементації. Крім того, за результатами проведених

ВНТУ ФІРЕН ТКСТВ МКР 2019

мережевих симуляцій [20], AODV показав найгірший результат в мережі зі статичної топологією за двома основними показниками продуктивності - пропускної здатності і відсотку втрат пакетів в маршруті, в порівнянні з протоколами DSR, DSDV і OLSR [21]. Основна причина низької продуктивності протоколу AODV на практиці і в симуляційні моделюванні полягає у відсутності алгоритму балансування пошуку маршрутів в разі перевантаження мережі, в результаті якої, AODV генерує велику кількість RREQ широкомовних повідомлень, які займають смугу пропускання і, в кінцевому підсумку, призводять до видалення пакетів даних з мережевого буфера через його переповнення.

1.4.2 DSR протокол

Протокол маршрутизації Dynamic Source Routing (DSR) також є реактивним протоколом маршрутизації, проте не використовує традиційні таблиці маршрутів для вибору шляхів для пакетів даних. Замість цього, протокол спирається на парадигму маршрутизації від джерела (Source Routing), яка означає, що кожен пакет з даними містить в службовому полі DSR повну інформацію про свій маршрут. Таким чином, для успішної маршрутизації пакетів, вузли мережі DSR не створюють і не підтримують таблиці маршрутів, а використовують тільки кеш з маршрутів, що містяться в пакетах даних. Виходячи з цього, протокол DSR володіє трохи більшою надмірністю по порівняно з іншими протоколами маршрутизації (AODV, OLSR) через необхідності включення службового поля в кожен пакет з даними, однак, кількість додаткових службових повідомлень через це зводиться до мінімуму. На рисунку 1.7 зображено процедуру запиту маршруту в протоколі DSR

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

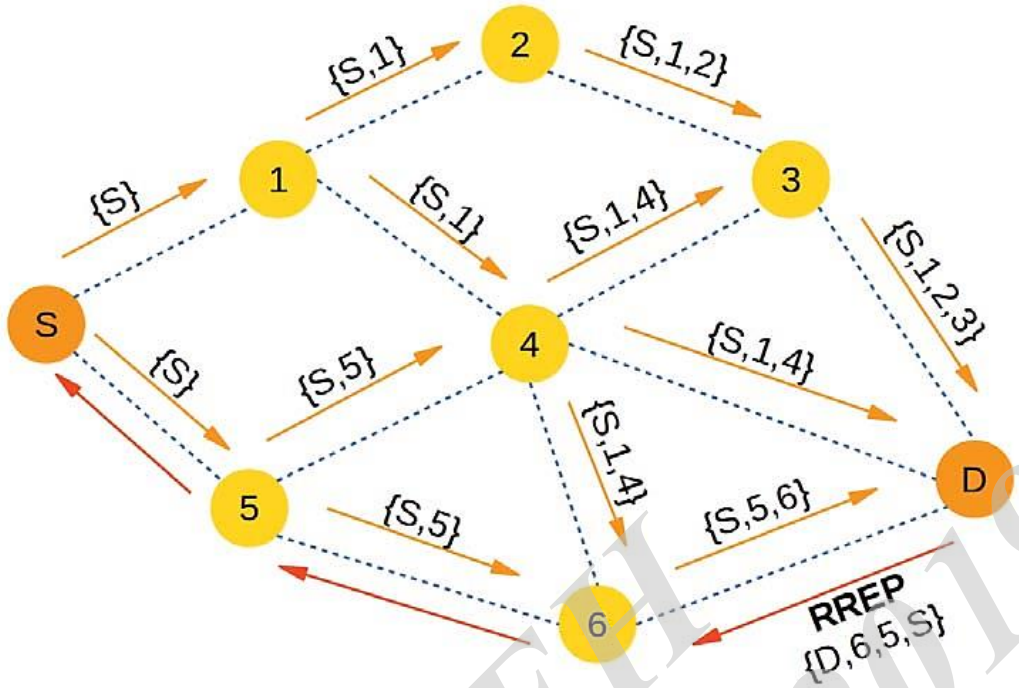


Рисунок 1.7 - Процедура запиту маршруту в протоколі DSR

Як проілюстровано на рисунку 1.7, якщо вузол S має необхідність доставити пакет даних до вузла D, то вузол S спочатку здійснює пошук актуального маршруту до вузла D в своєму локальному кеші маршрутів. В разі, якщо маршрут не знайдений в локальному кеші, то вузол S ініціює процедуру пошуку маршруту, аналогічну протоколу AODV, тобто, відправляє широкомовний повідомлення запит маршруту (Route Request) в сторону вузла- одержувача. При цьому, всі проміжні вузли, які отримали RREQ повідомлення динамічно додають свою адресу в загальний маршрут, і відправляють повідомлення далі. Вузол D, отримавши повідомлення RREQ, виконує ідентичну процедуру, тільки в сторону вузла S. Таким чином, після обміну повідомленнями RREQ / RREP, всі вузли, які беруть участь в побудові маршруту, мають актуальну інформацію про маршрут. Так як вузол-одержувач, на відміну від протоколу AODV, посилає RREP повідомлення ідентичним чином, як і повідомлення RREQ, то це дозволяє будувати різні маршрути від вузла-джерела до вузла-одержувача і назад, що особливо ефективно, якщо в бездротової багатовузловий мережі існує проблема несиметричних лінків.

ВНТУ ФІРЕНТ ТКСТБ МКР 2019

В процесі передачі пакетів даних по маршруту, кожен пакет містить повну інформацію про шляхи. У разі, якщо якийсь з вузлів не зміг доставити пакет даних до наступного вузла по маршруту, то він генерує і посилає повідомлення про помилку маршруту (Route Error) в сторону вузла-відправника, позначає поточний маршрут як "зламаний" в своєму локальному кеші маршрутів, і намагається використовувати альтернативний маршрут зі свого кеша. якщо
альтернативний маршрут не знайдений, то запускається повторна процедура пошуку маршруту, як описано вище. Крім того, протокол DSR, для збільшення ефективності оновлення кешу маршрутів, має можливість прослуховування (Overhearing) маршрутів у всіх пакетах даних, що проходять через певний вузол, незалежно від того, чи є даний вузол учасником маршруту чи ні.

Таким чином, одним з найбільш значущих переваг протоколу DSR є можливість передачі пакетів по асиметричним лінками, а також наявність механізму кешування маршрутів, які показали свою ефективність в проведених мережевих симуляції [22], де протокол DSR показав найкращі результати у всіх трьох основних показниках продуктивності - середньої пропускної здатності на маршрут, середньої затримки, а також відсотку втрат пакетів.

1.5 Проактивні протоколи маршрутизації

1.5.1 DSDV протокол

Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) протокол є спадкоємцем класичного алгоритму маршрутизації для дротових мереж - алгоритму Distance Vector, який використовується, наприклад, в протоколі RIP [23]. Протокол DSDV був спеціально поліпшений для роботи в бездротових багатовузлових мережах передачі даних, з огляду на їх особливості. Зокрема, DSDV має механізм детектування петель маршрутизації, що призводить до явищу нескінченних маршрутів (count-to-infinity problem), яке часто зустрічається в мережах MANET,

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

особливо в мережах з високо динамічної топологією і високою інтенсивністю трафіку.

Головна особливість протоколу DSDV - це використання класичної проактивної схеми маршрутизації, яка часто використовується в провідних мережах передачі даних. Така схема маршрутизації, як вже було сказано раніше, має на увазі наявність у всіх вузлів мережі глобальної та повної таблиці маршрутизації, яка включає в себе всі можливі варіанти маршрутів з будь-якого вузла в будь-який інший. Кожен запис в такій глобальній таблиці має приблизно такий вигляд: <Адреса вузла-одержувача> <Наступний вузол> <Метрика> <Порядковий номер маршруту>, де порядковий номер маршруту відображає актуальність маршруту в даний момент часу. Механізм обміну маршрутною інформацією в DSDV показаний на рис. 1.8.

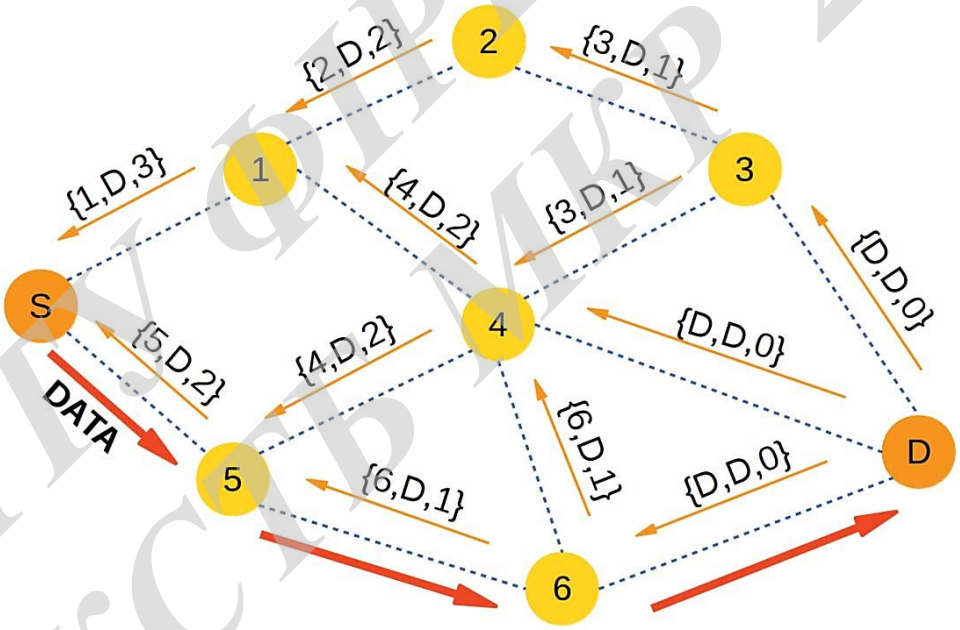


Рисунок 1.8 - Процедура поновлення маршрутів в протоколі DSDV

Так як протокол DSDV є чисто проактивним протоколом маршрутизації, він не має процедури пошуку маршрутів в мережі, так як мається на увазі, що кожен вузол в мережі має повну (глобальну) таблицю маршрутів безпосередньо перед передачею даних. Тому, для того, щоб містити глобальну таблицю маршрутів в актуальному стані, DSDV має механізм поновлення таблиці маршрутизації

ВНТУ ФРЕН ТКСІР МКР 2019

(Routing Management Procedure), який запускається періодично, через певний інтервал часу. Коли бездротова багатовузловий мережу змінює свою топології через мобільності вузлів або через зміну умов бездротової середовища передачі, вузли періодично широкомовно посилають в мережу спеціальні службові повідомлення, де зазначено повну таблицю маршрутизації, або тільки її частину з змінами. Ці повідомлення приймаються безпосередніми сусідами даного вузла, які, в свою чергу, оновлюють свою таблицю маршрутів і посилають оновлену інформацію таким же чином далі. В кінцевому рахунку, через таку "ланцюжок" оновлень, вся мережа оновлює свою глобальну таблицю маршрутів.

Протокол DSDV, маючи проактивну природу, має деякі переваги, порівняно з реактивними протоколами маршрутизації, а саме, має більш високі показники продуктивності в мережах з малим кількістю вузлів, низькою мобільністю і високою інтенсивністю трафіку. Однак, продуктивність DSDV різко деградує в мережах з високою щільністю і мобільністю вузлів, так як кількість службових повідомлень в такому випадку, зростає експоненціально і практично повністю займає смугу пропускання каналу, значно збільшуючи показники затримки і відсотки втрат пакетів з даними. Крім того, велика кількість вузлів в бездротової багатовузлових мережі (100 вузлів і більше) з низькою інтенсивністю або вибуховим (Burst) типом трафіку [24], робить підтримку великих глобальних таблиць маршрутизації нераціональним з точки зору споживання обчислювальних ресурсів вузла мережі, які, найчастіше, є обмеженими з високою ступенем автономності.

Таким чином, протокол DSDV має перевагу перед протоколами з реактивної схемою маршрутизації тільки в випадках його застосування в мережах з невеликою кількістю вузлів і низькою мобільністю, і де затримка передачі пакетів даних повинна бути мінімальною (оптимізація мережі по затримці пакетів). Однак, у великих бездротових багатовузлових мережах з високою мобільністю або високим ступенем непередбачуваності середовища передачі, продуктивність протоколу DSDV стрімко деградує. Згідно результатами проведених мережевих симуляцій в дослідженні [24], DSDV показав аналогічні з AODV, OLSR і DSR результати по

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБМКР 2019

середньої пропускної спроможності маршруту. DSDV показав себе краще за середнім значенням відсотка втрат пакетів, що може бути пояснено статичною топологією мережі з відносно невеликим числом вузлів, використаної в симуляції моделюванні.

1.5.2 OLSR протокол

Optimized Link-State Routing (OLSR) протокол маршрутизації був спеціально розроблений для багатовузлових бездротових мереж передачі даних, і являє собою поліпшену версію класичних link-state протоколів маршрутизації [15]. Протокол OLSR, так само як і DSDV, є проактивним протоколом маршрутизації. Його характеристики залежать від ефективності механізму поновлення глобальної таблиці маршрутів. На відміну від DSDV, тут механізм поновлення маршрутів розрахований на передачу мінімального кількості службових повідомлень за рахунок скорочення числа вузлів, які мають функціональність широкомовного обміну службовими повідомленнями. Вузли, які мають дану функціональність, називаються multipoint relays (MPRs) [15]. MPRs вибираються зі всієї безлічі вузлів мережі таким чином, щоб кожен вузол мережі мав, як мінімум, один MPR-вузол в доступності в 1 перехід (hop) від нього. Таким чином, чим щільніше стає мережу, тим менша кількість MPR-вузлів необхідно для успішного обміну широкомовними повідомленнями для поновлення глобальної маршрутної таблиці, що значно скорочує кількість переданих службових повідомлень і покращує показники продуктивності мережі, перш за все, по середньої пропускної здатності того чи іншого маршруту.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

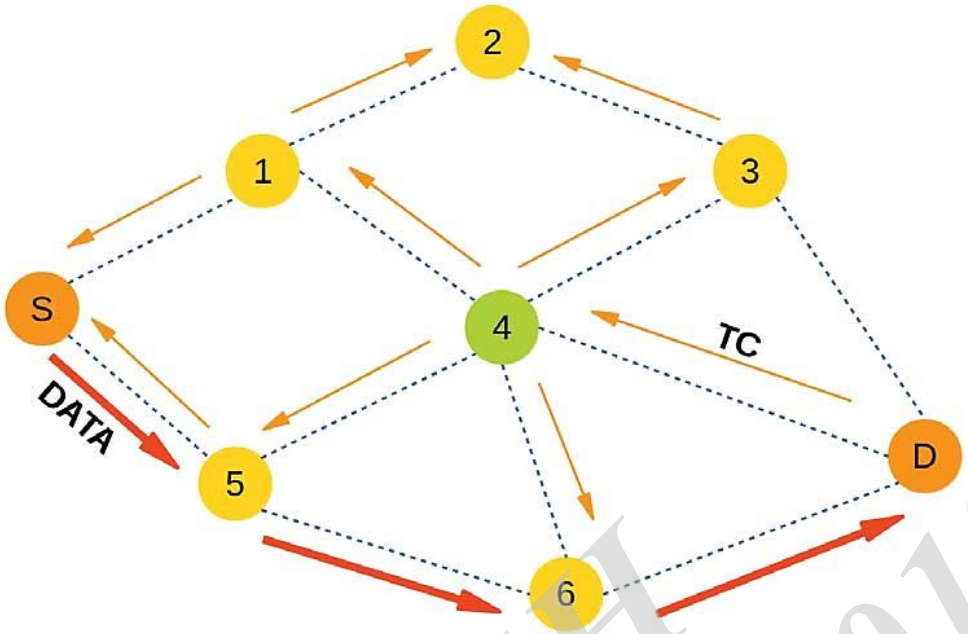


Рисунок 1.9 - Передача службових ТС повідомлень в протоколі OLSR

Базовий алгоритм OLSR (без використання вузлів з безліччю мережевих інтерфейсів, а також вузлів-шлюзів), містить такі основні кроки:

• на першому кроці вузли OLSR мережі знаходять своїх прямих сусідів (вузли в радіусі 1-го переходу), і вузли цих сусідів (вузли, що знаходяться в радіусі 2-х переходів). Це здійснюється шляхом передачі спеціального HELLO- повідомлення, яке містить інформацію про вузол і його прямих сусідах, відомих на поточний момент;

• на другому кроці, коли кожен вузол мережі отримав інформацію про своїх прямих сусідах, а також про вузли на відстані в 2 переходу від нього, вузол вибирає один MPR-вузол з поточного списку даних вузлів;

• після того, як вузол вибрав свій MPR-вузол, він інформує його, використовуючи HELLO-повідомлення;

• після того, як всі MPRs в мережі обрані і проінформовані про цьому, MPRs ініціалізують періодичну трансляцію відправку спеціальних ТС (Traffic Control) повідомлень, які містять інформацію про всіх сусідів всіх вузлів, для яких даний

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

вузол є MPR (рисунок 1.9). Таким чином, в кінцевому підсумку, кожен вузол мережі стає поінформованим про всій глобальній топології мережі;

• тепер, кожен вузол мережі, маючи повну (глобальну) таблицю маршрутів, будує маршрути до потрібних вузлів-одержувачів, використовуючи, наприклад, класичний алгоритм Дейкстри [25]. На поточному етапі, трафік може бути маршрутизований і переданий по OSLR мережі;

• кожен вузол періодично посилає HELLO і TC повідомлення (якщо вузол є MPR) для підтримки інформації про топології мережі в актуальному стані. Якщо якийсь із вузлів мережі перестав отримувати вхідні HELLO повідомлення від певного вузла-сусіда, то лінк між ними вважається втраченим, і інформація про це передається далі до відповідного MPR- вузла, який, в свою чергу, повідомляє про це далі, використовуючи TC повідомлення, як описано вище.

Таким чином, протокол OLSR є покращеною версією проактивних протоколів маршрутизації для бездротових багатовузлових мереж передачі даних, в якому значний акцент зроблено на мінімізацію кількості посилаються широкомовних повідомлень за рахунок застосування MPR-вузлів, що дозволяє даний протокол використовувати в більших мережах, і, при цьому, зберегти мінімальні значення первинної затримки пакетів за рахунок використання проактивної схеми маршрутизації.

В імітаційних тестах, проведених автором даної дисертаційної роботи в дослідженні [26], OLSR показав хороші результати за всіма трьома основними показниками продуктивності - середньої пропускної здатності, середньої затримки, а також середнього значення відсотка втрат пакетів на маршрут. Варто зазначити, що протокол маршрутизації B.A.T.M.A.N., який був обраний для порівняльних експериментів з розробленим алгоритмом, заснований на OLSR і має актуальну програмну імплементацію на операційний системі Linux, а також постійно допрацьовується активної групою розробників, що робить протокол B.A.T.M.A.N. одним з найбільш популярних і стабільних протоколів маршрутизації в бездротових ніздрюватих мережах, що використовуються в даний час.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

1.6 Вибір метрик маршрутизації

Правильний вибір метрики маршрутизації є одним з найбільш важливих чинників для оптимального функціонування бездротової багатовузлової мережі передачі даних. Вибір метрики маршрутизації може залежати від багатьох факторів, відштовхуючись від властивостей тієї чи іншої мережі, включаючи умови для бездротової середовища передачі, які безпосередньо впливають на логічну топологію мережі. Крім середовища передачі, на вибір метрики маршрутизації можуть впливати внутрішні властивості мережі, а саме, інтенсивність мережевого навантаження (трафіка), використовує чи мережу безліч діапазонів частот (так зване, мультирадіо), кількість і ступінь мобільності вузлів, і т.д. таке безліч факторів створює нетривіальну проблему вибору метрики маршрутизації для конкретної мережі. У самому узагальненому випадку, і в переважній більшості протоколів для мереж MANET, використовується метрика найкоротшого шляху (hop count metric). Дана метрика працює задовільно в широкому діапазоні видів бездротових багатовузлових мереж, так як вона відображає фізичні властивості маршруту, а саме, його довжину в переходах (hop count), яка безпосередньо впливає на всі інші показники продуктивності мережі, включаючи пропускну здатність, затримку і відсоток втрат пакетів. Однак, для деяких специфічних сценаріїв, де протокол маршрутизації виконує функцію балансування трафіку, дана метрика не підходить. Більш того, як було показано в дослідженні [26], функція балансування трафіку має важливе значення в маршрутизації особливо в бездротової середовищі передачі, так як розподіляє не тільки мережеву навантаження на канали, а й також "розвантажує" інтенсивність колізій, що виникають на фізичному рівні через велику інтенсивності передачі фреймів з даними. Крім того, в деяких випадках, менша довжина маршруту (число проміжних вузлів) може означати більшу фізичне відстань між вузлами, що, в умовах бездротового середовища передачі, означає значне зменшення пропускної здатності линка (Рис. 1.10). У таких випадках, більш ефективним рішенням було б використання маршруту з більш високим числом переходів (hop count), але з меншими фізичними довжинами лінків.

ВПУ ФІРЕН ГКСТБ МКР 2019

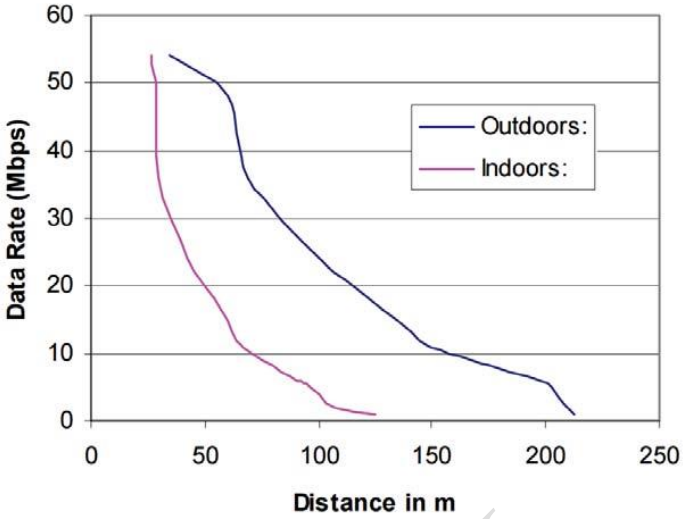


Рисунок 1.10 - Графік середніх швидкостей передачі даних в залежності від відстані в мережі Wi-Fi 802.11g, 2.4GHz

З іншого боку, існують метрики маршрутизації, засновані на лінках. Такими можуть бути метрики на базі RTT (Round Trip Time) між вузлами, відносного числа втрачених пакетів, або кількості успішно переданих пакетів. Крім того, до метрик якостей линка відносяться метрики ступеня інтерференції в каналі, що має велике значення в бездротових мережах, що використовують єдину радіочастоту (single radio), де боротьба з інтерференцією виходить на передній план. Метрики маршрутизації, засновані на часі життя того чи іншого маршруту можуть бути вкрай ефективні в мережах з високо динамічної топологією.

Для бездротових багатовузлових мереж з високим ступенем автономності, споживання енергії мережевим вузлом стає ключовим фактором. для таких мереж існують свої спеціальні метрики маршрутизації, засновані, наприклад, на очікувану значенні енергії прийому (ETX count based on Qmetric пакета, які покликані збалансувати енергоспоживання вузлів для збільшення тривалості автономної роботи мережі.

Однак, при такій великій безлічі різних метрик маршрутизації, не існує якоїсь узагальненої метрики, яка б оптимально працювала у всіх видах бездротових багатовузлових мереж з різними типами трафіку. Найбільш виграшним підходом до вирішення даної проблеми є підхід обчислення якоїсь виваженої метрики.

ВПТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

2.1 Машинне навчання з підкріпленням

Основним завданням навчання з підкріпленням є завдання зіставлення дій з поточною ситуацією в середовищі взаємодії для того, щоб максимізувати значення одержуваної нагороди. Навчальна програма не має вхідних даних про те, яку дію виконати в тій чи інший момент часу, однак має можливість самостійно вибирати ті чи інші дії для отримання значень нагороди. У найскладніших завданнях навчання з підкріпленням, виконання певної дії в даний момент часу може безпосередньо впливати на значення одержуваної нагороди не тільки для поточного дії, але і для всіх інших значень нагороди. Таким чином, можна виділити дві основні характеристики навчання з підкріпленням - пошук шляхом проб і помилок (try and error) [25], і затримана нагорода (delayed reward) [26], які є двома найбільш помітними відмітними рисами навчання з підкріпленням.

У самому узагальненому випадку, ідея навчання з підкріпленням полягає в визначенні найбільш важливих аспектів завдання (проблеми), для вирішення якої агент буде взаємодіяти з якоїсь середовищем шляхом процесу "дія - нагорода "[27]. Очевидно, що агент повинен мати можливість "слухати" середовище (Отримувати нагороду від неї), а також мати можливість на неї впливати шляхом виконання певних дій. Крім того, агент повинен мати якусь "Мета", до якої повинен привести середу, з якою взаємодіє. Така узагальнена формулювання визначає наявність трьох основних компонентів навчання з підкріпленням - "відчуття" середовища, вчинення дій з середовищем, і мета (цільовий стан середовища). Машинне навчання з підкріпленням відрізняється від навчання з учителем (Supervised learning) тим, що не ставить завдання знайти статистичну функцію, яка підходила б для вхідного масиву даних. Навпаки, в машинному навчанні з підкріпленням впроваджується сутність агента, який взаємодіє з цим середовищем в реальному часі, і коригує своє поведінку на основі отриманого зворотного зв'язку (нагороди). У той час як в навчанні з учителем, існує сутність вчителя, який заздалегідь має

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

"Цільової" набір даних. Таким чином, агент поступово покращує свої знання про навколишній світ, з яким він взаємодіє і, в кінцевому підсумку, знаходить універсальну схему поведінки, яка є оптимальною або близькою до оптимальної. Більш того, часто передбачається, що агент взаємодіє з середовищем, не маючи ніякого початкового уявлення про її властивості, а також про те, як ті чи інші дії агента впливають на її стан. У процесі навчання, агент виконує два основних математичних дії: вибір наступного дії, ґрунтуючись на поточному інформації про нагороди, а також аналіз / прогноз того, як обрану дію вплине на середу і майбутнє значення нагороди. В даний час, теорія машинного навчання з підкріпленням використовується далеко за межами теорій математичної статистики і дослідження операцій [27]. Один з найбільших трендів в дослідженнях, в яких навчання з підкріпленням є невід'ємною частиною, є області науки, пов'язані з прикладними інженерними дисциплінами, в Зокрема, телекомунікації. Прикладами завдань машинного навчання з підкріпленням є:

- гравець в шахи робить хід:

Вибір дії, в даному середовищі, залежить від планування, тобто аналізу / передбачення того, як зроблений хід вплине на поточну і майбутню ігрову ситуацію.

- адаптивний мікроконтролер змінює компоненти суміші бензину на нафтопереробної фабриці [28]:

Мікроконтролер оптимізує співвідношення ціни / кількості / якості бензину, в залежності від поточних параметрів, не прив'язуючись до фіксованим параметрами палива, спочатку встановлених інженерами.

- дитинча газелі намагається встати на ноги в перші хвилини життя [28]:

Дитинча, шляхом активної взаємодії з навколишнім середовищем, знаходить і запам'ятовує оптимальний баланс свого тіла в просторі, і вже через півгодини розвиває швидкість в 35 кілометрів на годину.

- мобільний робот вирішує входити йому в кімнату, прибрати сміття, або почати рухатися в бік стаціонарного зарядного пристрою [29]:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

В даному середовищі, робот може прийняти рішення, ґрунтуючись на тому, скільки часу знадобилося йому раніше, щоб дістатися до зарядної станції.

- мережевий маршрутизатор приймає рішення про подальший маршрут вхідного пакета даних:

Маршрутизатор мережі, ґрунтуючись на попередній історії відправок пакетів з даною парою адрес «відправник / одержувач», і відповідних показниках відсотка втрат і завантаження мережі, відправляє пакет далі. Всі перераховані вище приклади поділяють між собою основну рису машинного навчання з підкріпленням, а саме: процес взаємодії між активним, які приймають рішення агентом, і середовищем його перебування, в ході якого агент намагається досягти мети в умовах невизначеності середовища, де він знаходиться. При цьому, дії агента можуть впливати на стан середовища (Наприклад, наступна позиція в шаховій партії, рівень резервуарів в нафтовому сховищі, наступне місце розташування робота), таким чином впливаючи на можливості вибору, доступні агенту на наступних кроках. Тому, вибір оптимального дії також залежить від величини "неявних" (Затриманих в прояві) наслідків того чи іншого дії і, таким чином, потребує планування і аналізі доступної інформації про середовище взаємодії. У той же самий час, у всіх перерахованих вище прикладах, наслідки тих чи інших дій не можуть бути повністю передбачувані, тому агент повинен досить часто стежити за станом середовища і реагувати відповідно. Крім того, дані приклади включають в себе певні мети в тому сенсі, що агент має можливість співвідносити поточну ситуацію і стежити за прогресом в сторону заданої мети. Наприклад, гравець в шахи знає коли він програв або виграв, мікроконтролер на заводі знає, скільки бензину було вже зроблено, а робот-прибиральник знає момент часу, коли його батареї розрядяться. Всі перераховані вище приклади також показують, що агент може використовувати накопичений досвід для поліпшення своєї продуктивності з плином часу. Так, гравець у шахи переглядає своє ігрове мислення для оцінки поточної шахової позиції, тим самим покращуючи свою гру. знання, які доступні агенту до початку завдання (вони отримані або з досвіду виконання попередніх подібних завдань, або в залежності від вихідних параметрів),

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

впливають на те, яку дію агент буде вибирати в першу чергу (Тобто те, чого легко навчитися), однак подальший процес взаємодії зі середовищем є найважливішим в аспекті оптимізації поведінки агента і знаходження особливостей середовища в контексті поставленого завдання.

2.2 Основні елементи теорії машинного навчання з підкріпленням

Крім суті агента і середовища, можна виділити ще 4 основних елемента системи навчання з підкріпленням, а саме: стратегія (policy), функція нагороди (reward function), функція значень (value function) і, опціонально, модель середовища (environment model). Стратегія визначає поведінку агента в даний момент часу. Іншими словами, стратегія являє собою список станів середовища і відповідних дій, які повинен виконати агент, потрапляючи в одне з таких станів. У деяких випадках, стратегія може являти собою просту таблицю асоціацій, в інших - складний обчислювальний процес, такий як алгоритм пошуку. Таким чином, стратегія являє собою "ядро" процесу навчання з підкріпленням в тому сенсі, що вже однією стратегії досить для того, щоб ставити поведінку агента. У загальному випадку, стратегії навчання з підкріпленням можуть бути стохастичними [29].

Функція нагороди визначає мету завдання навчання з підкріпленням. Вона вводить відповідність між станами середовища (змінюються при взаємодії з агентом) і деяким числом - нагородою, яка б показала бажаність чи небажаність виробленого дії. єдиною ж завданням агента, в даному контексті, є максимізація сумарної нагороди в довгостроковій фазі. Очевидно, що функція нагороди, визначає "хороші" і "Погані" стану системи, і, крім того, може впливати на стратегію навчання. Наприклад, якщо агент виконав деяку дію згідно зі стратегією, і отримав низьке значення нагороди, то стратегія може бути змінена на користь вибору іншого дії в даній ситуації в майбутньому. У загальному випадку, функції нагороди можуть бути стохастичними [30]. Функція значень, на відміну від функції нагороди, визначає яке дія є "хорошим" чи "поганим" в довгостроковій перспективі. В грубої формулюванні, функція значень є якимось агрегатний

ВНТУ ФІРЕН ГКСТБ МКР 2019

значення всіх нагород, отриманих за конкретну дію, таким чином, показуючи довгострокову "бажаність" даного дії. наприклад, оптимальне дію може мати низьку нагороду в поточний момент, але, вибравши його, може послідувати серія станів з високою нагородою, або навпаки - за високої початкової нагородою може послідувати серія з низьких значень нагород. В контексті машинного навчання з підкріпленням, а також керуючись інтуїтивної логікою, функція нагороди має пріоритет над функцією значень в тому сенсі, що без нагород не було б значень, і в тому, що єдиною метою функції значень є отримання якомога вищої нагороди. Однак, саме функція значень є основною в процесі прийняття рішення, так як вибір тієї чи іншої дії залежить від поточного агрегатного значення попередніх нагород за дану дію, тим самим передбачаючи високе середнє значення нагород в довгостроковій фазі. Однак, на жаль, задача визначення функції значень є набагато складнішою, ніж визначення функції нагороди, так як нагороди виходять безпосередньо з середовища, в той час як значення повинні бути періодично "оцінені" з послідовності нагород і спостережень, який робить агент з плином часу. Більш того, визначення оптимальної функції значень є основною проблемою в області дослідження теорії навчання з підкріпленням за останні десятки років існування даної теорії [31]. Четвертим і останнім елементом систем машинного навчання з підкріпленням є модель середовища. Модель середовища, в узагальненому випадку, являє собою імітацію поведінки реального середовища в тих чи інших умовах, тим самим, дозволяючи передбачати наступний стан реальної системи при поточному її стані, а також обраному дії. Найчастіше, моделі середовища використовуються для планування, тобто для способу визначення послідовності дій до того, як вони трапилися. Модель середовища є щодо нової компонентою систем навчання з підкріпленням, які до цього були побудовані виключно на принципі "дія - нагорода".

Включення компоненти моделі середовища пов'язано з тим, що методи навчання з підкріпленням тісно пов'язані з методами динамічного програмування [32], які, в свою чергу, використовують моделі станів.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

2.3 Розрахунок функції значень

Розглянемо приклад розрахунку функції значень на прикладі завдання "N-рукого бандита "[33], в якій гравець (агент) повинен вибрати один важіль з безлічі N, який принесе найбільший виграш. Кінцева мета гравця полягає в максимізації сумарної нагороди за T вироблених ітерацій. У заданих умовах, кожна дія має очікуване (або середнє) значення нагороди, яке називається значенням дії. Якщо значення всіх дій відомі до початку гри, то рішення даної задачі стає тривіальним – гравцеві необхідно лише завжди вибирати важіль з найбільшою нагородою. Однак, значення нагород за ті чи інші дії заздалегідь невідомі, але можуть бути оцінені, в залежності від того, яке значення нагороди було отримано раніше за певним чином впливати. Якщо гравець запам'ятовує всі нагороди за виконані раніше дії, то очевидно, що серед них буде дію з максимальним очікуваним значенням нагороди - воно називається жадібним (greedy) дією [34]. Якщо вибрати таке дію на наступному кроці, то це можна буде інтерпретувати як використання знань про середовище. Однак, якщо замість очевидного жодного дії вибрати дію з іншим значенням очікуваної нагороди, то такий крок можна інтерпретувати як дослідження середовища, так як він дозволяє поліпшити значення очікуваної нагороди для вибраної дії і отримати більше

інформації про середовище. Таким чином, можна зробити інтуїтивний висновок - використання поточних знань є оптимальним дією для максимізації нагороди на поточному кроці, в той час як дослідження дозволяє отримати більш високу сумарну нагороду в довгостроковій перспективі [35].

Таким чином, методика розрахунку очікуваного значення нагороди (тобто функції значень) є ключовою для оцінки та вибору наступного кроку. Одним з найбільш простих, але тим не менш, ефективних і найбільш часто використовуються методів розрахунку функції значень є метод середнього вибіркового (sample average) значення [18], який можна виразити в наступною формулою:

$$Q_t(a) = \frac{r_1 + r_2 + \cdots + r_{k_a}}{k_a} \quad (2.1)$$

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

де: $Q_t(a)$ - очікуване значення від дії А на кроці Т;

r_{k_a} - значення отриманої нагороди на k-тому кроці;

k_a - текущее количество итераций действия *A*.

Позначимо даний (не плутати з очікуваним) значення нагороди на етапі Т як: $Q_t^*(a)$.

Тоді: k→∞, $Q_t(a) \rightarrow Q_t^*(a)$.

Очевидно, що найпростішим правилом вибору наступного дії є вибір дії з максимальним поточним значенням нагороди, тобто вибір на кроці Т одне з жадібних дій а *, для якого:

$$Q_t^*(a) = max_a Q_t(a)\ , \qquad (2.2)$$

Даний спосіб називається жадібним (greedy) і завжди використовує тільки поточні знання про середовище для того, щоб максимізувати нагороду в даний момент часу, при цьому не витрачаючи часу на дослідження інших, менш цінних дій, щоб з'ясувати, чи не є вони найкращим вибором в довгостроковій перспективі. Простий альтернативою вищеописаному методу може бути метод, який вибирає дії з максимальним значенням нагороди в більшості випадків, однак, з певною малою вірогідністю ε, випадковим способом вибирає іншу дію на певному етапі. Такий метод називається ε-жадібним (E-greedy) [35], і забезпечує виконання умови конвергенції $Q_t(a) \rightarrow Q_t^*(a)$, при k→∞ Іншими словами, при досить високому числі ітерацій k, кожен крок буде в підсумку досліджений, гарантуючи оптимальність наступних кроків.

Для того, щоб оцінити відносну ефективність даних методів на прикладі завдання N-рукого бандита, був проведений наступний експеримент. Було згенеровано безліч з 2000 року N-рукіх бандитів, при N = 10. Для кожного дії а, нагороди були обрані з нормального (гауссовского) розподілу з математичним очікуванням, рівним $Q_t^*(a)$ і дисперсією, яка дорівнює 1. Всі завдання були згенеровані 2000 разів, з вибором значення $Q_t^*(a)$ в діапазоні значень, із середньою рівною 0, і дисперсією, яка дорівнює 1. Усереднивши отримані значення нагород

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

на кожному кроці (від 0 до 1000), був отримано наступний графік. Рисунок 2.1 показує процентне співвідношення оптимальних дій.

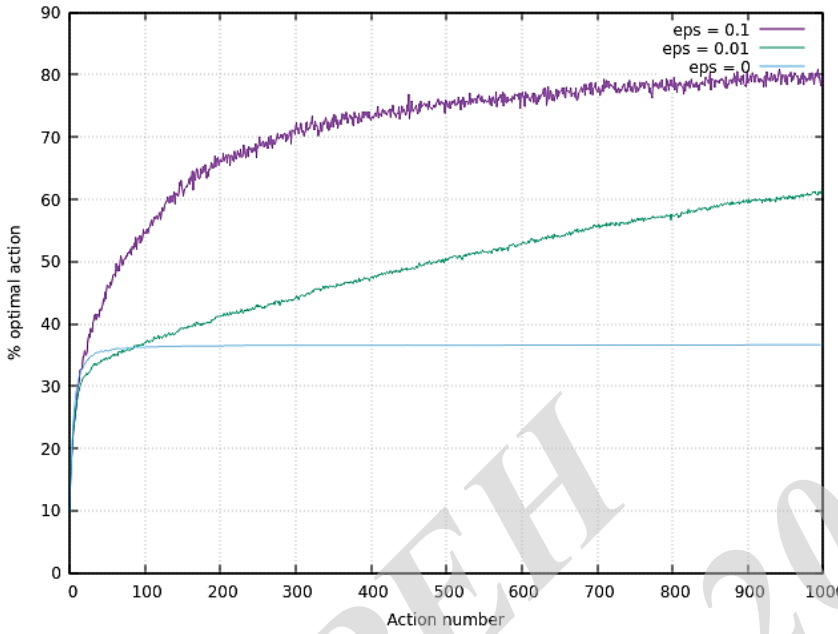


Рисунок 2.1 - Процентне співвідношення оптимальних дій при використанні методів greedy і ε-greedy для завдання N-рукого бандита, при N= 10, k_{max}=1000

На рисунку 2.1 виконано порівняння жодного методу з двома ε-жадібними методами зі значеннями ε, рівними 0,1 і 0,01. Було обчислено середнє вибіркове значення поточної очікуваної нагороди. З проведеного порівняння видно, що жадібний метод знаходив оптимальне дію в приблизно 1/3 випадків. В інших 2/3 завдань, даний метод не зміг перейти на оптимальні дії, так як початкові значення нагород виявилися зіставлені з неоптимальними діями. У даних умовах, метод ε-жадібний спрацював краще, так як мав можливість досліджувати інші дії в різні моменти часу. При ε = 0,1 алгоритм досліджує середовище найчастіше і знаходить оптимальне дію раніше, але при цьому ніколи не вибирає його більше, ніж в 91% Рисунок 1 - Процентне співвідношення оптимальних дій при використанні методів greedy і ε-greedy для завдання N-рукого бандита, при N = 10, kmax = 1000 випадків. При ε = 0,01 алгоритм знаходить оптимальне дію повільніше, проте працює краще при великих значеннях k. Поведінка жодного та ε-жодного методів багато в чому залежить від завдання. Наприклад, якщо уявити, що в вищевикладеному прикладі, значення дисперсії було б одно не 1, а 10, то жодній метод показав би себе ще гірше,

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

в той час як ε-жадібний метод з ε = 0,1 знайшов би оптимальне дію ще швидше. І навпаки, в разі, якби дисперсія дорівнювала 0, жадібний метод у всіх випадках би знаходив оптимальне дію, в той час як всі інші методи втрачали б оптимальний вибір в декількох відсотках випадків, в Залежно від значення ε.

2.4 Метод зваженого вибору дії

Незважаючи на те, що вище описані способи вибору дії, такі як жадібний і ε-жадібний є досить ефективними і найбільш популярними, вони мають очевидний недолік, пов'язаний з тим, що дії з не максимально очікуваною нагородою вибираються випадково і рівномірно. Це означає, що найменш вигідна дія має однакові шанси бути обраною, що і дія, близька до максимально вигідного. В деяких завданнях, де погані дії мають екстремально низьке значення нагороди, такі способи вибору можуть бути неефективними. Рішенням даної проблеми є можливість завдання ймовірності (Ваги) тієї або іншої дії, в залежності від його ефективності. В данному випадку, жадібне дію як і раніше має максимальну ймовірність вибору, проте, всі інші ранжуються згідно з їхніми відповідними значеннями очікуваної нагороди. Такі методи називаються виваженими (softmax)

Одними з найпоширеніших зважених методів вибору є метод, заснований на розподілі Гіббса-Больцмана, за допомогою якого можна оцінити ймовірність вибору наступного дії a на кроці T (вага дії):

$$P_t(a) = \frac{e^{\frac{Q_t(a)}{\tau}}}{\sum_{b=1}^{n} \frac{Q_t(b)}{\tau}} \quad , \tag{2.3}$$

де: $P_t(a)$ - ймовірність вибору дії a на кроці t;

$Q_t(a)$ - очікуване значення нагороди за вибір дії a на кроці t;

$Q_t(b)$ - очікуване значення нагороди за іншу дію b на кроці t;

τ - позитивний параметр, званий температурою. Висока значення температури зрівнює ймовірності вибору дій, в той час як низька температура визначає високу девіацію ймовірностей вибору, в Залежно від значення очікуваної нагороди.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

3 АЛГОРИТМ МЕРЕЖЕВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ

В даному розділі розміщено опис розробленої схеми адаптивної маршрутизації для мереж передачі даних з бездротовою многоузловой топологією, із застосуванням методу машинного навчання з підкріпленням. Основна ідея полягає в застосуванні математичного апарату машинного навчання з підкріпленням для завдання вибору маршруту входить пакету даних. Вибір маршруту для кожного пакета, як буде показано далі, може бути розрахований з оціночного значення маршруту, в залежності від адреси вузла-одержувача. Дані оціночні значення можуть динамічно змінюватися в процесі функціонування мережі і в залежності від параметрів роботи механізму нагороди за вибір маршруту для вхідного пакета даних. Розроблюваний протокол маршрутизації повинен виконувати наступні функції:

- пошук маршруту до вузла-одержувача;
- підтримання маршруту в актуальному стані;
- пересилання пакетів даних по шляху, оптимальному за критерієм метрики;
- балансування трафіку в мережі.

Крім того, розробляється схема маршрутизації повинна підходити дляпередачі як односпрямованих (unicast), так і широкомовних (broadcast) повідомлень, одержуваних від стека протоколів TCP / IP, включаючи IPv4 і IPv6 адресацію [37, 38].

3.1 Взаємозв'язок теорії навчання з підкріпленням і завдання маршрутизації

Задачі маршрутизації в багатовузлових мережах можна розділити на дві основних підзадачі:

1) завдання первинного пошуку маршруту до вузла-одержувача (сигналізація):

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Використовується в разі, якщо вузол мережі не має ніякої інформації про маршруті до вузла-одержувача, і ініціалізує процедуру пошуку маршруту (Реактивну або проактивний, як описано в розділі 1.1);

2) режим пересилання пакунків (просування трафіку):

Даний режим використовується при нормальному функціонуванні мережі, коли вузол має інформацію про подальший маршрут входить пакета. В даному режимі вузол мережі приймає рішення про передачу пакету наступного вузлу-сусідові, який є частиною маршруту до вузла-одержувача.

Схема маршрутизації, пропонована в даній роботі, використовує реактивний режим пошуку маршруту з відповідними службовими повідомленнями RREQ і RREP, які збирають інформацію про мережевий топології в процесі їх поширення по мережі. Такий режим пошуку маршруту схожий з аналогічними механізмами, які використовуються в класичних протоколах маршрутизації в багатовузлових бездротових мережах, таких як AODV і DSR [39, 40].

У режимі пересилання пакетів, розроблена схема маршрутизації використовує новий підхід, що відрізняється від підходів класичним схем маршрутизації. Основна відмінність лежить в концепції таблиці маршрутів. Як було показано в розділі 1, всі основні протоколи маршрутизації в бездротових багатовузлових мережах спираються на класичне розуміння таблиці маршрутів, яка має такі обов'язкові поля:

<Адреса одержувача> <Адреса наступного вузла> <Метрика »,

де метрикою зазвичай є число проміжних вузлів в маршруті (Або довжина маршруту). Як було показано в розділі 1, така метрика маршрутизації добре відображає якість маршруту, проте в мережах з високо мобільного топологією і в умовах зашумленности бездротового каналу вона може виявитися неоптимальною. На відміну від традиційних протоколів маршрутизації, розроблена схема маршрутизації має наступну структуру таблиці маршрутів:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Таблиця 3.1 - Узагальнена структура пропонованої таблиці маршрутів

Адреса_отримувача 1	*Адреса_сусіда1: w1*	*…*	*Адреса_сусіда N: wn*
…	…	…	…
Адреса_отримувача N	*Адреса_сусіда1: w1*	*…*	*Адреса_сусіда n: wn*

де: w_n - очікуване значення нагороди за вибір даного сусіда.

Основні взаємозв'язку завдання маршрутизації, а саме завдання пересилання вхідних пакетів даних з теорією машинного навчання з підкріпленням можуть бути виражені таким чином:

для кожної адреси вузла-одержувача:

- вузол-джерело ↔ агент;
- сусіди вузла-джерела ↔ безліч дій A;
- таблиця маршрутів ↔ набір значень очікуваної нагороди Q;
- вузол-джерело посилає пакет до вузлу-сусідові ↔ агент вибрав дію і виконав його;
- вузол-джерело отримав ACK повідомлення від сусіда ↔ агент отримав нагороду за виконану дію.

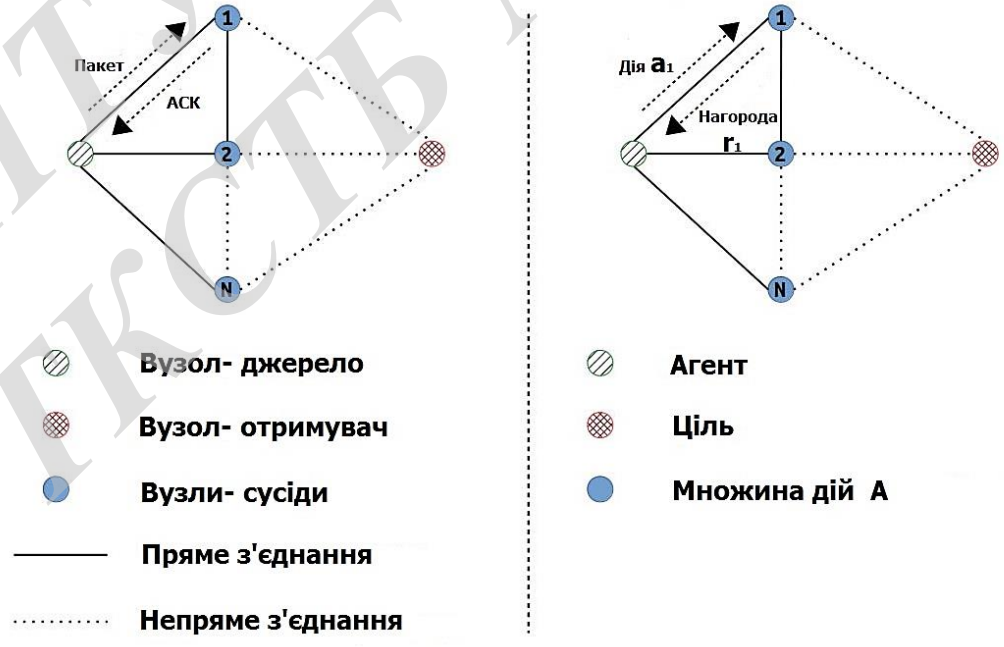


Рисунок 3.1 - Взаємозв'язок завдання маршрутизації (ліворуч) із завданням навчання з підкріпленням (праворуч)

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

У разі, коли вузол мережі приймає вхідний пакет даних з певною адресою призначення (адресою вузла-одержувача), він вибирає наступного вузол зі списку поточних вузлів-сусідів і пересилає прийнятий пакет, чекаючи у відповідь ACK повідомлення, що містить нагороду за обраний вузол. Протягом даного процесу, може статися 3 події:

1. Втрата пакету з даними або втрата зворотного ACK повідомлення. В такому випадку, вузол-відправник не отримає повідомлення ACK, і через певний таймаут, присвоїть негативне значення нагороди за обраний маршрут. Така поведінка є обгрунтованим, так як якщо пакети з даними або відповідні ACK повідомлення постійно губляться на певному лінк (каналі між вузлом-відправником і обраним сусідом), то це може означати наступне:

- приймає вузол вимкнувся;
- приймає вузол покинув зону прямого з'єднання з вузлом- відправником при пересуванні в просторі;
- бездротової лінк став дуже ненадійним для передачі через зашумленности радіоканалу, високої активності сусідніх вузлів, і т.д .;
- приймає вузол перевантажений входять трафіком.

У будь-якому з перерахованих вище випадків стає очевидним, що при втрати пакетів, має сенс знизити ймовірність вибору даного сусіда для пересилання даних на певну адресу одержувача. Це здійснюється шляхом присвоювання негативного значення нагороди за обрану дію.

2. Отримання відповідного ACK повідомлення з низькою нагородою.

Дана ситуація має на увазі, що обраний сусідній вузол успішно отримав пакет з даними і успішно відправив зворотне ACK повідомлення до узла- відправника. Однак, обраний вузол-сусід має не оптимальний маршрут до подальшого вузла-одержувача, так як маршрут або занадто довгий, або якість наступних лінків є поганим. Таким чином, відправивши ACK повідомлення з низькою нагородою, вузол-сусід поступово знизить ймовірність вибору його в якості ланки маршруту до вузла-одержувача, тим самим підвищуючи ймовірність вибору альтернативного сусіда.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

3. Отримання відповідного ACK повідомлення з високою нагородою.

Якщо прийняте ACK повідомлення містить високе значення нагороди, то це означає, що обраний вузол-сусід має хороший маршрут до вузла-одержувача, і обрану дію є хорошим рішенням для пересилання пакета далі. Беручи ACK повідомлення з високою нагородою, вузол-відправник поступово збільшить ймовірність вибору даного вузла-сусіда в довгостроковій перспективі, забезпечуючи оптимальну маршрутизацію пакетів по даному лінку.

3.2 Процедура пошуку маршруту, алгоритм первинного поновлення ваг маршрутів

Процедура пошуку маршруту инициализируется в ситуації, коли вузол мережі не має інформації про маршрут до вузла-одержувача пакета даних або в разі, коли дана інформація є застарілою і не відображає реальної топології мережі, що досить актуально для бездротових багатовузлових мереж з динамічної топологією.

Пошук маршруту пропонується проводити шляхом розсилки спеціального широкомовного повідомлення RREQ (запит маршруту) в сторону всіх узлов-сусідів. Вузли-сусіди, прийнявши повідомлення RREQ, пересилають його далі по мережі. Така процедура часто називається flooding (від англ. Затоплення) і триває до тих пір, поки кожен вузол мережі не прийме дане RREQ повідомлення. Дубльовані RREQ повідомлення приймаються, але не передаються далі, так само як і ті, у яких значення TTL (час життя) перевищило встановлений значення. Таким чином, в кінці процедури розсилки RREQ повідомлення, кожен вузол мережі має інформацію про адресу вузла-відправника, а також довжині маршруту до нього.

Пропонована схема розсилки широкомовних повідомлень є класичної, проте на її основі здійснюється розподіл первинних ваг маршрутів за критерієм комбінованих метрик, як показано далі. У такому ж ключі працює зворотна розсилка - обмін повідомленням RREP (Відповідь маршруту), що відправляється стороною одержувача в мережу. Після того як RREP повідомлення досягло всіх

ВПУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

вузлів мережі, включаючи вузол-відправник, вся мережа має актуальну маршрутну інформацію до вузла-одержувача, що усуває необхідність в повторній процедурі пошуку маршруту до даного вузла, рисунок 3.2 зображує процедура обміну широкомовними RREQ і RREP.

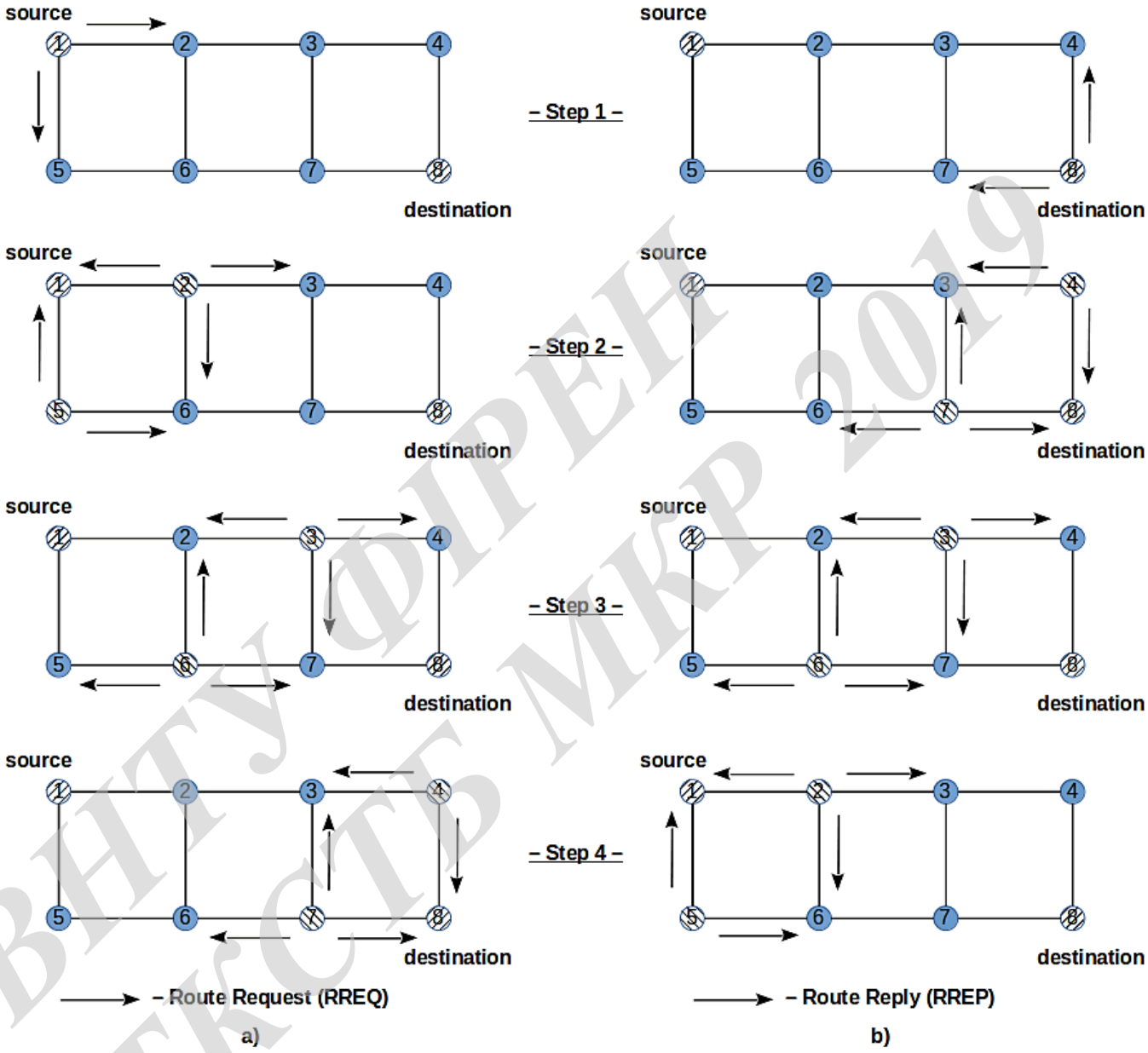


Рисунок 3.2 - Процедура обміну широкомовними RREQ і RREP повідомленнями від джерела (вузол 1) до одержувача (вузол 2) і назад

Після отримання RREP повідомлення вузлом-одержувачем, процедура пошуку маршруту завершується і схема маршрутизації переходить в фазу

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

пересилання пакетів даних за наявними маршрутами до вузла-одержувача. процедура пошуку маршруту проілюстрована на Рисунок 3.2.

Рисунок 3.2 - Процедура обміну широкомовними RREQ і RREP повідомленнями від джерела (вузол 1) до одержувача (вузол 2) і назад Первинне розподіл значень очікуваної нагороди (тобто ваг маршруту) є важливим фактором, що впливає на подальше функціонування протоколу маршрутизації, тому важливо задати початковий діапазон ваг. На нульовому етапі (до початку процедури пошуку маршруту), ваги всіх сусідів мають початкове значення 0. При процедурі пошуку маршруту, ваги оновлюються в заданому діапазоні: [0, 100]. При отриманні і наступного пересилання RREQ і RREP повідомлень, все проміжні вузли оновлюють таблицю ваг за пропонованою формулою:

$$\begin{cases} Q_n = \frac{100}{|RSSI| \times N_{hops}}, if\ RSSI \neq 0 \\ Q_n = \frac{100}{N_{hops}}, if\ RSSI = 0 \end{cases}, \quad (3.1)$$

де: Q_n - очікуваний вага маршруту для даної адреси вузла-одержувача;

$RSSI$ - індикатор рівня вхідного бездротового сигналу (Received Signal Strength Indicator), в діапазоні [-100, 0] дБм;

N_{hops} - число проміжних вузлів, через які пройшли RREQ / RREP повідомлення.

Таким чином, після завершення процедури пошуку маршруту, всі вузли мережі мають оновлену інформацію про маршрути від вузла-джерела і до узла-одержувача і назад, з актуальними значеннями ваг маршруту. Згідно формулою (3.1), значення ваг залежать обернено пропорційно від числа проміжних вузлів (довжини маршруту). Це означає, що спочатку, більш короткі маршрути мають більш високу ймовірність бути обраними. Однак, дана ймовірність може бути змінена вже в процесі передачі пакетів, так як найкоротший маршрут не завжди є оптимальним через непостійною і ненадійною бездротової середовища передачі. Такі зміни в

оптимальності маршруту постійно відстежуються за допомогою зворотних ACK повідомлень - чим гірше стає лінк, тим меншу ймовірність вибору він отримає при наступній передачі пакета. Далі, буде представлена розроблена покрокова схема

ВНТУ ФЛРЕН ТКСТБ МКР 2019

поновлення ваг маршрутів за допомогою розсилки RREQ і RREP повідомлень, згідно Рисунку 3.2.

Крок 1:

Вузол-джерело генерує і посилає широковещательное RREQ повідомлення в сторону своїх прямих сусідів - вузлів 2 і 5.

Вузли 2 і 5 оновлюють ваги відповідних шляхів в своїх таблицях маршрутів відповідно до виразом (3.1):

Вузол 2: {IP_АДРЕСА_1 : {MAC_АДРЕСА_1 : 100.0}}

Вузол 5: {IP_АДРЕСА_1 : {MAC_АДРЕСА_1 : 100.0}}

Крок 2:

Після отримання RREQ повідомлення, вузли 2 і 5 посилають його далі, в сторону своїх сусідів - вузлів 1, 3 і 6. Важливо відзначити, що починаючи з цього кроку, вузли мережі можуть отримати кілька ідентичних RREQ повідомлень, так як сусіди даних вузлів відправлять входить RREQ повідомлення назад, як показано на рисуноку 3.2 на кроці 2 (Оскільки повідомлення пересилаються широкомовною чином). Інша причина в отриманні ідентичних широкомовних повідомлень полягає в тому, що деякі вузли можуть мати спільних сусідів. Наприклад, вузли 2 і 5 мають загального сусіда - вузол 6. Тому, при повторному отриманні ідентичного RREQ / RREP повідомлення, вузол мережі видаляє його без подальшої обробки та пересилання, щоб уникнути перевантаження мережі через високої інтенсивності широковещательного службового трафіку. Таким чином, ваги в таблиці маршрутизації оновлюють тільки вузли 3 і 6:

Вузол 3: {IP_АДРЕСА_1 : {MAC_АДРЕСА_2 : 50.0}}

Вузол 6: {IP_АДРЕСА_1 : {MAC_АДРЕСА_2 : 50.0, MAC_АДРЕСА_5: 50.0}}

Крок 3:

Вузли 3 і 6 розсилають RREQ повідомлення далі. Вузли 4 і 7 оновлюють свої таблиці маршрутів, відповідно:

Вузол 4: {IP_АДРЕСА_1 : {MAC_АДРЕСА_3 : 33.3}}

Вузол 7: {IP_АДРЕСА_1 : {MAC_АДРЕСА_3 : 33.3, MAC_АДРЕСА_6: 33.3}}

Крок 4:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Вузол-одержувач 8 отримує RREQ повідомлення від вузлів 4 і 7, і оновлює відповідний вага в своїй таблиці маршрутів:

Вузол 8: {IP_АДРЕСА_1 : {MAC_АДРЕСА_4 : 25.0, MAC_АДРЕСА_7: 25.0}}

Завершивши крок 4, процес розсилки RREQ повідомлення закінчується. Внаслідок, все проміжні вузли, включаючи вузол-одержувач, отримали актуальну інформацію про маршрут до вузла-джерела в процесі оновлення відповідних значень ваг. Для завершення процедури пошуку маршруту, вузлу-одержувачу необхідно згенерувати і послати назад (теж широкомовно) RREP повідомлення в сторону вузла-джерела. Ця операція є ідентичною операції розсилки RREQ повідомлення з тією лише різницею, що ваги маршрутів будуть оновлюватися в сторону вузла-одержувача, як показано далі (права сторона рисунка 3.2).

Крок 1:

Вузол 4: {IP_АДРЕСА_8 : {MAC_АДРЕСА_8 : 100.0}}

Вузол 7: {IP_АДРЕСА_8 : {MAC_АДРЕСА_8 : 100.0}}

Крок 2:

Вузол 3: {IP_АДРЕСА_8 : {MAC_АДРЕСА_4 : 50.0, MAC_АДРЕСА_7: 50.0}}

Вузол 6: {IP_АДРЕСА_8 : {MAC_АДРЕСА_7 : 50.0}}

Крок 3:

Вузол 2: {IP_АДРЕСА_8 : {MAC_АДРЕСА_3 : 33.3, MAC_АДРЕСА_6: 33.3}}

Вузол 5: {IP_АДРЕСА_8 : {MAC_АДРЕСА_6 : 33.3}}

Крок 4:

Вузол 8: {IP_АДРЕСА_8 : {MAC_АДРЕСА_2 : 25.0, MAC_АДРЕСА_5: 25.0}}

Процедура пошуку маршруту закінчується як тільки вузол-джерело приймає RREP повідомлення. Після цього, всі вузли мережі мають інформацію а маршрутах як до вузла-джерела, так і до вузла-одержувача, що усуває необхідність в повторних процедурах пошуку маршруту до даних вузлів, при умови, що мережева

ВПТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

топологія і умови бездротової передачі не зміняться кардинальним чином. Незважаючи на те, що умови для бездротової передачі, а також мережева топологія можуть змінюватися з плином часу, розроблена схема маршрутизації повинна адаптуватися до цих змін, динамічно підлаштовуючи ваги відповідних маршрутів за рахунок механізму зворотного зв'язку у вигляді ACK повідомлень, а також алгоритму вибору сусіда, як буде показано в наступному розділі.

3.3 Алгоритм поновлення ваг маршрутів на основі зворотного зв'язку

У разі, якщо вузол мережі вже має актуальну інформацію про маршрут до вузла-одержувача або тільки що її отримав після успішного завершення процедури пошуку маршруту, протокол маршрутизації переходить у другій режим роботи - режим пересилання пакетів. У режимі пересилання пакетів, вузол мережі, спираючись на вищеописані механізми теорії навчання з підкріпленням, вибирає наступний вузол (next hop node) для відправки поточного пакета в сторону вузла-одержувача. Рішення про вибір наступного вузла з безлічі вузлів-сусідів ґрунтується на значенні очікуваної нагороди за вибір даного конкретного вузла. Після того, як вузол вибрав наступну адресу сусіда з поточного безлічі і послав пакет з даними, він очікує зворотне ACK повідомлення з нагородою протягом певного часу очікування. Узагальнена схема пропонованої зворотного зв'язку проілюстрована на рис. 3.3.

ВПУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019

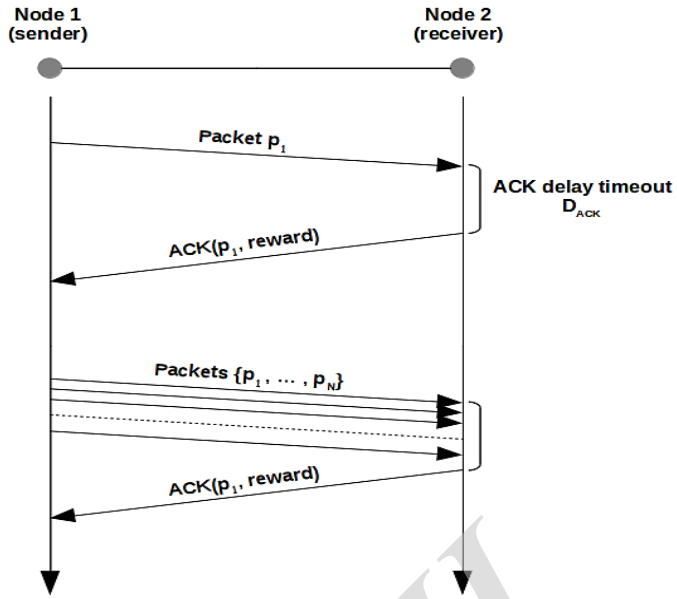


Рисунок 3.3 - Узагальнена схема зворотного зв'язку

Така схема зворотного зв'язку може призвести до ситуації, коли потік ACK повідомлень буде негативно впливати на продуктивність бездротової мережі в випадках, коли вхідний трафік має високу інтенсивність. Щоб уникнути такій ситуації, було введено поняття затримки ACK (ACK delay), як показано на Рисунок 3.3. Затримка ACK забезпечує зменшення числа відповідних ACK повідомлень до одиниці на кожний прийнятий пакет даних протягом заданого інтервалу затримки ACK. Таким чином, інтенсивність ACK повідомлень залишається постійною, незалежно від величини інтенсивності вхідного потоку пакетів. Відповідно до теорії машинного навчання з підкріпленням, оновлення значень очікуваної нагороди за обрану дію (в яку подає разі, дію - це вибір і пересилання пакета наступного вузла-сусідові) здійснюється на основі виразу [3.14]:

$$Q_{k+1} = Q_k + \alpha \cdot [r_{k+1} - Q_k] \,, \tag{3.2}$$

де: Q_{k+1} - очікуване значення нагороди;

Q_k - попереднє очікуване значення нагороди;

r_{k+1} - значення отриманої нагороди;

α - розмір кроку $\left(\frac{1}{k+1}\right)$.

Таким чином, безліч дій і безліч очікуваних значень можна записати у вигляді:

ВНТУ ФІРЕНТ ТКСТБ МКР 2019

$\{A_1: Q_1, \dots, A_n: Q_n\}$,

де: A - доступне дію (наприклад, пересилання пакета за даною адресою вузла-сусіда);

Q - поточне значення очікуваної нагороди.

З точки зору вузла, що посилає пакет з даними, логіка зворотного зв'язку виглядає наступним чином. Вузол посилає перший пакет в сторону сусіда і очікує заданий інтервал затримки ACK, який пропонується обчислювати за формулою:

$$T_{ACK} = RTT_e + D_{ACK} + \varepsilon\,, \tag{3.3}$$

де: RTT_e - очікуваний час двосторонньої затримки (Round Trip Time) між відправником і отримувачем;

D_{ACK} - значення часу затримки ACK повідомлення;

ε - значення похибки в часі передачі, яке залежить від особливостей роботи канального (L2) рівня мережі, що відповідає за алгоритм множинного доступу (наприклад, тайм-аути CSMA / CA), надійну пересилання (Таймаут канального ARQ) і т.д.

Якщо вузол-відправник отримує повідомлення ACK протягом інтервалу затримки, він зчитує значення отриманої нагороди, що міститься в даному повідомленні, та оновлює вага відповідного маршруту для даного сусіда в своєютаблиці маршрутів.

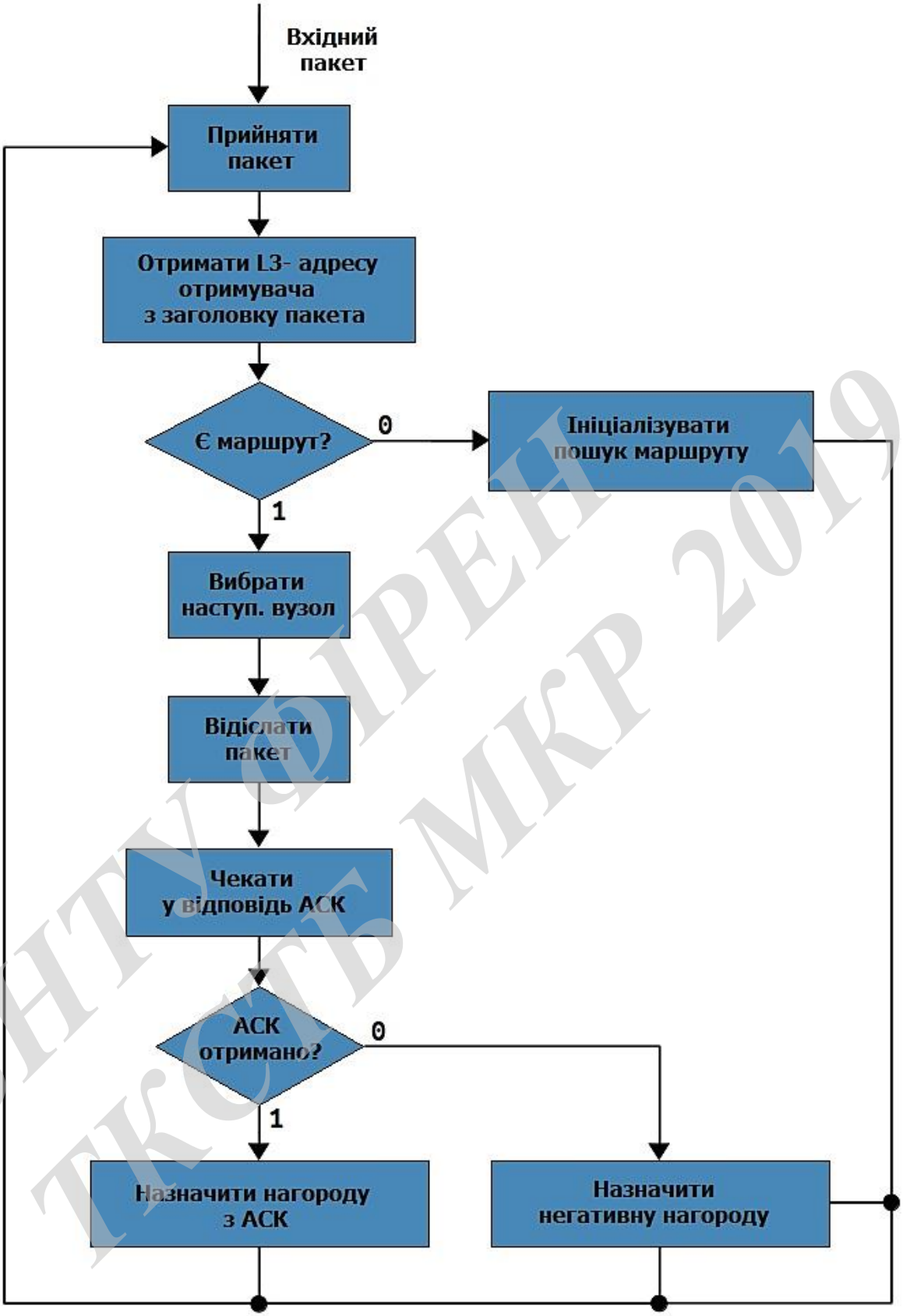
Інакше, якщо вузол-відправник не одержав повідомлення ACK в рамках заданого інтервалу затримки, то вузол вважає передачу пакета невдалою і оновлює відповідний маршрут негативним значенням нагороди. Алгоритм генерації нагороди на приймальній стороні грає важливу роль в подальшої ефективності вибору маршруту, так як він фактично задає ступінь "гнучкості" у виборі рішення про передачу пакетів. Наприклад, якщо значення нагород будуть варіюватися від "позитивних" до "негативних" в досить малому інтервалі значень, то вузол мережі не буде вибирати оптимальний маршрут більшу частину часу, що призведе до того, що пакети даних будуть передаватися по неоптимальним шляхах, викликаючи додаткові затримки і збільшуючи ймовірність втрати пакетів. Крім того, в разі якщо узел- відправник не отримає у відповідь ACK повідомлення і потім привласнить

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

занадто високе значення негативної нагороди, то вага відповідного маршруту буде знижуватися занадто повільно, що призведе до повторних втрат пакетів на тому ж самому шляху на наступних ітераціях передачі. І навпаки, якщо значення "позитивну" нагороди буде дуже сильно відрізнятися від значення "негативної" нагороди, то це викличе певну ступінь "Негнучкості" у виборі маршруту, так як маршрут з дуже високим вагою буде вибиратися майже весь час, не даючи можливості альтернативних маршрутах бути обраними, які потенційно, можуть мати кращий маршрут до одержувача.

ACK забезпечує зменшення числа відповідних ACK повідомлень до одиниці на кожний прийнятий пакет даних протягом заданого інтервалу затримки ACK. Таким чином, інтенсивність ACK повідомлень залишається постійною, незалежно від величини інтенсивності вхідного потоку пакетів. Алгоритм генерації нагороди на приймальній стороні грає важливу роль в подальшої ефективності вибору маршруту, так як він фактично задає ступінь "гнучкості" у виборі рішення про передачу пакетів. Якщо пакет з даними або повідомлення ACK були втрачені, то вузол-відправник, після закінчення певного часу очікування, привласнює негативну нагороду за обрану дію і оновлює таблицю маршрутів відповідним чином. Дана проблема є класичною проблемою балансу між процесом дослідження і процесом використання середовища взаємодії з теорії навчання з підкріпленням, яке було більш детально описано в розділі 2. Рисунок 3.4 зображує логічну блок-схему зворотного зв'язку при виборі маршруту для вхідного пакета даних.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019



ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Рисунок 3.4 - Логічна блок-схема зворотного зв'язку при виборі маршруту для вхідного пакета даних

Це ж стосується і негативної нагороди в разі втрати ACK повідомлення - занадто високе значення негативної нагороди може сильно вплинути на вагу потенційно позитивного маршруту в разі, якщо втрати пакетів траплялися лише мала кількість разів. Дана проблема є класичною проблемою балансу між процесом дослідження і процесом використання середовища взаємодії з теорії навчання з підкріпленням, яке було більш детально описано в розділі 2. Таким чином, вкрай важливо знайти баланс між високими і низькими нагородами, а також акуратно задавати негативні значення нагород в разі втрат пакетів. У розробленій схемі маршрутизації, генерація значень нагороди здійснюється наступним чином - коли вузол отримує пакет з даними від вузла-джерела, він обчислює значення нагороди за наступною формулою:

$$\begin{cases} Q_n = \frac{Q_{avg}}{|RSSI|}, \ if\ RSSI \neq 0 \\ Q_n = 10 \cdot Q_{avg}, \quad if\ RSSI = 0 \end{cases}, \tag{3.4}$$

де: $Q_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{DST_{IP_i}}}{N_{values}}$ - середнє значення очікуваної нагороди, що посилається в сторону відправника, і обчислюється з таблиці маршрутів поточного вузла;

$Q_{DST_{IP_i}}$ - очікувана нагорода при виборі вузла-сусіда в бік і-го адреса- одержувача (DST_IP);

N_{values} - загальна кількість вузлів-сусідів в сторону адреси одержувача (Кількість всіх можливих дій).

Діапазон значень нагород варіюється від 0 до 100. Значення негативною нагороди одно -1. Після прийому ACK повідомлення, вузол-відправник отримує якесь узагальнене уявлення про те, наскільки добре вибраний сусід підходить для маршрутизації переданого пакета даних або, іншими словами, наскільки гарні маршрути до адресата у обраного вузла-сусіда. якщо отримане значення нагороди є високим, то це може означати, що обраний вузол знаходиться поблизу вузла-адресата або має багато хороших маршрутів до нього. І навпаки, якщо отримане значення нагороди є низьким, то обраний вузол може знаходитися далеко від адресата або мати занадто обмежене кількість можливостей переслати прийнятий

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

пакет далі в бік узла- одержувача. В кожному окремому випадку, вузол-відправник оновлює свою таблицю маршрутів.

У разі, якщо пакет з даними або повідомлення ACK були втрачені, то вузол-відправник, після закінчення певного часу очікування, привласнює негативну нагороду за обрану дію і оновлює таблицю маршрутів відповідним чином. Як було описано вище, діапазон значень нагород варіюється від 0 до 100. Значення негативною нагороди встановлено на значенні -1, за замовчуванням.

3.4 Алгоритм вибору маршруту

Пропонований алгоритм вибору маршруту грунтується на методі зваженого дії, описаного в розділі 2.4. В основі цього методу лежить імовірнісний розподіл *Гіббса-Больцмана* , яке описується формулою (2.1) (див. розділ 2.4).

Високе значення *параметра температури* τ зрівнює ймовірності вибору дій, в той час як низька температура - задає велику різницю в ймовірності, в залежності від значення очікуваної нагороди. При τ→0 *зважений* метод перетворюється в *жадібний*.

У контексті поставленого завдання маршрутизації, *параметр температури* визначає наскільки висока ймовірність вибору маршруту з максимальною значенням очікуваної нагороди. Даний параметр пропонується динамічно змінювати його в залежності від поточного *відсотка втрат пакетів на лінк* (PLR), а саме:

$$\begin{cases} \tau(PLR) = 10, & if\ PLR \leq 1 \\ \tau(PLR) = 10 \cdot k \cdot (PLR - 1) + 10, & if\ PLR > 1 \end{cases}, \quad (3.5)$$

де: $PLR = \frac{N_{lost\_packets}}{N_{total\_sent\_packets}}$ - відсоток втрат пакетів (Packet Loss Ratio), заданий в діапазоні значень [0, 100];

τ - параметр температури з розподілу Гіббса-Больцмана;

k - пропонований *коефіцієнт зростання*, рівний 0,5 за замовчуванням.

Рисунок 3.5 демонструє розподіл ймовірностей вибору вузлів в залежності від PLR

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

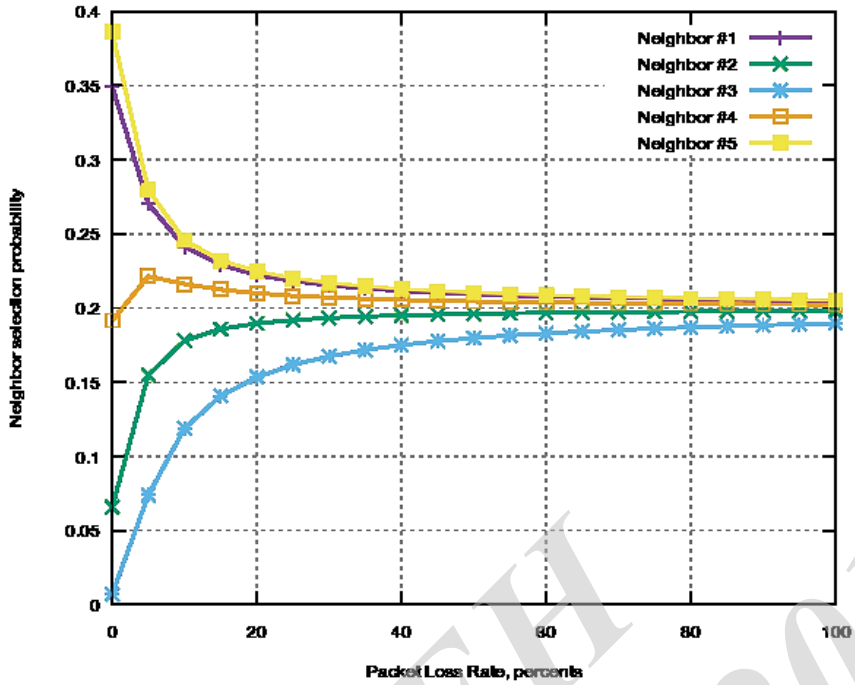


Рисунок 3.5 - Розподіл ймовірностей вибору вузлів 1-5 в залежності від PLR;

P(0) = {#1 : 0.35, #2 : 0.07, #3 : 0.01, #4 : 0.2, #5 : 0.37}

На рисунку 3.5 показаний приклад пропонованої залежності ймовірностей вибору вузла-сусіда від відсотка втрат пакетів (PLR) на прикладі 5 вузлів-сусідів. На етапі первинного розподілу ваг маршрутів, вузли отримали наступні значення Q:

Q(n) = {n1 : 50.0, n2 : 33.3, n3 : 11.1, n4 : 44.0, n5 : 51.0}

Застосувавши розподіл Гіббса-Больцмана, були отримані відповідні ймовірності вибору даних вузлів-сусідів P:

P(a) = {n1 : 0.35, n2 : 0.07, n3 : 0.01, n4 : 0.2, n5 : 0.37}

При зростанні числа втрачених пакетів, дані ймовірності пропонується динамічно змінювати відповідно до формули (3.5), як проілюстровано на рисунку 3.5.

Даний алгоритм дозволяє динамічно змінювати ймовірності вибору маршрутів з різними вагами (тобто, зі значеннями очікуваної нагороди) в залежності від поточних умов, таких як: інтенсивність вхідного трафіку, ступінь мобільності вузлів, інтерференція і так далі. Чим вище значення, тим ймовірність вибору альтернативних маршрутів збільшується, що дає можливість досліджувати

ВНТУ ФІРЕН ТКСТВ МКР 2019

мережу на наявність інших, можливо більш ефективних маршрутів до даного адресата. У свою чергу, якщо якість линка на маршруті з найбільшою вагою поліпшується, то інтуїтивно зрозуміло, що даний маршрут повинен бути використаний як можна частіше, що здійснюється при допомоги зменшення параметра температури.

3.5 Аналітичний опис розробленого алгоритму

Поставлена задача маршрутизації трафіку в бездротової многоузловой мережі, з точки зору теорії машинного навчання з підкріпленням, може бути представлена в якості кінцевого *марковского процесу прийняття рішення* (*Finite Markov Decision Process - MDP*), на якому засновано 90% подібних задач [18].

Як було показано в розділі 1, даний процес може бути описаний з допомогою двох основних множин, що відображають безліч дій $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, і безліч станів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, в яких знаходиться система в даний момент часу. Відповідно, ймовірність переходу з поточного стану s в стан s ', виконавши якусь дію a, можна висловити наступним чином:

$$P^a_{SS'} = Pr\{S_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a\}, \quad (3.6)$$

Дані ймовірності часто називають *вірогідністю переходу* (*transition probabilities*). Подібним чином, можна висловити очікуване значення нагороди за обрану дію a, при переході зі стану s в стан s ':

$$R^a_{SS'} = E\{r_{t+1} | s_t = s, a_t = a, s_{t+1} = s'\}, \quad (3.7)$$

Вирази $P^a_{SS'}$ та $R^a_{SS'}$ повністю описують динаміку переходів марковского процесу прийняття рішення для даного завдання.

На рисунку 3.6 показаний процес передачі пакета даних до наступного вузлу-сусідові, зі зворотним зв'язком у вигляді ACK-повідомлення, що містить нагороду за виконану дію.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

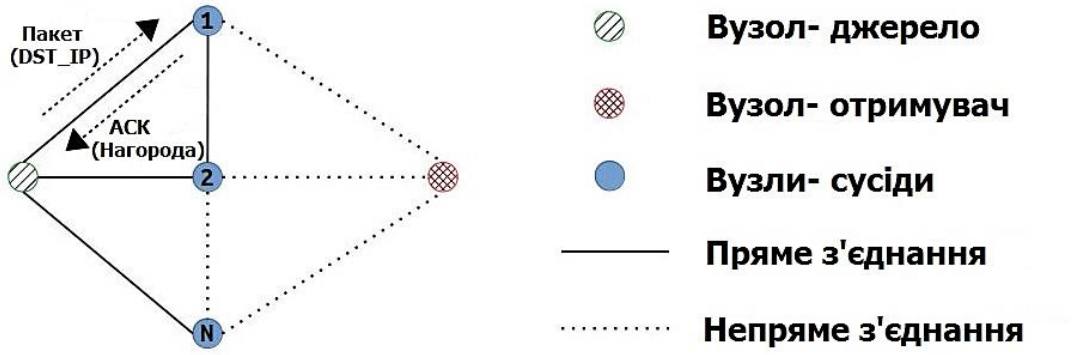


Рисунок 3.6 - Процес передачі пакету вузлу-сусідові зі зворотним ACK-сполученням з нагородою

Як можна помітити, з точки зору вузла, який переслав пакет, можна виділити 2 основні стани:

1) пакет успішно переданий:

Даний стан настає у випадку, якщо вузол передав пакет сусідові і успішно прийняв зворотне повідомлення ACK.

2) пакет втрачено:

Даний стан настає, якщо вузол передав пакет даних сусідові, але не отримав зворотне ACK повідомлення. Така подія може наступити в декількох випадках:

- пакет даних був втрачений в процесі передачі по бездротовому каналу;
- пакет даних був прийнятий вузлом-сусідом, але зворотне ACK повідомлення було втрачено в процесі передачі;
- вузол-сусід став недоступний в мережі (через переміщення, відключення, перевантаження і т.п.).

У всіх перерахованих вище випадках, вузол-відправник вважає процес передачі пакета до сусіда неуспішним.

Таким чином, безліч станів вузла-відправника може бути виражено, як:

$$S = \{s_1, s_2\}, \tag{3.8}$$

де: s_1 - пакет успішно переданий;

s_2 - пакет потерян.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

З точки зору можливих дій, які може зробити вузол- відправник, то можна виділити 2 основних дії:

1) вузол відправляє пакет:

Ця дія означає, що вузол-відправник обрав наступного узла- сусіда для передачі пакета і виконав процес передачі. Дана дія виконується в більшості випадків, коли відправляє вузол має актуальну інформацію про маршрут до адреси призначення, зазначеного в даному пакеті, а також не має ніяких перевантажень трафіку.

2) вузол видаляє пакет:

Дана дія означає, що вузол-відправник з якоїсь причини не має можливості вибрати наступний вузол для передачі даного пакета. Таке подія може відбутися в разі, якщо:

- вузол-відправник не має жодного вузла-сусіда в зоні досяжності;

- вузол-відправник не має актуальної інформації про маршрут до даного адреси одержувача;

- оновлення маршрутної інформації (наприклад, через процедуру пошуку маршруту) закінчується невдачею - наприклад, адреса одержувача більше не існує в мережі;

- буфер прийому вузла-відправника переповнений - наприклад, через високу інтенсивності вхідного трафіку.

Таким чином, безліч дій вузла-відправника може бути виражено, як:

$$A = \{a_1, a_2\}, \tag{3.9}$$

де: a_1 - відправити пакет;

a_2 - видалити пакет.

Згідно виразами (3.8) і (3.9), позначимо ймовірності переходів з станів і величини очікуваних нагород за вибраних дій, відповідно:

α - ймовірність переходу зі стану s1 в s1;

(1- α) - ймовірність переходу зі стану s1 в s2;

β - ймовірність переходу зі стану s2 в s2;

(1- β) - ймовірність переходу зі стану s2 в s1.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Безліч значень очікуваних нагород за дані переходи описується виразом:

$$R \in \{R_{1-1}, R_{1-2}, R_{2-2}, R_{2-1}\}, \quad (3.10)$$

де: R_{1-1}, - нагорода за успішну передачу пакета. Дану нагороду пропонується розраховувати згідно з формулою (3.4);

R_{1-2}, - нагорода за одиничну невдалу передачу пакета. Дана нагорода має фіксоване значення за замовчуванням:

$R_{1-2} = -1, n = 1,$

n - кількість невдалих спроб передачі.

R_{2-2} - нагорода за повторні невдалі спроби передачі пакета. Дане значення нагороди пропонується знижувати за експоненціальним законом, в залежності від кількості невдалих спроб передачі поспіль, при $n \geq 2$:

$$R_{2-2} = f(n) = -1 \cdot e^{\frac{n-1}{2}}, n \geq 2, \quad (3.11)$$

Графік залежності нагороди $R_{2-2} = y = f(x)$ від числа неуспішних передач x, при $x \in [1, \infty)$ показаний на рисунку 3.7

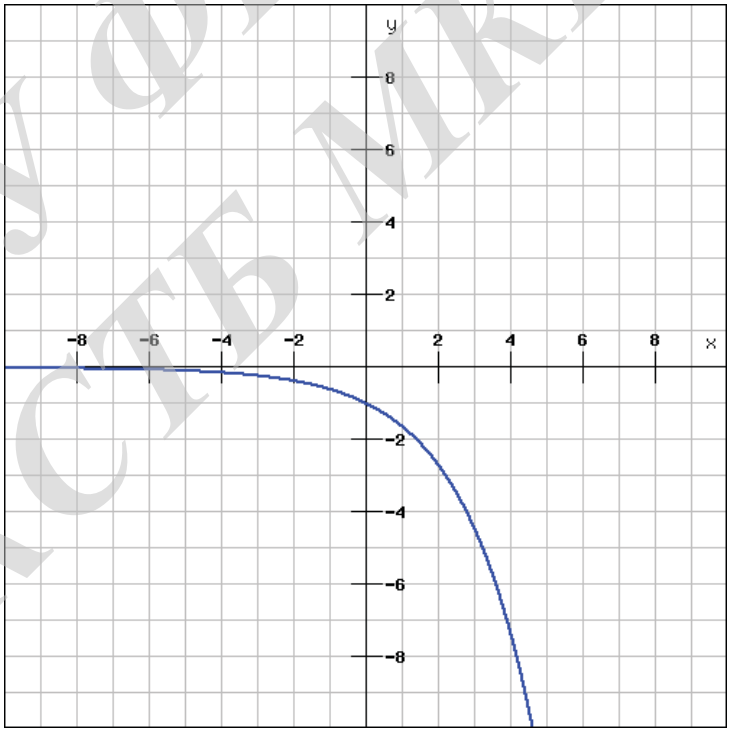


Рисунок 3.7 - Графік залежності нагороди $R_{2-2} = y = f(x)$ від числа неуспішних передач x, при $x \in [1, \infty)$

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

R_{2-1} - нагорода за успішну передачу пакета. Якщо вузол-відправник зміг успішно передати пакет після неуспішної попередньої передачі, то йому присвоюється позитивна нагорода, яка дорівнює R_{1-1} (формула (3.4)).

Динамічна зміна (зменшення) нагороди R_{2-2} зі збільшенням кількості невдалих спроб передачі поспіль дозволяє швидше реагувати на події неуспішною передачі і більш оперативно переключатися на альтернативні маршрути в мережі, що особливо доцільно в бездротових мережах з нестійкою топологією і зашумленими каналом передачі.

На рисунку 3.8 показаний граф переходів між станами системи в Залежно від обраного дії. Тут безліч станів зображується як окружність, а всі можливі дії - як стрілки з напрямком в сторону кінцевого стану. Кожна стрілка, що відображає ту чи іншу дію, має підпис у вигляді величини ймовірності переходу в заданий стан - $P_{SS'}^{a}$, а також значення нагороди, яке буде отримано при виконанні даного дії - $R_{SS'}^{a}$, Іншими словами, кожна стрілка відповідає набору $\{A, P_{SS'}^{a}, R_{SS'}^{a}\}$, де s '- наступний стан. Сума ймовірностей переходу для кожної дії дорівнює 1.

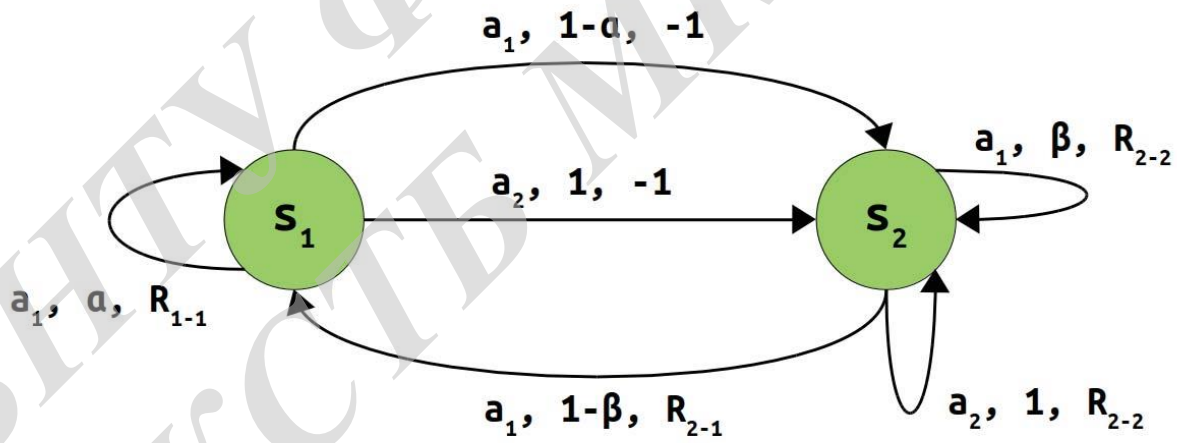


Рисунок 3.8 - Імовірнісний граф станів переходів $\{A, P_{SS'}^{a}, R_{SS'}^{a}\}$

Всі переходи між станами і відповідні значення нагород представлені в таблиці 3.2. Кожен рядок таблиці являє собою комбінацію поточного стану s, наступного стану s ', а також можливого дії $a \in A(s)$.

Таким чином, отримуємо матрицю ймовірностей переходів для дій a_1 і a_2 відповідно:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

$$P_{SS'}^{a}(a_1) = \begin{bmatrix} \alpha & 1-\alpha \\ 1-\beta & \beta \end{bmatrix}; P_{SS'}^{a}(a_2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

Матриця нагород за виконані дії виглядає наступним чином:

$$R_{SS'}^{a}(a_1) = \begin{bmatrix} R_{1-1} & -1 \\ R_{2-1} & R_{2-2} \end{bmatrix}; R_{SS'}^{a}(a_2) = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & R_{2-2} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

Таблиця 3.2 - Переходи між станами і значення нагород

Поточний стан: $s = s_t$	Наступний стан: $s' = s_{t+1}$	Вибрана дія: $a = a_t$	Імовірність переходу: $P_{SS'}^{a}$	Значення очікуваної нагороди: $R_{SS'}^{a}$
Пакет успішно передано (s_1)	Пакет успішно передано (s_1)	Відправити пакет (a_1)	α	R_{1-1}
Пакет успішно передано (s_1)	Пакет втрачено (s_2)	Відправити пакет (a_1)	1-α	-1
Пакет втрачено (s_2)	Пакет успішно передано (s_1)	Відправити пакет (a_1)	1-β	R_{2-1}
Пакет втрачено (s_2)	Пакет втрачено (s_2)	Відправити пакет (a_1)	β	R_{2-2}
Пакет успішно передано (s_1)	Пакет успішно передано (s_1)	Видалети пакет (a_2)	0	-
Пакет успішно передано (s_1)	Пакет втрачено (s_2)	Видалети пакет (a_2)	1	-1
Пакет втрачено (s_2)	Пакет успішно передано (s_1)	Видалети пакет (a_2)	0	-
Пакет втрачено (s_2)	Пакет втрачено (s_2)	Видалети пакет (a_2)	1	R_{2-2}

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Значення ймовірностей переходів α і β можуть бути отримані експериментально, виходячи з характеристик і типу трафіку в досліджуваній мережі, за такими формулами:

$$\alpha = \frac{N_{successful}}{N_{total}} , \quad (3.14)$$

$$\beta = \frac{N_{failed}}{N_{total}} , \quad (3.15)$$

де: $N_{successful}$ - число поспіль успішно переданих пакетів;

N_{failed} - число поспіль втрачених пакетів;

N_{total} - сумарне число пакетів.

Згідно експериментам, значення ймовірностей переходів α і β для мережі, рівні 0,993 і 0,002 відповідно.

3.6 Програмна імплементація розробленого алгоритму

В цьому розділі дано опис імплементації програмної частини розробленого протоколу маршрутизації, включаючи описи форматів сервісні повідомлення, розташування в стеці TCP / IP [56], опис процедури обслуговування широкомовних, а також односторонніх пакетів, що приходять з рівня додатки моделі OSI. Крім того, описана схема обміну службовими ARQ (ACK) повідомленнями для службових і призначених для користувача даних, а також дано опис основних програмних потоків, що відповідають за прийом і передачу даних від / до рівня додатки і в сторону мережевого інтерфейсу.

Програмна імплементація розробленого алгоритму маршрутизації реалізована на мові програмування Python 2.7 і працює на обчислювальних пристроях на базі операційної системи Лінукс [40], мають або провідні IEEE 802.3 Ethernet, PLC, або бездротові мережеві інтерфейси IEEE 802.11 Wi-Fi [10] або IEEE 802.15.4 [12].

Розроблений протокол базується на стандартному стеку мережевих протоколів TCP / IP з підтримкою IPv4 і IPv6 адресації. Крім того, протокол незалежний від вищестоящих (L4) і нижчих (L2, L1) рівнів моделі OSI, що робить

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

його універсальним рішенням для маршрутизації пакетного трафіку в мережах з будь-якими топологиями, типами трафіку, а також середовищами передачі (як дротовими, так і бездротовими).

Протокол надає два основних мережевих інтерфейсу для комунікації з верхнім рівнем додатки, що базується на протоколах транспортного рівня TCP або UDP, а також для комунікації з сусідніми вузлами через наявний реальний фізичний мережевий інтерфейс. При запуску протоколу маршрутизації, в середовищі операційної системи Лінукс створюється віртуальний мережевий інтерфейс tun [63], званий adhoc0, по-замовчуванню. Після того, як мережевими засобами ОС Лінукс, віртуального інтерфейсу adhoc0 буде присвоєно IPv4 або IPv6 адресу, додаток може посилати дані в мережу, використовуючи стандартні socket-інтерфейси [64] ОС Лінукс. В якості фізичного (реального) мережевого інтерфейсу, що використовується безпосередньо для передачі і прийому пакетів, оброблених на інтерфейсі adhoc0, можуть бути використані будь-які доступні на даний момент інтерфейси, такі як wlan0, bt0, eth0 і т.д.

На рисунку 3.10 показаний принцип роботи реальної програмної імплементації розробленого протоколу маршрутизації. протокол приймає пакет даних з боку додатка через віртуальний інтерфейс adhoc0, обробляє його в залежності від даного IP адреси одержувача, вставляє власний заголовок в пакет даних між рівнями L2 і L3, і посилає пакет в мережу, використовуючи фізичний інтерфейс (наприклад, wlan0). На приймаючій стороні, мережевий вузол приймає вхідний пакет з фізичного інтерфейсу і здійснює його обробку відповідно до інформації, що міститься в заголовку. У разі, якщо вузол-одержувач приймає пакет даних, який спочатку призначався йому, то даний пакет надсилається вгору по мережевому стеку до рівня додатки.

Власний заголовок протоколу (RLRP) впроваджується в кожен пакет, що надходить на віртуальний інтерфейс adhoc0 і видаляється в разі, якщо пакет даних необхідно передати з інтерфейсу adhoc0 в сторону мережевого додатки (рис. 3.9).

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

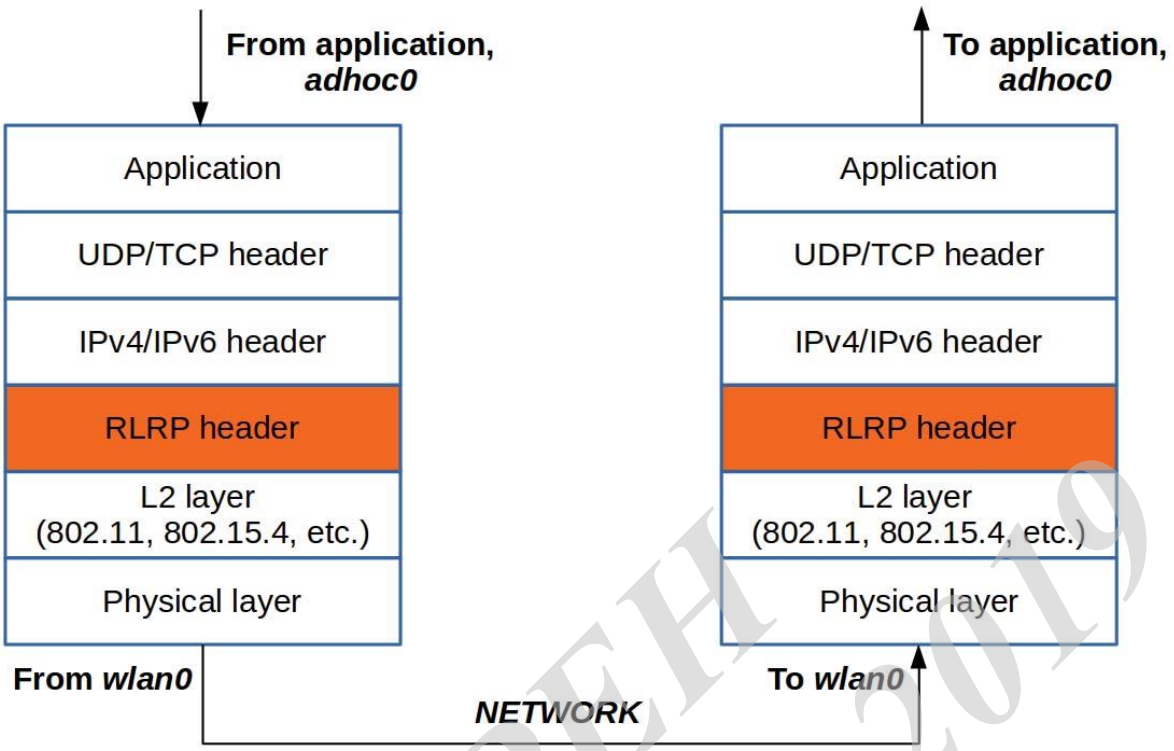


Рисунок 3.9 - Розташування службового заголовка (RLRP) в пакеті даних

Розмір заголовка залежить від типу прийнятого пакета - широкомовний / одностороння пакет даних, або службові повідомлення RREQ / RREP. У таблиці 3 наведено список всіх можливих заголовків протоколу, відображають той чи інший тип переданих повідомлень.

Узагальнена структура розробленого протоколу з основними програмними модулями представлена на рисунку 3.10. Далі будуть описані процедури обробки широкомовних пакетів, пошуку сусідів, а також механізму ARQ, що забезпечує надійну доставку повідомлень до сусіднього вузла.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

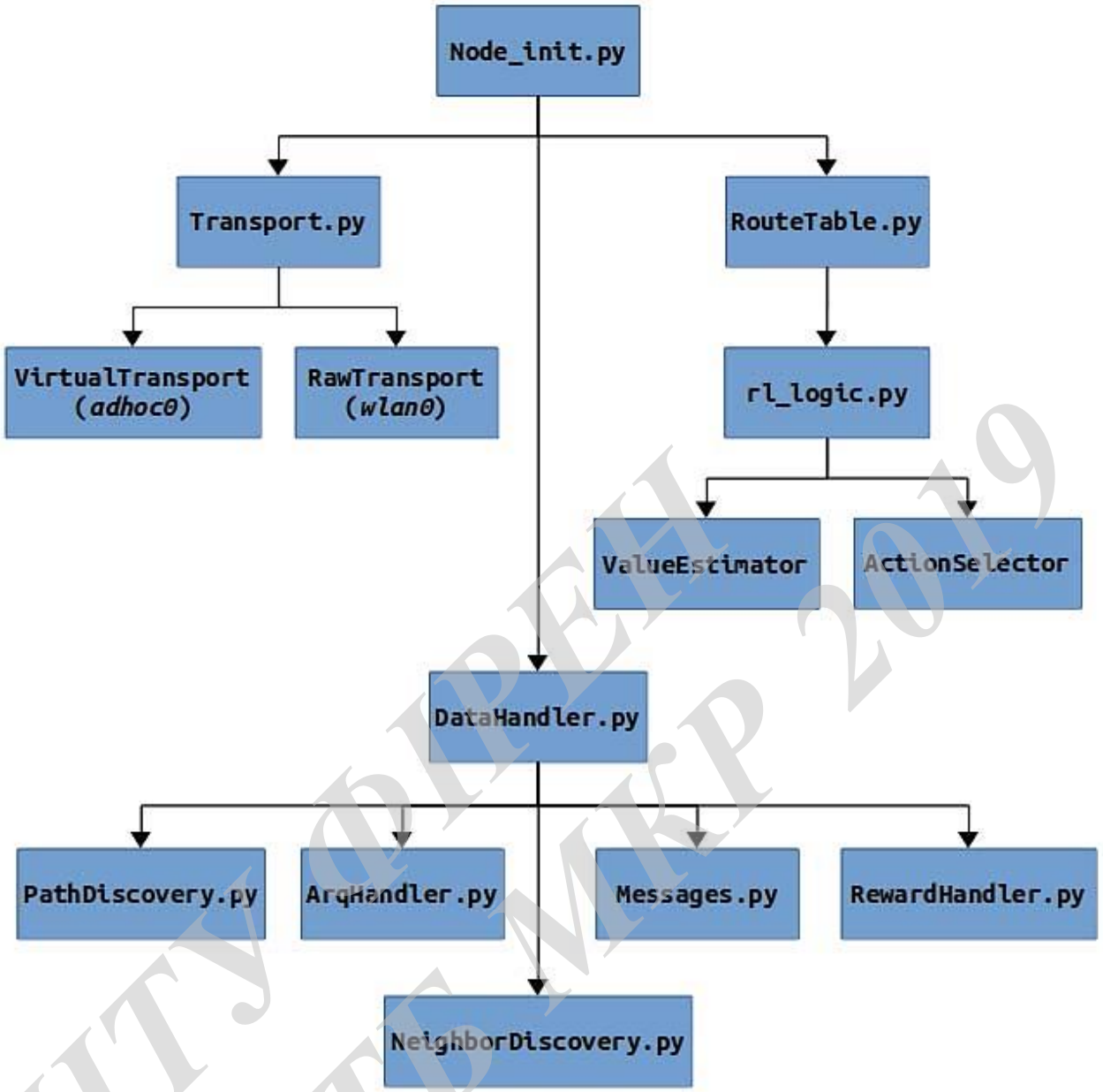


Рисунок 3.10 - Узагальнена схема ініціалізації модулів програмної імплементації протоколу

У багатьох випадках, мережеві додатки можуть генерувати і посилати в мережу широкомовні пакети даних для здійснення тієї чи інших мережевих функцій, наприклад - широкомовний ping [35], мультікастового пакети протоколу IGMP [40], IPv6 авто-пошук (auto-discovery) [37], запити ARP [38], DHCP [39] і так далі. На відміну від односпрямованих пакетів даних, які обробляються основним алгоритмом маршрутизації, широкомовні пакети даних не потребують класичною

ВНТУ ФІРЕН ТКСТВ МКР 2019

процедурою маршрутизації, так як не мають спочатку заданого адреси одержувача. Основною ідеєю мережевої широкомовної передачі, включаючи поняття IP мультикаст (multicast), є поширення однорідної інформації від одного або декількох вузлів до деякого безлічі вузлів даної мережі, що має на увазі відсутність будь-якого конкретного адреси вузла-одержувача. Тому, застосування традиційних схем маршрутизації для широкомовних повідомлень не має сенсу, так як це призведе до експоненціального зростання числа повторних передач дубльованих пакетів даних, а також відповідних повідомлень RREQ / RREP, знижуючи продуктивність мережі до нуля. Для того, щоб ефективно пересилати широкомовні пакети даних, що приймаються з рівня мережевого додатки, розроблений протокол маршрутизації має механізм детектування широкомовних повідомлень, який дозволяє пересилати дані повідомлення далі в мережу без використання основної схеми маршрутизації. Крім того, рівень завантаженості мережі через широкомовних повідомлень регулюється за допомогою параметра *max_broadcast_ttl*, який задає максимальне число пересилань широковещательного пакета. За замовчуванням, значення *max_broadcast_ttl* дорівнює 1. Ця функція імплементована в модулі DataHandler.py (див. Рис. 3.10).

Процедура виявлення вузлів-сусідів реалізована в модулі *NeighborDiscovery.py*, який забезпечує оновлення інформації про поточні вузлах мережі, що знаходяться в безпосередній близькості до даного вузла. Дана процедура реалізована за допомогою періодичної розсилки спеціального широкомовного повідомлення - HELLO-повідомлення, яке розсилається в мережу кожні 2 секунди, по-замовчуванню. Це означає, що інформація про вузли-сусіди оновлюється кожні 2 секунди на всіх суміжних вузлах мережі. наприклад, якщо вузол мережі перестав приймати HELLO-повідомлення з одного з сусідніх вузлів, то відповідний запис в маршрутної таблиці даного вузла буде видалена. І навпаки, якщо вузол почав отримувати HELLO-повідомлення від раніше невідомого вузла, то маршрутна таблиця оновиться відповідним чином. Процедура виявлення вузлів-сусідів грає важливу роль в продуктивності протоколу маршрутизації, так як вона може значно знизити ймовірність вибору "застарілого" маршруту в умовах

ВПУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

динамічної мережевої топології. Очевидно, що чим менше період розсилки HELLO-повідомлень, тим актуальніше маршрутна інформація у суміжних вузлів мережі, однак, занадто малий період розсилки HELLO-повідомлень призводить до високого завантаження мережі службовими повідомленнями, що знижує загальну продуктивність мережі в контексті загальної пропускної здатності призначеного для користувача трафіку. Даний параметр інтервалу періодичної розсилки називається broadcast_interval (рівний 2-м секундам, по- замовчуванням). Цей параметр може динамічно підлаштовуватися під поточну топологію, мобільність і загальні умови передачі в бездротової многоузловой мережі.

Модуль *ArqHandler.py* реалізує власний ARQ механізм ретрансляції пакетів даних при їх передачі від поточного вузла до наступного вузла-сусідові, що забезпечує надійну доставку службових, а також призначених для користувача повідомлень по мережі. Механізм ARQ стає важливим елементом протоколу маршрутизації в умовах застосування в бездротових багатовузлових мережах з високою ймовірністю втрат пакетів на лінк. механізм забезпечує гарантовану доставку важливих службових повідомлень (RREQ і RREP, в Зокрема) на етапі первинного пошуку маршруту, а також призначених для користувача даних. Іншими словами, реалізована процедура ARQ надає додатковий рівень надійності передачі повідомлення на "лінк", тобто - від вузла до вузла, але не забезпечує загальну надійність всього з'єднання, яке реалізується на вищих транспортних протоколах, наприклад TCP [38]. Опціонально, дана схема ARQ може бути застосована для призначеного для користувача одностороннього трафіку (для UDP і TCP), що збільшить надійність з'єднання, оскільки зменшить втрати пакетів на ланках маршруту. збільшена надійність з'єднання значно покращить інтерактивність таких мережевих додатків, як SSH [40], які дуже чутливі до втрат пакетів через використання протоколу TCP. Варто відзначити, що додаткове застосування механізму ARQ зменшує ймовірність втрати пакетів на ланці маршруту, проте збільшує загальне значення затримки і джиттера пакетів на з'єднанні. Однак, для транспортного протоколу TCP, зокрема, більш важливим параметром є саме загальний відсоток втрат пакетів, так як додаткові ретрансляції

ВПУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

TCP-потоків є "дорогими" з точки зору загальної затримки з'єднання. Таким чином, пропонована схема ARQ є корисної для застосування на призначеному для користувача трафіку, що використовує саме транспортний протокол TCP, особливо в умовах ненадійної бездротової середовища передачі з високими значеннями двосторонньої затримки (RTT).

Поточна імплементація протоколу маршрутизації надає можливість застосовувати механізм ARQ для конкретного типу користувальницького односпрямованого трафіку, для чого використовується прапор ENABLE_ARQ в файлі конфігурації conf.py. Тип користувача трафіку, для якого необхідно застосувати механізм ARQ, задається параметром ARQ_LIST, представленого в типі даних *словник (dictionary)* мови програмування Python [39]:

{UDP / TCP: {port numbers}}.

Таблиця 3.3 містить повний список всіх можливих заголовків пакетів, відображають той чи інший тип переданого повідомлення. більш детальна структура кожного заголовка представлена в описі до модуля Messages.py, де кожен заголовок виражений в структурі даних Ctype мови програмування Python [39]. Заголовки розробленого протоколу представлені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 - Список заголовків повідомлень розробленого протоколу

Ідентифікатор типу заголовка	Назва заголовка	Довжина, байт	Опис
0	Односпрямований заголовок	4	Односпрямований (unicast) призначений для користувача пакет даних
1	Широкомовний заголовок	4	Широкомовний (broadcast) призначений для користувача пакет даних
2	RREQ4 заголовок	12	Повідомлення "запит маршруту" для IPv4 трафіку
3	RREQ6 заголовок	36	Повідомлення "запит маршруту" для IPv6 трафіку

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Продовження таблиці 3.3

4	RREP4 заголовок	12	Повідомлення "відповідь маршруту" для IPv4 трафіку
5	RREP6 заголовок	36	Повідомлення "відповідь маршруту" для IPv6 трафіку
6	HELLO заголовок	4 ~ 56*	Службове широковещательное HELLO-повідомлення
7	ACK заголовок	8	Зворотне ACK повідомлення для надійної доставки повідомлення
8	Reward заголовок	8	Зворотне повідомлення-нагорода за обраний маршрут
9	ARQ заголовок	4	Призначений для користувача пакет даних, переданий з механізмом ARQ

* - довжина HELLO-заголовка варіюється в залежності від кількості IPv4 і IPv6 адрес, присвоєних вузлу мережі в один момент часу. Максимальне кількість IPv4-адрес: 1; максимальну кількість IPv6-адрес: 3.

3.7 Методика оцінки продуктивності протоколів маршрутизації в умовах реальної мережі

Для оцінки продуктивності розробленого протоколу маршрутизації, а також для його порівняння з існуючим протоколом B.A.T.M.A.N., в реальному тестової мережі були виміряні показники продуктивності мережі а саме:

- середня двостороння затримка на маршруті (RTT);
- середнє значення відсотка втрат пакетів на маршруті (PLR);
- середній час відновлення маршруту (RRT, Route Recovery Time).

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Для оцінки відсотка втрат пакетів, часу двосторонньої затримки (RTT), а також часу відновлення маршруту (RRT), було використано мережевий додаток ping.

У процесі тестування було визначено мережева сесія, під час якої здійснювався процес передачі пакетів від вузла-джерела до вузла-одержувача. Кожна сесія мала наступні характеристики:

• ICMP трафік:

- тривалість сесії: 100 секунд;

- кількість сесій (повторень): 100 сесій.

Значення двосторонньої затримки (RTT) являє собою величину часу передачі пакету даних від джерела до одержувача і назад. Дана характеристика грає важливу роль в оцінці якості з'єднання і є однією з метрик QoS, по якій можна судити про можливості гарантування заданої якості обслуговування в даній мережі передачі даних. значення RTT обчислюється як різниця часових інтервалів посилки ICMP-request пакета і отримання зворотного ICMP-reply повідомлення за допомогою утиліти ping. Процес пересилання ICMP пакетів зображений на рисунку 3.11.

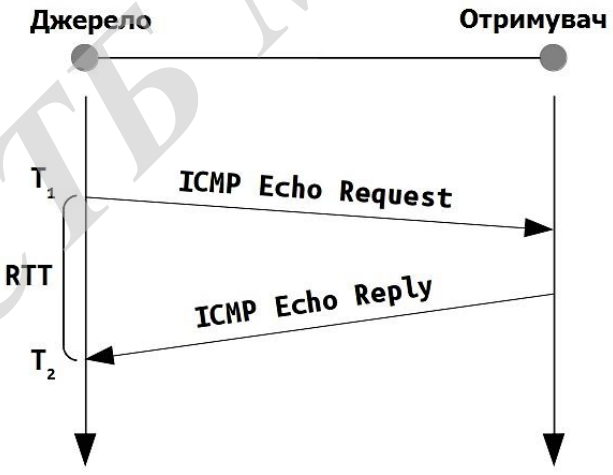


Рисунок 3.11 - Процес обміну ICMP повідомленнями для вимірювання RTT

Таким чином, значення RTT обчислюється за формулою:

$$RTT = T_2 - T_1 \,, \tag{3.16}$$

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

де: T_1 - час відправлення пакета ICMP-request;

T_2 - час прийому пакета ICMP-reply.

Значення відсотка втрат пакетів (Packet Loss Ratio - PLR) показує частку втрачених пакетів із загального числа переданих. даний показник розраховується без механізму надійної доставки пакетів ARQ, що знаходиться на L4 рівні (наприклад, у випадку з TCP), так як передача пакетів здійснюється по протоколу ICMP, який не має ARQ механізмів для повторної передачі втрачених пакетів. Таким чином, отримані значення відсотка втрат пакетів точніше відображають процеси, що відбуваються насамперед на L2 і L1 рівні моделі OSI. Дана метрика обчислювалася за такою формулою:

$$PLR_{avg} = \frac{N_{dropped}}{N_{sent}} \cdot 100 \ , \qquad (3.17)$$

де: $N_{dropped}$ - число втрачених пакетів за сесію;

N_{sent} - загальне число переданих пакетів за сесію.

Значення часу відновлення маршруту (Route Recovery Time - RRT) показує важливу характеристику продуктивності протоколу маршрутизації, яка буде показувати ступінь "гнучкості" алгоритму до динамічних змін мережевої топології, що є критично важливим для забезпечення заданого рівня якості з'єднання на маршруті. час відновлення маршруту визначається як різниця в часі між подією зміни топології (поломки маршруту) і подією встановлення нового маршруту в змінилася топології, і може бути розрахована як:

$$RRT = T_{route\_change} - T_{new\_route} \ , \qquad (3.18)$$

де: T_{route_change} - момент часу, коли топологія мережі змінилася;

T_{new_route} - момент часу, коли був встановлений новий маршрут.

Варто відзначити, що, в даній роботі, час відновлення маршруту (Route Recovery Time - RRT) обчислювалося в фазі пересилання пакетів - тобто, сеанс передачі пакетів (ICMP пакетів, в даному випадку) був инициализирован по старому шляху, після чого топологія мережі змінювалася, але процес передачі не зупинявся. Момент часу вибору встановлення маршруту (Tnew_route) фіксувався

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

як тільки ICMP пакети з поточного сеансу стали пересилатися поьновому маршруту.

Виходячи з перерахованих вище умов, була проведена серія експериментів на реальній мережі, в ході якої були отримані значеннятобраних параметрів на кожній сесії (повторенні). Середні значеннятотриманих даних обчислювалися за формулою середнього арифметичного значення:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_j \ , \tag{3.19}$$

Значення дисперсії:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(x_j - \bar{X})^2 \ , \tag{3.20}$$

де: σ - середньоквадратичне відхилення (СКО).

Зібрана статистика значень параметрів продуктивності протоколу маршрутизації, отриманих в результаті експерименту, їх середні значення, а також довірчі інтервали представлені нижче.

3.8 Результати експериментів

В результаті проведених експериментів, були отримані наступні середні значення характеристик продуктивності мережі – двосторонньої затримки (RTT), відсотки втрат пакетів (PLR) і часу відновлення маршруту (RRT). Значення дисперсії і довірчих інтервалів показників продуктивності розробленого протоколу маршрутизації (RLRP) і протоколу B.A.T.M.A.N. представлені в таблицях 3.4 і 3.5, відповідно.

Таблиця 3.4 - Значення показників продуктивності мережі з розробленим протоколом маршрутизації

Показник продуктивності	**Середнє значення**	**СКО**	**Довірчий інтервал (Рдов = 0,95; ±2σ)**
RTT, мс	71,7	6,7	$58,3 < \mu < 85,1$
PLR, %	0,7	0,5	$0 < \mu < 1,7$
RRT, секунды	9,6	3,1	$0,4 < \mu < 15,8$

ВІТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Таблиця 3.5 - Значення продуктивності мережі з протоколом маршрутизації B.A.T.M.A.N.

Показник продуктивності	**Середнє значення**	**СКО**	**Довірчий інтервал (Рдов = 0,95; ±2σ)**
RTT, мс	10,5	4,0	$2{,}5 < \mu < 18{,}5$
PLR, %	13,8	5,3	$3{,}2 < \mu < 24{,}4$
RRT, секунды	90,1	19,7	$50{,}7 < \mu < 129{,}5$

На рисунку 3.12 представлена діаграма середніх значень двосторонньої затримки для розробленого протоколу маршрутизації (RLRP) і протоколу B.A.T.M.A.N.

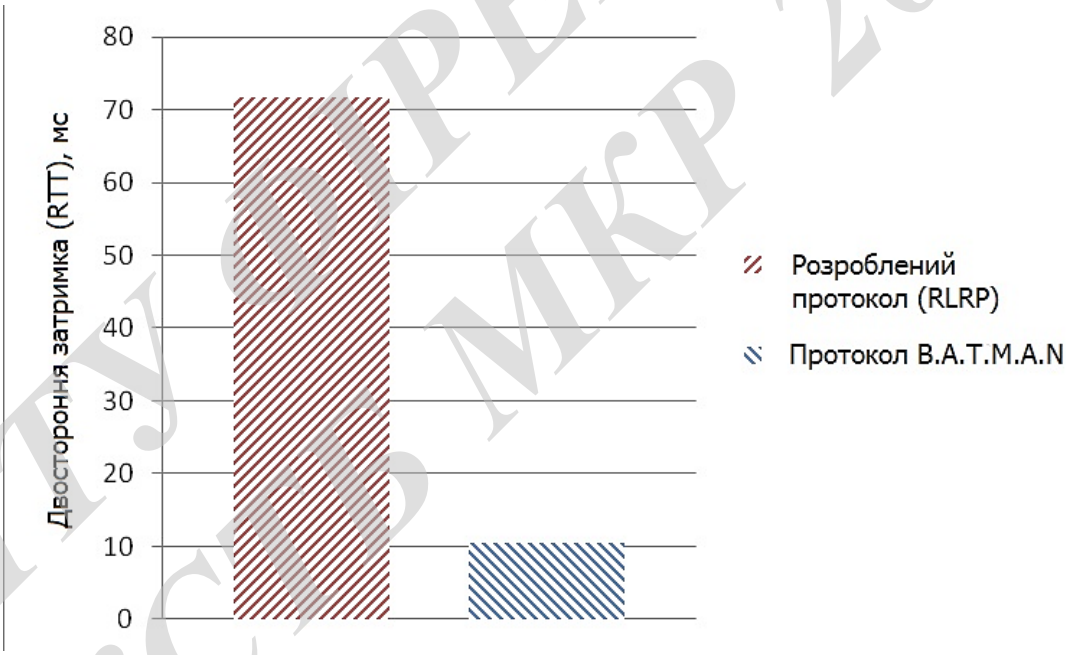


Рисунок 3.12 - Середні значення двосторонньої затримки в маршруті при розробленому протоколі і протоколі B.A.T.M.A.N.

Як видно з діаграми, середнє значення двосторонньої затримки розробленого протоколу вище, ніж у протоколу B.A.T.M.A.N. Це пов'язано, перш за все, з двома факторами:

- *особливості програмної імплементації:*

ВНТУ ОІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Розроблена схема маршрутизації була написана на интерпретируемом мові програмування високого рівня Python, що накладає певні обмеження у швидкодії, перш за все, в процедурах введення / виведення, які є визначальними в швидкості обробки прийнятих пакетів даних. У свою чергу, протокол B.A.T.M.A.N. імплементований на мові програмування C, який є нативним мовою в середовищі операційних систем Unix, що дозволяє вбудовувати системні виклики в процедури введення / виведення, максимально скорочуючи час обробки пакетів даних.

- *особливості алгоритму зворотного зв'язку:*

Розроблена схема маршрутизації спирається на алгоритм зворотного зв'язку, який має на увазі очікування зворотних ACK повідомлень після відправки пакетів даних. У разі втрати пакету, вузол-відправник посилаетпакет повторно після певного часу очікування, який збільшує загальну затримку передачі пакета. У свою чергу, протокол B.A.T.M.A.N. не має схеми зворотного зв'язку і, відповідно, не має додаткової затримки в разі втрати пакета.

На рисунку 3.13 представлена діаграма середніх значень відсотка втрат пакетів (PLR) для розробленого протоколу маршрутизації (RLRP) і протоколу B.A.T.M.A.N.

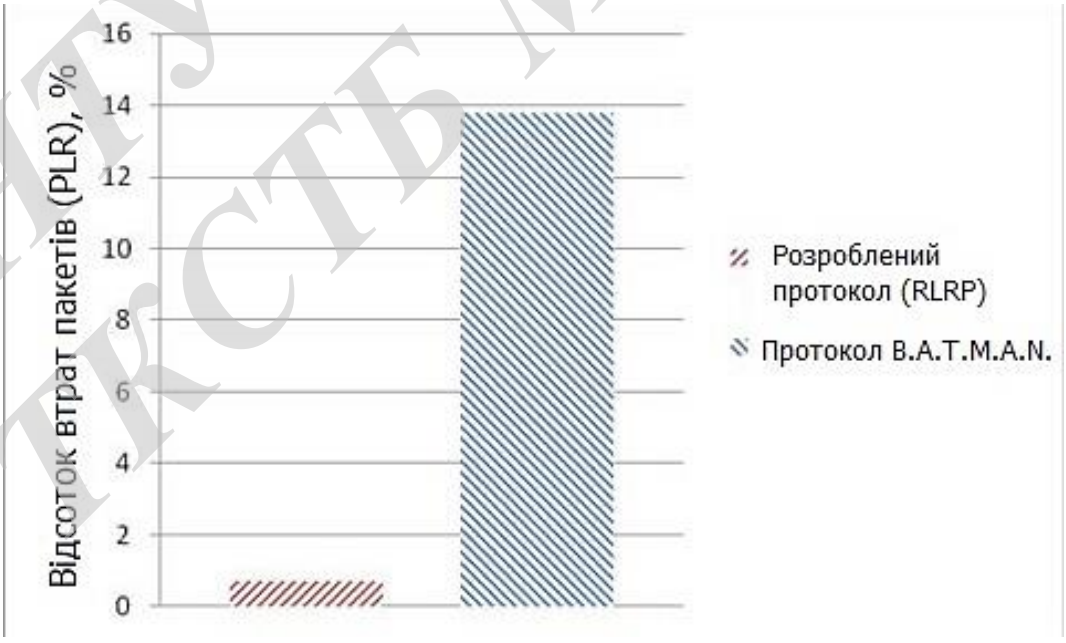


Рисунок 3.13 - Середні значення відсотка втрат пакетів (PLR) в маршруті при розробленому протоколі і протоколі B.A.T.M.A.N.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Як видно з діаграми, середнє значення відсотка втрат пакетів для розробленої схеми маршрутизації менше 1%, в той час як протокол B.A.T.M.A.N. показав середнє значення в районі 14%, що є дуже великим значенням навіть для бездротових мереж передачі даних. Таке розбіжність у значеннях втрат пакетів, перш за все, пов'язано з наявністю схеми зворотного зв'язку в розробленому протоколі, в той час як протокол B.A.T.M.A.N. не має подібної схеми. Це призводить до великих втрат пакетів на маршруті, що негативно позначається на середній пропускної здатності маршруту.

На рисунку 3.14 представлена діаграма середніх значень часу відновлення маршруту для розробленого протоколу маршрутизації (RLRP) і протоколу B.A.T.M.A.N.

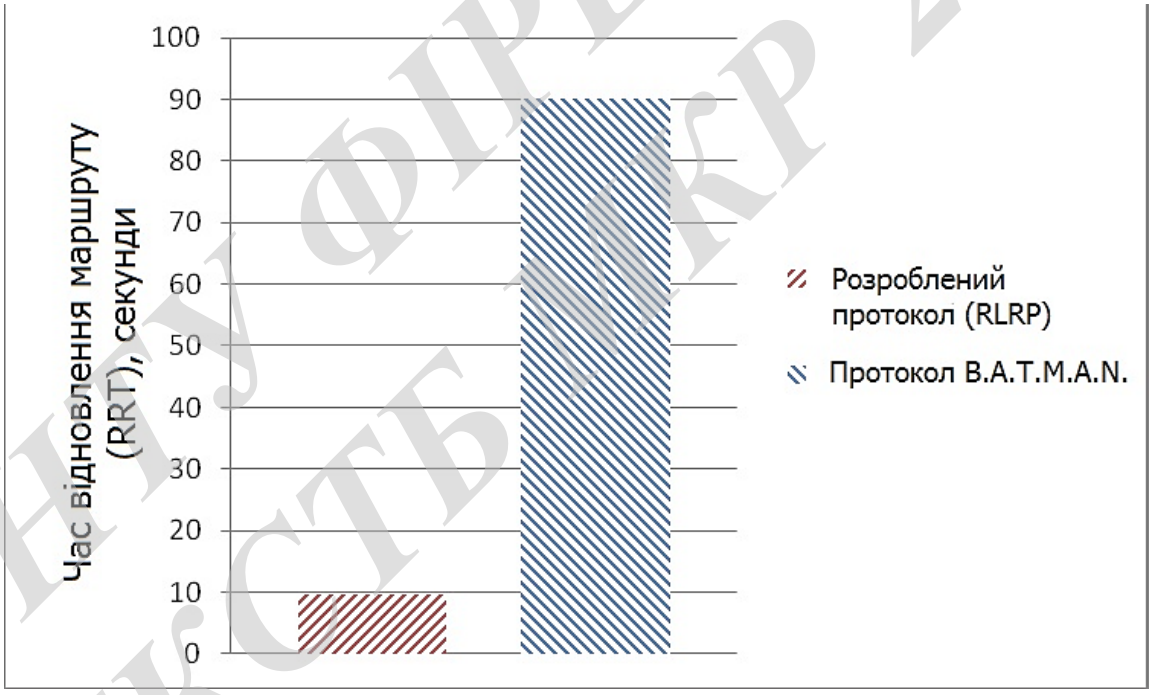


Рисунок 3.14 - Середні значення часу відновлення маршруту для розробленого протоколу маршрутизації (RLRP) і протоколу B.A.T.M.A.N.

Як видно з діаграми, значення часу відновлення маршруту (RRT) для розробленого протоколу набагато нижче, ніж у протоколу маршрутизації B.A.T.M.A.N. Це означає, що розроблені алгоритми вибору маршруту є більш гнучкими і значно швидше знаходять альтернативні маршрути в мережі.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ КР 2019

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Технологічний аудит результатів проведених досліджень

Як було зазначено у попередніх розділах роботи, сьогодні доставка інформації до звичайного користувача у багатьох випадках здійснюється за допомогою бездротових технологій передачі даних на ринку телекомунікацій.

У зв'язку з цим, саме технології бездротової передачі даних мають величезний потенціал для розвитку і постійно знаходять все нові ніші для застосування. Разом з тим, потрібно відзначити, що в контексті бездротових ніздрюватих мереж, інтернету речей і бездротових сенсорних мереж, існує проблема ефективної доставки пакетів даних від вузла-джерела до вузла-одержувача, яка відбувається через безліч проміжних вузлів цієї мережі.

Окрім того, ще багато питань, пов’язаних з встановленням динамічності топології мережі, а також існуючою ненадійністю бездротових каналів передачі, остаточно не розв’язані, що часто викликає високі втрати пакетів інформації на маршруті. Для розв’язання цієї проблеми пропонується застосовувати алгоритми машинного навчання, які добре підходять для вирішення завдань оптимізації заданих параметрів системи при великому масиві вхідних даних.

Тому в ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи нами було проведено дослідження методів і моделей для аналізу і оцінки показників ефективності адаптивної маршрутизації мережі. За результатами проведеного аналізу було розроблено алгоритм, що дозволяє розв’язати поставлену задачу в загальному вигляді, тобто згідно таблиці b1=5. Отримані результати підтвердили залежності та характеристики, отримані раніше для окремих випадків рішення даної задачі, тому b2=5. Тобто нами практично було розв’язано проблему ефективної маршрутизації трафіку в багатовузлових бездротових мережах передачі даних.

Для встановлення рівня комерційного потенціалу результатів проведених нами досліджень проведемо їх технологічний аудит. Для цього запросимо 3-х фахі-

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

вців-експертів, що займаються цієї проблематикою: кандидатів технічних наук Городецьку О.С., Семенову О.О. та Васильківського М.В.

Технологічний аудит був проведений згідно з критеріями, наведеними в таблиці 4.1[41].

Таблиця 4.1 – Критерії за якими проводиться технологічний аудит

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Критерій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Критерій	0	1	2	3	4
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Продовження таблиці 4.1

9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

ВНТУ ФІРЕН ТКСТЬ МКР 2019

Встановлення рівня комерційного потенціалу результатів проведених нами досліджень здійснюється за рекомендаціями, наведеними в таблиці 4.2 [42].

Таблиця 4.2 – Рівні комерційного потенціалу отриманих результатів

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Запрошені експерти оцінили результати проведених нами досліджень за критеріями, які зведено в таблицю 4.3. Оскільки середньоарифметична сума балів, що їх виставили експерти, дорівнює 39-ти балам, то можна зробити висновок, що результати проведених нами досліджень мають рівень комерційного потенціалу, який практично можна вважати «вище середнього».

Таблиця 4.3 – Результати технологічного аудиту отриманих результатів

Критерії	Прізвище, ініціали експерта		
	Городецька О.С.	Семенова О.О.	Васильківський М.В.
	Бали, виставлені експертами:		
1	2	3	3
2	3	3	3
3	3	4	3
4	4	4	2
5	2	3	2
6	3	4	4
7	3	3	3
8	3	4	2

ВНТУ ФРЕН ТКСТБ МКР 2019

Продовження таблиці 4.3

9	4	4	2
10	4	3	4
11	3	4	4
12	4	4	4
Сума балів	$СБ_1 = 38$	$СБ_2 = 43$	$СБ_3 = 36$
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{1}^{3} СБ_i}{3} = \frac{38+43+36}{3} = \frac{117}{3} = 39$		

Такий досить високий рівень комерційного потенціалу проведених нами досліджень пояснюється тим, що отримані нами результати розвивають концепцію алгоритмів машинного навчання і пропонують поліпшені алгоритми знаходження вузла-одержувача при мінімальному відсотку втрат пакетів на маршруті. В результаті реалізації отриманих результатів ми отримаємо соціальний ефект, який полягає у покращені роботи безпровідної мережі.

4.2 Розрахунок витрат на проведення досліджень

Для проведення наукових досліджень під час виконання поставлених у магістерській роботі завдань були зроблені такі витрати:[42]:

4.2.1. Основна заробітна плата $З_о$ розробників:

$$З_о = \frac{М}{Т_р} \cdot t \text{ грн}, \qquad (4.1)$$

де М – місячний посадовий оклад розробника, грн.

Для науковців дані оклади не є високими і коливаються в межах

М = (4173…15750) грн. за місяць;

$Т_р$ – число робочих днів в місяці; приймемо, що $Т_р = 20$ днів;

t – число робочих днів роботи науковців (розробників).

Зроблені розрахунки основної заробітної плати зведемо до таблиці 4.4:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Таблиця 4.4 – Основна заробітна плата розробників

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, грн	Примітка
1. Науковий керівник магістерської роботи	12000	600	4 робочих дні	2400	6-год. робочий день
2. Магістрант – дослідник	2000	100	60	6000	
3. Консультант	11000	550	0,4 дня	220	
Загалом витрат на оплату праці				$З_о = 8620$ грн	

4.2.2. Додаткова заробітна плата $З_д$ розраховується за формулою:

$$З_д = (0{,}1...0{,}12) \cdot З_о . \quad (4.2)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$З_д = 0{,}10 \times 8620 = 862 \text{ грн.}$$

4.2.3. Нарахування на заробітну плату $Н_{зп}$ розраховуються за формулою:

$$Н_{зп} = (З_о + З_д) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (4.3)$$

де β = 22% – ставка єдиного внеску на загальне державне соціальне страхування. Для нашого випадку отримаємо:

$$Н_{зп} = (8620+862) \times 0{,}22 = 2086 \text{ грн.}$$

4.2.4. Амортизація А основних засобів, комп'ютерів, принтерів, приміщень, обладнання тощо розраховується за формулою:

$$А = \frac{Ц \cdot Н_а}{100} \cdot \frac{Т}{12} \text{ грн}, \quad (4.4)$$

де Ц – загальна балансова вартість основних засобів, які використовувалися під час проведення досліджень, грн;

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

$Н_а$ – річна норма амортизаційних відрахувань. Спрощено можна прийняти, що $Н_а$ = (2,25...22,5)%;

Т – термін, використання кожного виду основних засобів, місяці.

Зроблені нами розрахунки зведемо у таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Розрахунок амортизаційних відрахувань

Найменування основних засобів	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
1. Основні засоби, принтери, обладнання, комп'ютери	30000	22,5	2,5 міс. при 30% використанні	≈422
2. Приміщення університету, кафедри та радіофакультету	15000	3,0	2,5 міс. при 30% використанні	≈28
Разом				А = 450

4.2.5. Витрати на матеріали М розраховуються за формулою:

$$М = \sum_{1}^{n} Н_i \cdot Ц_i \cdot К_i - \sum_{1}^{n} В_i \cdot Ц_в \text{ грн}, \quad (4.5)$$

де $Н_i$ – витрати матеріалу *і*-го найменування, кг; $Ц_i$ – вартість матеріалу *і*-го найменування, грн/кг.; $К_i$ – коефіцієнт транспортних витрат, $К_i$ = (1,1…1,15); $В_i$ – маса відходів матеріалу *і*-го найменування, кг; $Ц_в$ – ціна відходів матеріалу *і*-го найменування, грн/кг; n – кількість видів матеріалів.

4.2.6. Витрати на комплектуючі К розраховуються за формулою:

$$К = \sum_{1}^{n} Н_i \cdot Ц_i \cdot К_i \text{ грн.}, \quad (4.6)$$

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

де $Н_і$ – кількість комплектуючих *і*-го виду, шт.; $Ц_і$ – ціна комплектуючих *і*-го виду, грн; $К_і$ – коефіцієнт транспортних витрат, $К_і$ = (1,1…1,15); n – кількість видів комплектуючих.

Загальна вартість основних матеріалів, які були використані під час проведення даних досліджень, складає приблизно 1000 грн.

4.2.7. Витрати на силову електроенергію $В_е$, що була використана при виконанні даної роботи, розраховуються за формулою:

$$В_е = \frac{В \cdot П \cdot Ф \cdot К_п}{К_д}, \quad (4.7)$$

де В – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2019 р. В ≈ 2,50 грн/кВт;

П – установлена потужність обладнання, кВт; П = 0,61 кВт;

Ф – фактична кількість годин роботи обладнання, годин.

Приймемо, що Ф = 135 годин;

$К_п$ – коефіцієнт використання потужності; $К_п$ < 1 = 0,61.

$К_д$ – коефіцієнт корисної дії, $К_д$ = 0,52.

Тоді витрати на силову електроенергію складуть:

$$В_е = \frac{В \cdot П \cdot Ф \cdot К_п}{К_д} = \frac{2,50 \cdot 0,61 \cdot 135 \cdot 0,61}{0,52} \approx 242 \text{ грн.}$$

4.2.8. Інші витрати $В_{ін}$ (опалення, освітлення тощо) розраховуються як (100…300)% від основної заробітної плати виконавців цієї роботи, тобто:

$$В_{ін} = (1..3) \times З_о. \quad (4.8)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$В_{ін} = 1,1 \times 8620 = 9482 \text{ грн.}$$

4.2.9. Сума всіх попередніх статей дає витрати на проведення наукових досліджень безпосередньо магістрантом – В.

$$В = 8620 + 862 + 2086 + 450 + 1000 + 242 + 9482 = 22742 \text{ грн.}$$

4.2.10 Загальні витрати на виконання цієї роботи розраховуються за формулою:

$$ЗВ = \frac{В}{\beta}, \quad (4.9)$$

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

де β – коефіцієнт, який характеризує етап виконання даної роботи на шляху до її можливого впровадження: якщо це тільки науково-дослідні роботи, то β ≈ 0,1; якщо це стадія технічного проектування, то β ≈ 0,2; якщо стадія розробки конструкторської документації, то β ≈ 0,3; якщо це стадія розробки технології, то β ≈ 0,4; якщо це стадія розробки дослідного зразка, то β ≈ 0,5; якщо це стадія розробки промислового зразка, β ≈ 0,7; якщо це стадії впровадження, то β ≈ (0,8 - 0,9).

Для нашого випадку доцільно прийняти, що β ≈ 0,70.

Тоді: $ЗВ = \frac{22742}{0,7} = 32488,57$ грн або приблизно 33 тис. грн.

Тобто загальні витрати на завершення проведених нами наукових досліджень становлять приблизно 33 тис. грн.

4.3 Оцінювання технічного рівня проведених наукових досліджень

Оскільки на цьому етапі проведення досліджень складно більш-менш реально оцінити можливості комерціалізації отриманих результатів (про які було зазначено у технологічному аудиті), проведемо оцінювання технічного рівня отриманих нами результатів. Для кількісного оцінювання технічного рівня результатів проведених досліджень може бути використаний комплексний показник $К_р$, який розраховується за формулою [43]:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \qquad (4.10)$$

де: I – коефіцієнт важливості досліджень, I = (2…5);

n – коефіцієнт використання результатів досліджень;

n = 0, коли результати роботи не будуть використовуватись;

n = 1, коли результати будуть використовуватись частково;

n = 2, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;

n = 3, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення

ВНТУ ФІРЕН ТКСТЬ МКР 2019

дослідно-конструктор-ських розробок;

T_c – коефіцієнт складності досліджень, $T_{скл} = (1…3)$;

R – коефіцієнт результативності досліджень:

R = 4, якщо результати роботи плануються вище відомих;

R = 3, якщо результати роботи відповідають відомому рівню;

R = 2, якщо результати нижче відомих;

R = 1, якщо результат роботи не визначений;

B – вартість (або витрати) проведених досліджень; для нашого випадку B = 33 тис. грн;

t – час проведення подальших досліджень, років.

Якщо $K_р \geq 1$, то технічний рівень отриманих результатів проведених досліджень є високим.

Для визначення коефіцієнтів, наведених у формулі 4.10, запросимо тих же експертів, які здійснювали технологічний аудит.

Результати висновків експертів занесено у таблицю 4.6.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Таблиця 4.6 – Результати оцінювання експертами зазначених коефіцієнтів

Показник	Експерти			Переважаюча оцінка
	Городецька О.С.	Семенова О.О.	Васильківський М.В.	
1. Коефіцієнт важливості роботи, I	3	2	3	3
2. Коефіцієнт використання результатів роботи, n	2,3	2	2	2
3. Коефіцієнт складності роботи, T_c	1,5	2	1,9	1,8
4. Коефіцієнт результативності роботи, R	2	1,75	2,0	2,0
5. Вартість роботи, тис. грн.	33	33	33	33
6. Час проведення подальших досліджень, роки	0,75	0,5	0,5	0,5

Аналізуючи результати, наведені в таблиці 4.6, можна зробити висновок, що переважаючими коефіцієнтами, які були виставлені експертами, будуть такі:

I – коефіцієнт важливості проведених досліджень, I = 3;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; n = 2;

T_c – коефіцієнт складності роботи, $T_{скл}$ = 1,8;

R – коефіцієнт результативності роботи; R = 2,0;

B – вартість роботи; B = 33 тис. грн.

t – час завершення досліджень, t = 0,5 рік.

Тоді показник K_p, що визначає технічний рівень результатів, отриманих під час проведених досліджень, буде дорівнювати:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = \frac{3^2 \cdot 1,8 \cdot 2,0}{33 \cdot 0,5} = \frac{9 \cdot 1,8 \cdot 2,0}{33 \cdot 0,5} = 1,963.$$

Оскільки $K_p = 1,963 > 1$, то це свідчить про те, що технічний рівень результатів проведених наукових досліджень є досить високим.

Результати виконаної економічної частини магістерської кваліфікаційної роботи зведено у таблицю:

Показники	Задані у ТЗ	Досягнуто у магістерській кваліфікаційній роботі	Висновок
1. Витрати на виконання роботи	Не більше 40 тис. грн	33 тис. грн.	Виконано
2. Коефіцієнт використання результатів проведених досліджень	не менше 2	2	Виконано
3. Коефіцієнт важливості проведених досліджень	не менше 3	3	Виконано
4. Коефіцієнт результативності проведених досліджень	не менше 2	2,0	Виконано
5. Комплексний показник, що характеризує технічний рівень отриманих результатів	не менше 1,5	1,963	Досягнуто

Таким чином, основні техніко-економічні завдання, що були поставлені перед магістрантом під час виконання цієї магістерської кваліфікаційної роботи, повністю виконані.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Промислова безпека, яку розглядає охорона праці, має велике значення для трудової діяльності, оскільки саме вона контролює фізичний стан працівника, що не може не позначитись на його здоров'ї, житті та продуктивності роботи в тому числі і у сфері радіотехніки.

У цьому розділі проводиться розгляд шкідливих, небезпечних [44] і уражаючих для людини і оточуючого середовища факторів, що виникають при проведенні дослідження адаптивної маршрутизації в безпровідних мережах передачі даних. В ньому розглядаються, в тому числі, технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці, визначення допустимої сили струму в провіднику (антені), при якій напруженість електричного поля на робочому місці знаходиться в межах норми, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

5.1 Технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці

5.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат

Вибираємо для приміщення для проведення дослідження адаптивної маршрутизації в безпровідних мережах передачі даних, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іа.

Згідно із [45] допустимі показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для холодного та теплого періодів року наведені у таблиці 5.1 додатку Ж.

Для опромінення менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення – 100 Вт/м^2.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Повітря робочої зони не повинно містити шкідливих речовин з концентраціями вище гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони і підлягає систематичному контролю з метою запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці 5.2 додатку Ж.

При роботі з ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, що містяться у повітрі. Рівні позитивних та негативних іонів повинні відповідати [47] і наведені у таблиці 5.3 додатку Ж.

Для встановлення нормованих параметрів мікроклімату і складу повітря робочої зони запропоновано:

1) у приміщенні повинна бути встановлена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів року;

2) застосування вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

5.1.2 Виробниче освітлення

З метою створення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях великі вимоги висуваються до кількісних та якісних показників освітлення.

З погляду задач зорової роботи в приміщенні, де проводиться робота з дослідження адаптивної маршрутизації в безпровідних мережах передачі даних, відповідно до [47] визначаємо, що вони відносяться до IV розряду зорових робіт. Приймаємо контраст об’єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт *г*.

Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості при штучному освітленні приведені в таблиці 5.4 додатку Ж.

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Так як приміщення розташоване у м. Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а світлові пройми орієнтовані за азимутом 45°, то за таких умов КЕО розраховується за виразом [47, 48]

$$e_N = e_н m_N \ [\%], \tag{5.1}$$

де $e_н$ – табличне значення КЕО для бокового освітлення, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

Підставляючи відомі значення одержимо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N.б} = 1{,}5 \cdot 0{,}9 = 1{,}4 \ (\%);$$
$$e_{N.с} = 0{,}9 \cdot 0{,}9 = 0{,}8 \ (\%).$$

Для встановлення нормативних значень параметрів освітлення передбачено такі заходи:

1) за недостатнього природного освітлення у світлий час доби доповнення штучним завдяки використанню газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) використання штучного освітлення в темний час доби.

5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що під час експлуатації пристроїв крім усього іншого устаткування використовується обладнання, робота якого генерує шум та вібрацію, потрібно передбачити шумовий та вібраційний захист.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Визначено, що приміщення, де проводиться робота з дослідження адаптивної маршрутизації в безпровідних мережах передачі даних може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що створюється рухомими елементами ЕОМ.

Для попередження травмування працюючих від дії шуму він підпадає під нормування. Основним документом з питань промислового шуму, діючим в Україні, є [48], у відповідності з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях у виробничих приміщеннях не мають бути більшими ніж значення, що приведені в таблиці 5.5 додатку Ж. Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 5.6 додатку Ж для локальної вібрації.

З метою поліпшення віброакустичного клімату в приміщенні запропоновано такі заходи:

1) періодичне змащування підшипників вентиляторів блоку живлення комп'ютера і кулерів мікропроцесора та відеоадаптера;

2) передбачено використовувати в приміщені штори із щільної тканини.

5.1.4 Виробничі випромінювання

Аналіз умов праці показав, що приміщення, де проводиться робота з дослідження може містити електромагнітні випромінювання.

Гранично допустимі рівні електромагнітних полів наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Гранично допустимі значення електромагнітних полів на робочих місцях згідно [53]

Параметри та одиниці вимірювання	Граничні значення в діапазонах частот					
	1-10 кГц	10-60 кГц	0,06-3 МГц	3-30 МГц	30-50 МГц	50-300 МГц
$E_{ГД}$, В/м	1000	700	500	300	80	
$EH_{Егд}$, $(В/м)^2 \cdot год$	120000	40000	20000	7000	800	

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Параметри та одиниці вимірювання	Граничні значення в діапазонах частот					
	1-10 кГц	10-60 кГц	0,06-3 МГц	3-30 МГц	30-50 МГц	50-300 МГц
$Н_{ГД}$, А/м	75	57	50	–	3,0	–
$ЕН_{Нгд}$, $(А/м)^2 \cdot год$	675	390	200	–	0,72	–

З метою забезпечення захисту та досягнення нормативних рівнів випромінювань необхідно застосовувати екранні фільтри та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат.

Виконати розрахунок допустимої сили струму в провіднику (антені) довжиною L = 40 м, при якій напруженість електричного поля на робочому місці, віддаленому на r = 0,65 м, знаходиться в межах норми, якщо частота поля f = 21 МГц.

Біля джерела ЕМВ виділяють ближню зону (зону індукції), що знаходиться на відстані $r \le \lambda / 2\pi$, і далеку зону (зону випромінювання), для якої $r > \lambda / 2\pi$, де λ – довжина хвилі, м.

Довжину хвилі можна визначити за формулою

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ [м]}, \tag{5.2}$$

де c – швидкість світла в вакуумі, м/с ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с);

f – частота електромагнітного поля, Гц.

Після підстановки відомих значень у формулу (5.2), отримаємо:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{21 \cdot 10^6} = 14{,}29 \text{ (м)}.$$

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Оскільки r = 0,65 м < $\lambda / 2\pi$ = 14,29 / 2π = 2,2755 м, то допустиму силу струму I в провіднику (антені) для ближньої зони можна визначити з формули

$$E_{бл} = \frac{IL}{4\pi^2 f \varepsilon r^3} \text{ [В/м]}, \quad (5.3)$$

звідки

$$I = \frac{E_{бл} 4\pi^2 f \varepsilon r^3}{L} \text{ [А]}, \quad (5.4)$$

де $E_{бл}$ – напруженість електричного поля, В/м;

ε – діелектрична проникність середовища, Ф/м (для повітря ε = 1 Ф/м);

L – довжина провідника (антени), м.

Для діапазону частот 3…30 МГц $E_{ГД}$ = 300 В/м.

Після підстановки відомих значень у формулу (5.4), отримаємо:

$$I = \frac{300 \cdot 4 \cdot 3{,}14^2 \cdot 21 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 0{,}65^3}{40} = 1705846369{,}5 \text{ (А)}.$$

5.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження

Сучасний етап розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень характеризується широким використанням на робочому місці ЕОМ. Велика кількість прикладних програм перетворює ЕОМ на основне знаряддя праці радіоінженера.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТЬ МКР 2019

5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Робочі місця з відеодисплейним терміналом повинні розташовуватись на відстані не менше як 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін – на відстані 1 м, між собою на відстані не менше як 1,5 м. У випадку розміщення робочих місць необхідно виключити ймовірність прямого засвічування екрану джерелом природного освітлення. Робоче місце доцільно розташовувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, бажано з лівого [50].

Поверхня екрана повинна знаходитись на відстані 400-700 мм від очей користувача. Висота робочої поверхні столу під час виконання роботи сидячи має налаштовуватись у діапазоні 680-800 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше ніж 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм та на рівні витягнутої ноги не менше як 650 мм [51].

5.2.2 Електробезпека

В середині приміщення, де проводиться робота з дослідження адаптивної маршрутизації в безпровідних мережах передачі даних, особливу увагу слід надати запобіганню небезпеки ураження електричним струмом. Згідно [52] дане приміщення відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності значної (більше 75 %) відносної вологості. Через це безпека експлуатації електрообладнання повинна забезпечуватись рядом заходів, які передбачають застосування ізоляції струмоведучих елементів, захисних блокувань, захисного заземлення та ін [53].

5.2.3 Пожежна безпека

Згідно [54] приміщення, в якому проводиться робота з дослідження адаптивної маршрутизації в безпровідних мережах передачі даних, відноситься до

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

категорії пожежної небезпеки Б. Це приміщення відноситься до 3-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огороджувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1, Г2. До елементів покриттів не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій приміщення, що розглядається наведені в таблиці 5.7. В таблиці 5.8 приведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Встановлюємо, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження, має бути оснащене двома вогнегасниками, пожежним щитом, а також ємністю з піском [54].

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

За критерій стійкості роботи безпровідної мережі передачі даних приймають такі максимальні значення рівня радіації, або дози опромінення, при яких матиме місце зміна параметрів деяких елементів пристрою, але не буде порушено його роботу в цілому.

Проаналізуємо елементну базу безпровідної мережі передачі даних. Пристрій виготовлений із напівпровідникових елементів, конденсаторів, резисторів, діодів, діелектричних матеріалів.

За довідниковими таблицями для кожного з елементів визначимо $Д_{гр}$, які заносимо до таблиці 5.6.

Границя стійкості визначається по мінімальному значенню допустимої дози (таблиця 5.6) кожного елемента, при якій виникають необоротні зміни. Отже, гранична експозиційна доза становить $Д_{гр} = 10^4$ (Р).

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Таблиця 5.6 – Граничні значення експозиційних доз елементів безпровідної мережі передачі даних

№ п/п	Блоки	Елементна база безпровідної мережі передачі даних	$Д_{гр.і}$ (Р)	$Д_{гр.min}$ (Р)
1	Бл 1	Діоди	10^4	10^4
		Напівпровідники LF412	10^5	
2	Бл 2	Резистори С2-23	10^6	
		Конденсатори К10-17	10^6	
3	Блок індикації	Діелектричні матеріали	10^7	

З розрахунку роботи безпровідної мережі передачі даних в заданих умовах протягом 6 років визначимо можливу дозу опромінення:

$$Д_м = \frac{2 \cdot P_{1мах} \cdot \left(\sqrt{t_к} - \sqrt{t_п}\right)}{K_{посл}}, \quad (5.5)$$

де $p_{1max}=4,39$ *Р/год* – максимальне значення рівня радіації через 1 год після аварії на радіаційно-небезпечному об'єкті;

$t_п=1$, $t_к = 6$ років – відповідно, час початку і кінця опромінення безпровідної мережі передачі даних, що визначається його експлуатаційним терміном;

$K_{посл} = 1$ – коефіцієнт послаблення радіації.

$$Д_м = \frac{2 \cdot 4,39 \cdot \left(\sqrt{6 \cdot 8760} - \sqrt{1}\right)}{1} = 2004 \text{ (Р)}$$

Визначаємо допустимий час стійкості роботи безпровідної мережі передачі даних за наступною формулою:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

$$t_{доп} = (\frac{Д_{гр} \cdot K_{посл} + 2 \cdot P_{мах} \cdot \sqrt{t_n}}{2 \cdot P_{мах}})^2 \quad , \qquad (5.6)$$

$$t_{доп} = (\frac{10^4 \cdot 1 + 2 \cdot 4,39 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,39})^2 = 1,299 \cdot 10^6 \text{ (год.)}$$

Для безпечної нормальної роботи даної безпровідної мережі передачі даних необхідно, щоб виконувалась наступна умова:

$$Д_{гр} \geq Д_{можл}$$

Оскільки, гранична експозиційна доза становить $Д_{гр}=10^4$ *Р*, а можлива експозиційна доза опромінення $Д_{можл}=2004$ *Р,* то робота безпровідної мережі передачі даних буде стійкою в умовах дії іонізуючих випромінювань і обладнання буде працювати у потрібному режимі.

5.3.2 Дослідження стійкості роботи безпровідної мережі передачі даних в умовах впливу електромагнітного імпульсу

Електромагнітний імпульс (ЕМІ) – це магнітні поля, які виникають при взаємодії альфа-випромінювання з атомами і молекулами навколишнього середовища та передають останнім імпульси енергії. Електромагнітний імпульс безпосередньо на людину не діє. Приймачами ЕМІ є тіла, які проводять електричний струм: повітряні та підземні лінії зв’язку, електромережі, трубопроводи та інші металеві конструкції. В момент вибуху в них на долі секунди виникає електричний імпульс та з’являється різниця потенціалу відносно землі. Під дією цього потенціалу може утворюватися пробій ізоляції кабелів, пошкодження вхідних елементів апаратури, псування напівпровідникових приладів та інше. Великі електричні потенціали, які виникають на вхідних пристроях, можуть бути небезпечні і для обслуговуючого персоналу.

Параметри ЕМІ залежать від потужності та відстані від епіцентру вибуху. Магнітні і електричні поля ЕМІ характеризуються напруженістю поля.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

ЕМІ уражає радіоелектронну і радіотехнічну апаратуру. В провідниках індукуються високі напруги і струми, які можуть призвести до постійних або тимчасових пошкоджень ізоляції кабелів, відключення реле, пошкодження елементів зв'язку, магнітних запам'ятовуючих пристроїв у ЕМІ і системах передачі даних тощо. Найбільш уразливими елементами обладнання є напівпровідникові прилади – діоди, управляючі і контрольні прилади. Найбільш стійкі до ЕМІ вакуумні електронні прилади.

Сучасний рівень знань про природу і властивості ЕМІ дає можливість розробити захист від нього і впровадити заходи захисту до яких входять схеми, стійкі до електромагнітної інтерференції, радіоелектронні елементи стійкі до ЕМІ, екранування окремих пристроїв або цілих екранних систем.

При оцінці впливу ЕМІ на струмопровідні елементи, необхідно врахувати те, що ЕМІ мають горизонтальну і вертикальну складові напруженості електричного поля і тому повинні визначатися значення напруги на вертикальних і горизонтальних ділянках лінії.

За критерієм стійкості роботи електронних систем або окремих її елементів в умовах дії електромагнітного імпульсу можна прийняти коефіцієнт безпеки:

$$K_{б(в,г)} = 20\lg\frac{U_{доп}}{U_{(в,г)}} \geq 40 \ [\text{дБ}], \qquad (5.7)$$

де $U_{доп}$ – допустиме коливання напруги живлення, В;

$U_{(в,г)}$ – напруги наведення в вертикальних і горизонтальних струмоведучих частинах, В.

Максимальні довжини струмопровідних частин безпровідної мережі передачі даних:

$l_{г1} = 0{,}16$ (м); $l_{в1} = 0{,}4$ (м).

Визначимо допустиму напругу живлення:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

$$U_{доп} = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} \cdot N\,, \qquad (5.8)$$

де $U_{ж}$ – напруга живлення; $U_{ж} = 15$ В.;

N – допустимі коливання; $N = 1\%$.

Оскільки напруга живлення всіх частин однакова, значення допустимих напруг приладу загалом $U_{доп} = 15{,}15$ (В).

Верхня складова напруженості становить E_B=10,1 кВ/м.

Визначимо горизонтальну складову напруженості:

$$E_Г = E_B \cdot 10^{-3}\ (\text{В/м}), \qquad (5.9)$$

$E_Г = 11{,}38 \cdot 10^{-3}$ (кВ/м)=11,38 (В/м).

Визначимо напругу наведення у вертикальній і горизонтальній струмопровідній частині:

$$U_B = E_Г \cdot l_B, \qquad (5.10)$$

$$U_Г = E_B \cdot l_Г. \qquad (5.11)$$

$U_B = 11{,}38 \cdot 0{,}4 = 4{,}552$ (В.),
$U_Г = 11380 \cdot 0{,}16 = 1820{,}8$ (В.).

Визначаємо коефіцієнти безпеки:

$$K_{б(в)} = 20\lg\frac{15{,}15}{4{,}552} = 10{,}444 \text{ (дБ)};$$

$$K_{б(г)} = 20\lg\frac{15{,}15}{1820{,}8} = -41{,}597 \text{ (дБ)}.$$

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Умова стійкості роботи безпровідної мережі передачі даних, а саме – $К_{Б(В)}$<40дБ і $К_{Б(Г)}$<40дБ не виконується, тому пристрій є нестійким в роботі в умовах дії ЕМІ.

5.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи безпровідної мережі передачі даних в умовах надзвичайних ситуацій.

Як бачимо, значення $К_{Б(Г)}$ та $К_{Б(Г)}$ є меншими ніж 40 дБ, отже робота безпровідної мережі передачі даних є не стійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу. Тому необхідно провести заходи, направлені на підвищення стійкості її роботи. Доцільно виконати екранування струмопровідних частин пристрою, що дасть змогу зменшити вплив електромагнітного імпульсу.

Визначимо рівень затухання в екрані за наступною формулою:

$$A_{екр} = К_{Б} - К_{Б.розр}, \tag{5.12}$$

де $К_Б$ – номінальний коефіцієнт безпеки;

$К_{Б.розр}$ – мінімальний коефіцієнт, який отриманий при розрахунках.

$A_{екр} = 40 - (-41,597) = 81,597$ (дБ).

Визначимо товщину захисного екрану згідно наступної формули:

$$t_{екр} = \frac{A_{екр}}{k \cdot \sqrt{f}}, \tag{5.13}$$

де $A_{екр}$ – затухання екрану, дБ;

k – коефіцієнт, що залежить від металу екранування; для заліза k=5,2;

f – найбільша робоча частота, f = 15 кГц.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

$$t_{екр} = \frac{81,597}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,128 \text{ (см)}.$$

Для забезпечення стійкої роботи безпровідної мережі передачі даних в заданих умовах необхідно здійснити екранування його струмопровідних частин сталевим екраном товщиною 0,128 см.

За результатами розрахунків можна зробити висновок про те, що стійка робота безпровідної мережі передачі даних в умовах дії іонізуючих випромінювань буде забезпечена конструктивно, а в умовах дії електромагнітного імпульсу необхідно екранувати струмопровідні частини компонентів безпровідної мережі передачі даних сталевим екраном товщиною не менше 1,3 мм.

Висновки до розділу

Під час написання даного розділу було опрацьовано такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення допустимої сили струму в провіднику (антені), при якій напруженість електричного поля на робочому місці знаходиться в межах норми, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження адаптивної маршрутизації в безпровідних мережах передачі даних, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

ВИСНОВКИ

Згідно з результатами проведених експериментів, розроблений протокол маршрутизації, який базується на схемі зворотного зв'язку з адаптивним механізмом оновлення ваг маршрутів показав кращий результат в показнику відсотка втрат пакетів (PLR). Такий результат дозволяє зробити висновок про ефективності розробленого протоколу в застосуванні на бездротових багатовузлових мережах передачі даних, особливо при ненадійних умовах передачі.

Крім того, механізм вибору маршруту зі зворотним зв'язком дозволяє швидше реагувати на зміни в топології мережі, без збільшення кількості переданих службових повідомлень. Так, показник часу відновлення маршруту (Route Recovery Time, RRT) виявився значно менше, ніж у схем маршрутизації з проактивним механізмом (як в протоколі B.A.T.M.A.N.).

В рамках даної роботи, були проведені експерименти на реальній бездротової многоузловой мережі, які показали ефективність розробленої схеми маршрутизації в рамках відсотка втрат пакетів і часу відновлення маршруту, що вказує на те, що при ефективній програмної імплементації протоколу, дана схема буде працювати продуктивніше, ніж існуючі аналоги.

Також варто відзначити, що розроблений протокол маршрутизації має великий потенціал для оптимізації в рамках зменшення часу обробки пакетів на рівні введення / виведення (input / output) системи, що пов'язано з програмної імплементацією на мові високого рівня Python. При оптимізації даного параметра (наприклад, при переписуванні частини коду на мова нижчого рівня), буде спостерігатися значне зростання пропускної спроможності маршруту з урахуванням того, що розроблена схема дозволяє передавати пакети з даними за маршрутом практично без втрат, на відміну від протоколу B.A.T.M.A.N.

У роботі був застосований математичний апарат вибору оптимального дії з теорії машинного навчання з підкріпленням для вибору маршруту в многоузловой

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

мережі передачі. В результаті, був вироблений механізм первинного поновлення маршрутної таблиці, механізм первинного поновлення ваг маршрутів, а також схема передачі пакетів по маршруту із застосуванням зворотного зв'язку для оновлення ваги маршруту в залежності від успішності передачі пакета, а також величини отриманої нагороди, що міститься в зворотному ACK повідомленні. Крім того, в результаті проведених досліджень, була запропонована схема експоненціального збільшення негативної нагороди за передачу пакета по втрати з'єднання. Ще одним важливим результатом роботи є вироблена методика вибору маршруту для поточного пакета даних з заданим адресою одержувача (unicast пакета), яка має на увазі динамічна зміна ймовірності вибору маршруту з максимальною вагою, в Залежно від ступеня завантаженості, зашумленості і ступеня мобільності вузлів бездротової многоузловой мережі передачі даних.

Обраний математичний апарат для визначення ймовірності переходів між станами "пакет втрачено" і "пакет видалений" може бути застосований для моделювання характеристик продуктивності реальної мережі, працюючої на запропоновану схему маршрутизації за умови наявності інформації про топології і типі трафіку даної мережі.

Розроблений алгоритм маршрутизації може бути використаний в зв'язці з алгоритмами вимірювання смуги пропускання з метою поліпшення ефективності вибору маршруту, як показано в роботі. Крім того, в дослідженнях, опублікованих автором дисертаційної роботи, була показана можливість застосування мереж ad hoc і відповідних протоколів маршрутизації для забезпечення конвергенції бездротову локальну мережу передачі даних LTE, що дозволяє забезпечувати зв'язність з віддаленими мережами розподіленого моніторингу.

ВПУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Yiran Ma, Zhensheng Jia Evolution and Trends of Broadband Access Technologies and Fiber-Wireless Systems, Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks, pp.43-75, Springer, 2017.
2. IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems, IEEE 802.11ac-2013.
3. M. A. Razzaque, m. Milojevic-Jevric, A. Palade, and S. Clarke, "Middleware for Internet of Things: A Survey", IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, pp. 70-95, 2016.
4. Rainer Schmidt, Michael Möhring, Ralf-Christian Härting et al., Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results, Springer, pp. 16–27, 2015.
5. I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, Wireless Sensor Networks: A survey, Computer Networks, Elsevier 38 (4) (2002) 393–422.
6. I.F. Akyildiz and X. Wang, "A Survey on Wireless Mesh Networks", IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 9, pp. S23-S30, 2005.
7. FireChat - https://en.wikipedia.org/wiki/FireChat.
8. D. Dugaev, S. Zinov, E. Siemens A Survey of Multi-Hop Routing Schemes in Wireless Networks applied for the Smartlighting Scenario // V international science conference “Technologies and equipment for information measurement”, Tomsk. Russia. May 2014.
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99 «Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель».
10. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012).
11. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems, Wireless medium access control (MAC) and physical layer

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

(PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs), IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002).

12. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks, IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011).

13. C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing,” IETF RFC 3561, Jul. 2002.

14. David B. Johnson, David A. Maltz, and Josh Broch. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks. in Ad Hoc Networking, edited by Charles E. Perkins, Chapter 5, pp. 139-172, Addison-Wesley, 2001.

15. T. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626 (Experimental), October 2003.

16. R. Sanchez-Iborra et al., “Performance evaluation of BATMAN routing protocol for VoIP services: a QoE perspective”, IEEE Transactions Wireless Communication, vol. 13, no. 9, pp. 4947 – 4958, 2014.

17. S. Sharma, J. Agrawal, S. Agarwal and S. Sharma, “Machine Learning Techniques for Data Mining: A Survey”, IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, 2013.

18. R.S. Sutton, A.G. Barto, Reinforcement Learning: An Introduction, MIT Press, Cambridge, MA, 1998.

19. W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 2000, pp. 1–10.

20. W.R. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, Proceedings of the ACM MobiCom’99, Seattle, Washington, 1999, pp. 174–185.

21. Serval Project – https://en.wikipedia.org/wiki/Serval_Project.

22. S. Yousefi, M. S. Mousavi, and M. Fathy, "Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs): Challenges and Perspectives," in 6th International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2006), Chengdu, China, June 21-23, 2006, pp. 761-766.

23. Bergenhem, C., Shladover, S., Coelingh, E., Englund, C., & Tsugawa, S. (2012).

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Overview of platooning systems. In Proceedings of the 19th ITS World Congress, Oct. 22-26, Vienna, Austria (2012).

24. Freifunk – https://freifunk.net.

25. IEEE 802.11s. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 10: Mesh Networking, IEEE Std., 2011.

26. D. Dugaev, S. Zinov, E. Siemens, and V. Shuvalov, “A survey and performance evaluation of ad-hoc multi-hop routing protocols for static outdoor networks,” in 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015, pp. 1–11.

27. A. Shrestha, F. Tekiner, "Investigation of MANET routing protocols for mobility and scalability" International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, Higashi Hiroshima, 2009.

28. W. R. Stevens, M. Allman, and V. Paxson, "TCP Congestion Control", IETF, RFC 2581, Apr-1999. [Online]. Available: https://tools.ietf.org/html/rfc2581.

29. R. Stewart et al., “Stream Control Transmission Protocol”, IETF RFC 2960, Oct. 2000.

30. Y. Gu and R. L. Grossman, "UDT: UDP-based Data Transfer for High-speed Wide Area Networks", Computer Networks, vol. 51, no. 7, pp. 1777-1799, May 2007.

31. J. Postel et al., “User Datagram Protocol”, IETF RFC 768, Aug. 1980.

32. Y. Wu, S. Kumar, and S.-J. Park. "Measurement and performance issues of transport protocols over 10 Gbps high-speed optical networks". Computer Networks, vol. 54., 2010, pp. 475-488. doi:10.1016/j.comnet.2009.09.017.

33. V. Frost and B. Melamed, "Traffic Modeling for Telecommunication Networks", IEEE Communications Magazine, 32(3), pp. 70-80, March, 1994.

34. Munoz, Andres, "Machine Learning and Optimization". URL:

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

https://www.cims.nyu.edu/~munoz/files/ml_optimization.pdf (2014).
35. Machine Learning – https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_learning.

36. L. Peshkin and V. Savova, “Reinforcement learning for adaptive routing,” in Neural Networks, 2002. IJCNN’02. Proceedings of the 2002 International Joint Conference on, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 1825–1830.
37. Nallusamy, R., et al. "Energy efficient dynamic shortest path routing in wireless Ad hoc sensor networks using genetic algorithm." Wireless Communication and Sensor Computing, 2010. ICWCSC 2010. International Conference on. IEEE, 2010.
38. J. Dowling, E. Curran, R. Cunningham, and V. Cahill, “Using feedback in collaborative reinforcement learning to adaptively optimize MANET routing,” Systems, Man and Cybernetics, Part A, IEEE Transactions on, vol. 35, no. 3, pp. 360–372, 2005.
39. M. Woo, N.H. Dung, W.J. Roh, "An Efficient Antbased Routing Algorithm for MANETs", Proceedings Of 10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT) 2008, Vol. 2, pp. 933-937.
40. Z. Qin, Z. Jia, X. Chen. “Fuzzy Dynamic Programming based Trusted Routing Decision in Mobile Ad Hoc Networks“, 2008, The Fifth IEEE International Symposium on Embedded Computing(SEC ’08). Beijing, China , pp.180-185.

41. Методичні рекомендації з комерціалізації розробок, створених в результаті науково-технічної діяльності – К.: Наказ Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатики (Лист № 1/06-4-97 від 13.09.2010 р.).

42. Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. – Вінниця: ВНТУ, 2012.

43. Козловський В.О. Техніко-економічні обгрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 75 с.

44. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

45. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

46. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.

47. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.

48. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

49. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.

50. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

51. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

52. Правила улаштування електроустановок. 2-е вид., перероб. і доп. – Х: "Форт", 2009. – 736 с.

53. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.

54. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ТКСТБ ВНТУ,
канд. техн. наук, професор
Г.Г.Бортник
"__" _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

АДАПТИВНА МАРШРУТИЗАЦІЯ В БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ
08-34.МКР.002.00.000 ТЗ

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Керівник роботи
к.т.н., доц. кафедри ТКСТБ ВНТУ
Стальченко О.В.

Виконавець: ст. гр. АРЗ-18м
Вознюк О.П.

Вінниця-2019

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “02” 10 2019 року № 254 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 02.09.2019 р.

Дата закінчення: 09.12.2019 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є рішення проблеми ефективної маршрутизації трафіку в багатовузлових бездротових мережах передачі даних.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;

- аналіз моделі адаптивної маршрутизації на основі марковского процесу прийняття рішень.

- синтез механізму первинного поновлення ваг маршрутів і схеми передачі пакетів по маршруту із застосуванням зворотного зв'язку; синтез механізму збільшення / зменшення нагороди відповідно за вибір маршруту з високим / низьким відсотком втрат пакетів на маршруті;

Об’єкт дослідження є модель адаптивної маршрутизації для бездротових систем передачі даних.

Предмет дослідження є методи підвищення надійності передачі даних без втрат.

Основними завданнями роботи є:

- техніко-економічне обґрунтування доцільності даної розробки;

- аналіз загальної характеристики маршрутизації в безпровідних мережах;

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

- аналіз основ теорії машинного навчання;

- розробка алгоритму мережевої маршрутизації на основі машинного навчання з підкріпленням;

- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;

- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Розроблений протокол маршрутизації, який базується на схемі зворотного зв'язку з адаптивним механізмом оновлення ваг маршрутів показав кращий результат в показнику відсотка втрат пакетів (PLR). Такий результат дозволяє зробити висновок про ефективності розробленого протоколу в застосуванні на бездротових багатовузлових мережах передачі даних, особливо при ненадійних умовах передачі.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на основі отриманих даних і результатів дослідження тематики алгоритмів адаптивної маршрутизації даних, що отримані під час проходження переддипломної практики.

Список використаних джерел розробки:

3.1. Yiran Ma, Zhensheng Jia Evolution and Trends of Broadband Access Technologies and Fiber-Wireless Systems, Fiber-Wireless Convergence in Next Generation Communication Networks, pp.43-75, Springer, 2017.

3.2. IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems, IEEE 802.11ac-2013.

3.3. M. A. Razzaque, m. Milojevic-Jevric, A. Palade, and S. Clarke, "Middleware for Internet of Things: A Survey", IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, pp. 70-95, 2016.

3.4. Rainer Schmidt, Michael Möhring, Ralf-Christian Härting et al., Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results, Springer, pp. 16– 27, 2015.

3.5. I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, Wireless Sensor

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Networks: A survey, Computer Networks, Elsevier 38 (4) (2002) 393–422.
3.6. I.F. Akyildiz and X. Wang, "A Survey on Wireless Mesh Networks", IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 9, pp. S23-S30, 2005.
3.7. FireChat - https://en.wikipedia.org/wiki/FireChat.
3.8. D. Dugaev, S. Zinov, E. Siemens A Survey of Multi-Hop Routing Schemes in Wireless Networks applied for the Smartlighting Scenario // V international science conference “Technologies and equipment for information measurement”, Tomsk. Russia. May 2014.
3.9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99 «Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель».
3.10. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012).

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, студент групи АРЗ-18м Вознюк О.П.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження методу підвищення надійності передачі даних без втрат.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- час відновлення маршруту (секунди) – 9,6
- коефіцієнт втрат пакету, % - 0,7
- швидкість передачі даних в мережі Wi-Fi 802.11g, - 2.4GHz

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документ-тація
		початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання (ТЗ)	02.09.2019р.	06.09.2019р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Загальна характеристика маршрутизації в бездротових мережах	07.09.2019р.	04.10.2019р.	Проведений аналіз	Розділ 1
3.	Аналіз основ теорії машинного навчання	07.10.2019р	25.10.2019р.	Проведений аналіз	Розділ 2
4.	Алгоритм мережевої маршрутизації	28.10.2019р.	08.11.2019р.	Розроблений алгоритм	Розділ 3
5.	Аналіз економічної ефективності	11.11.2019р.	15.11.2019р.	Економічна частина МКР	Розділ 4
6.	Охорона праці та безпека в надзвичай-них ситуаціях	18.11.2019р.	22.11.2019р.	Частина ОТ та БНС	Розділ 5
7.	Оформлення поясню-вальної записки (ПЗ) та графічної частини	25.11.2019р.	29.11.2019р.	Оформлена документа-ція	ПЗ та графічна частина
8.	Нормоконтроль, попередній захист, рецензування МКР	02.12. 2019р.	06.12.2019р.	Позитивні відзиви	Відзив. рецензія
9.	Захист МКР ЕК		09.12. 2019р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- алгоритм мережевої маршрутизації на основі машинного навчання з підкріпленням
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС;

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі телекомунікацій:

- протокол маршрутизації, може бути застосований в сфері наукових досліджень розподілених мережевих алгоритмів,
- в розробках та впровадження розподілених бездротових мереж передачі даних на певному об'єкті - наприклад, сенсорної мережі моніторингу газопроводів, інтелектуальної система вуличного освітлення і так далі.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впроваджені результатів досліджень очікується підвищення надійності передачі даних без втрат.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- новий алгоритм вибору оптимального маршруту для пакетів даних
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв’язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

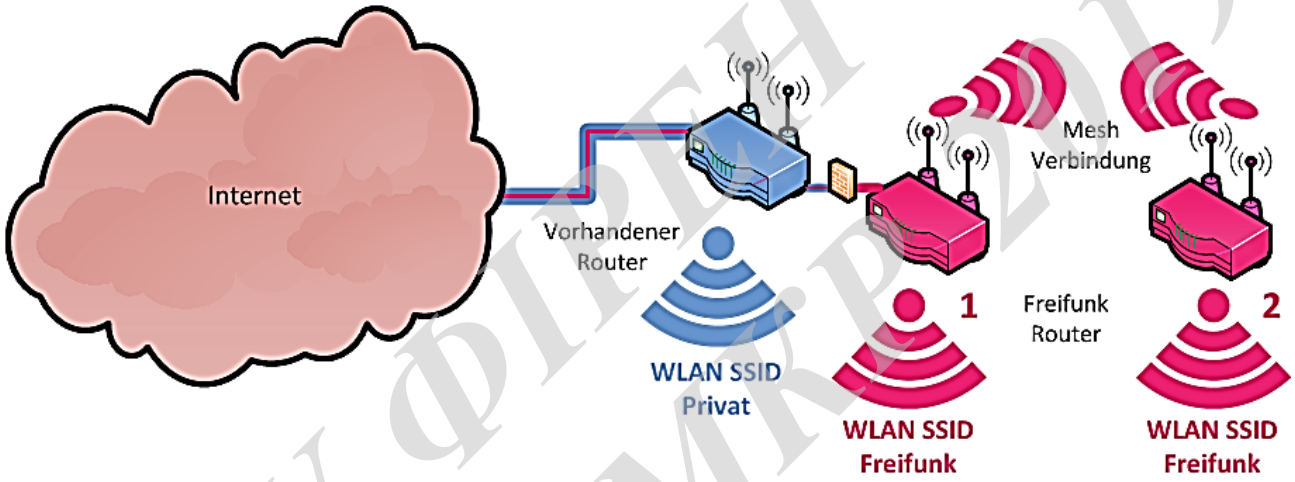
ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019

Додаток Б

(обов’язковий)

Архітектура мережі на прикладі Freifunk

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019



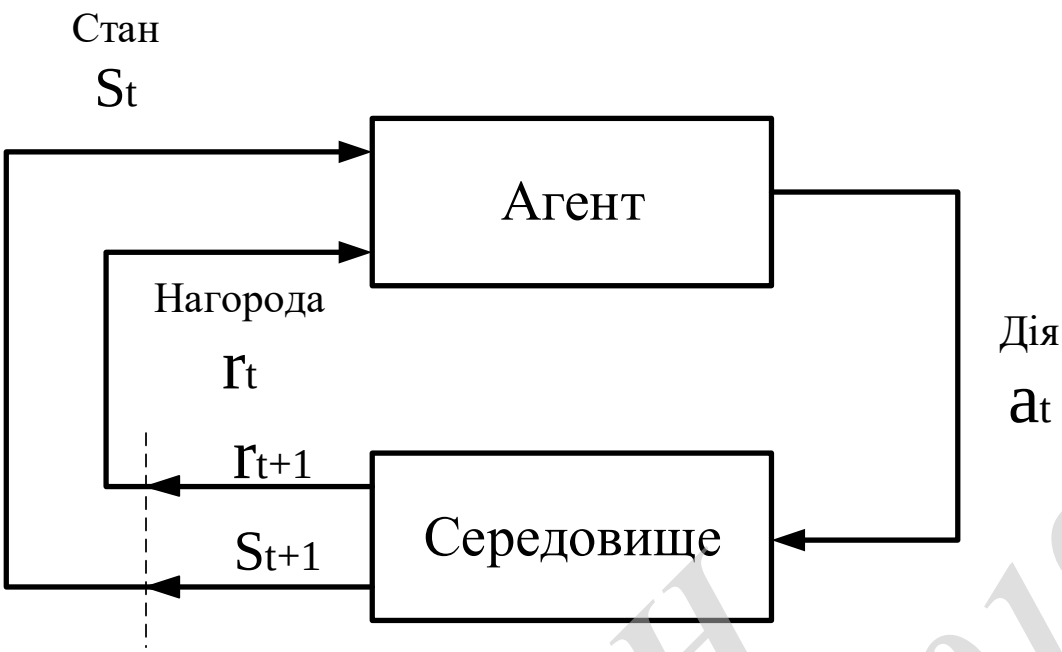
ВНТУ ФІРЕМ
ТКСТБ МКР 2019

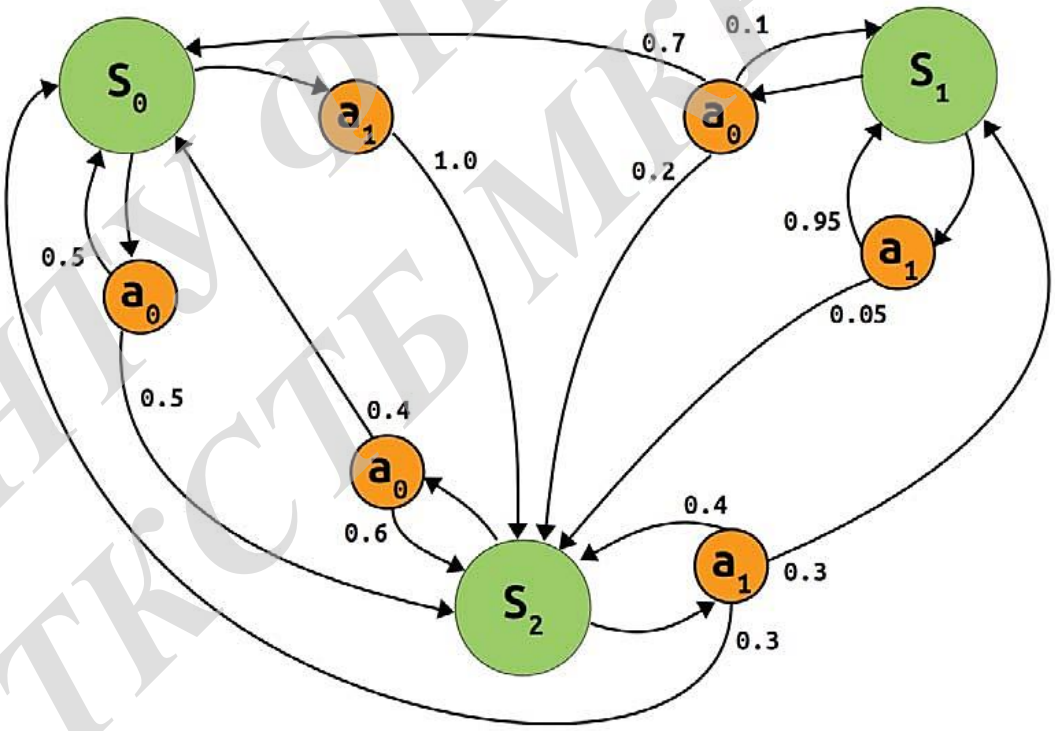
Додаток В

(обов’язковий)

Узагальнений механізм роботи навчання з підкріпленням

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019





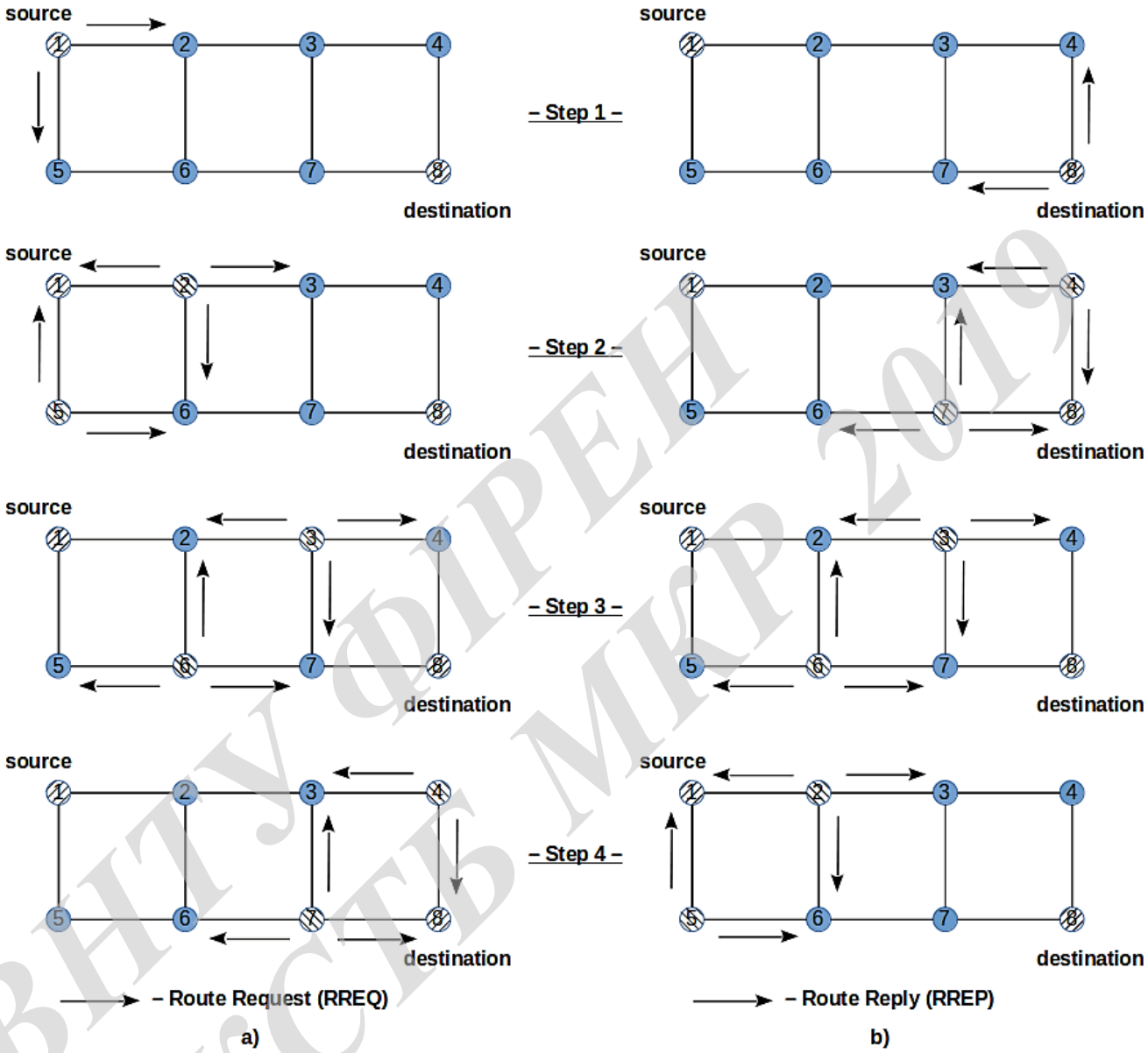
ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Додаток Г

(обов’язковий)

Процедура обміну RREQ і RREP повідомленнями

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019



ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

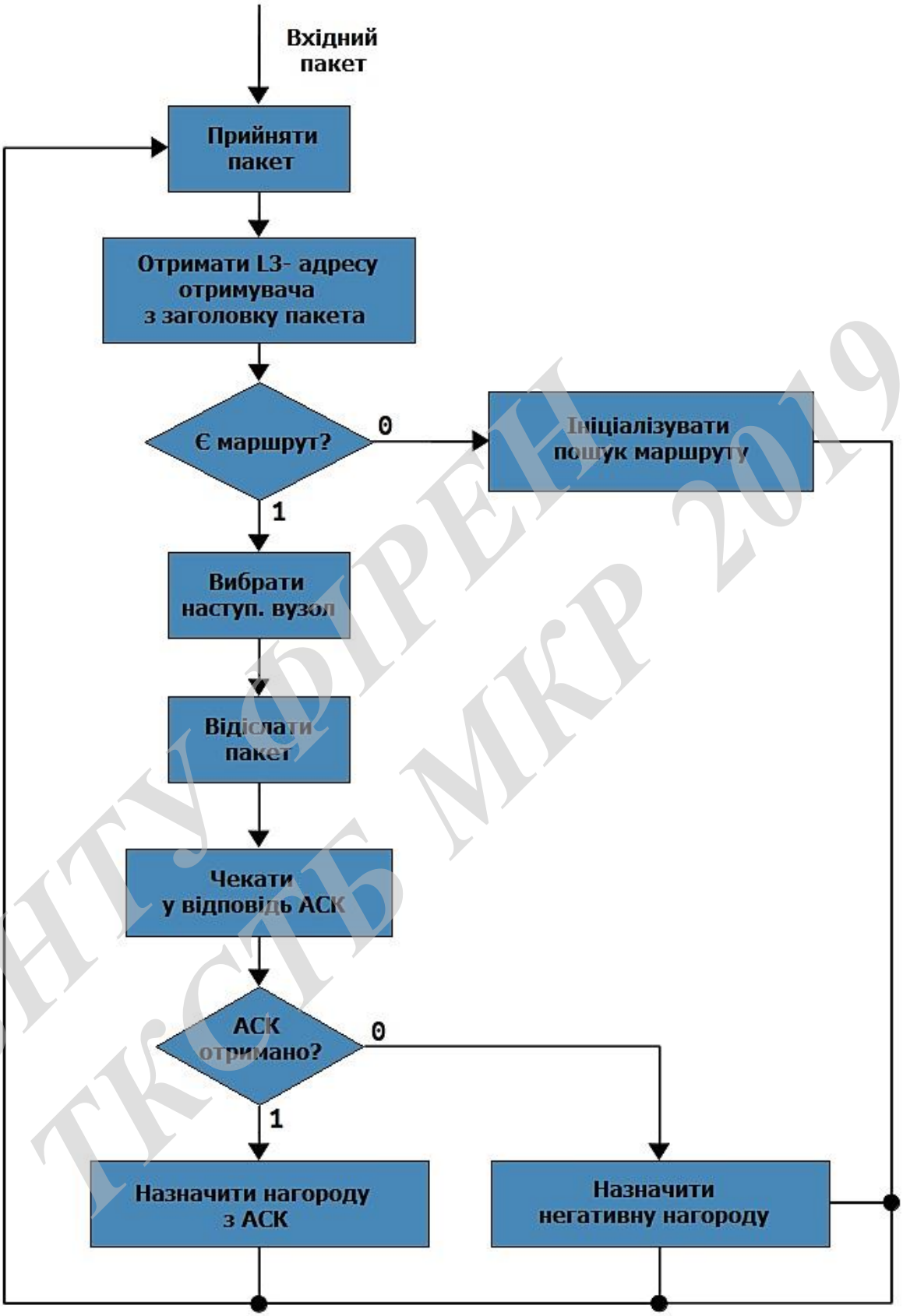
Додаток Д

(обов’язковий)

Логічна блок-схема зворотного зв'язку

.

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019



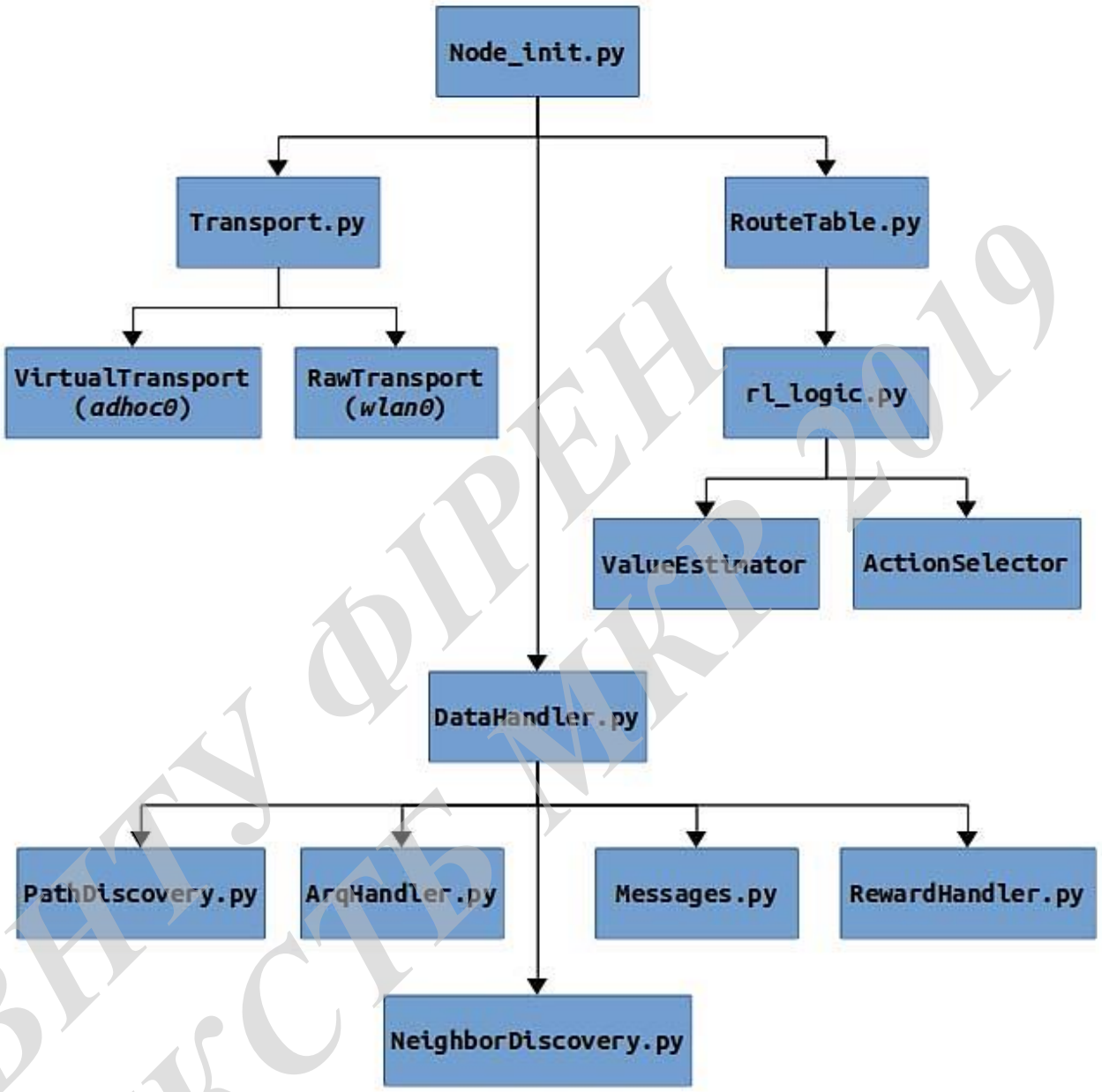
ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Додаток Е

(обов’язковий)

Узагальнена схема програмної імплементації протоколу.

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019



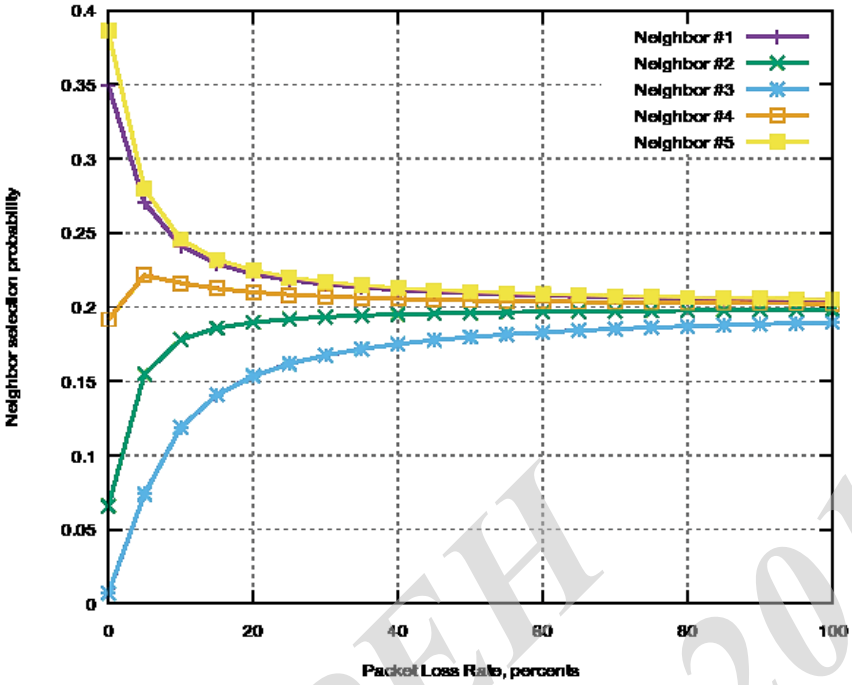
ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019

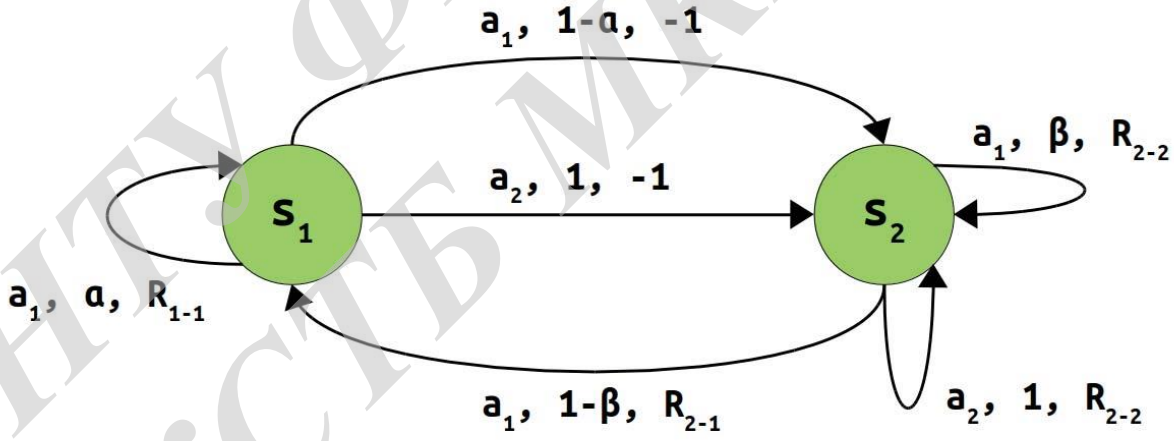
Додаток Є

(обов’язковий)

Розподіл ймовірностей вибору вузлів

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019





ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Додаток Ж

(довідниковий)

Допустимі значення виробничих чинників

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТБ МКР 2019

Таблиця Ж.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Ia	21-25	18-26	75	≤0,1
Теплий		22-28	20-30	55 при 28°С	0,1-0,2

Таблиця Ж.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин [4]

Назва шкідливої речовини	ГДК, мг/м^3	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

Таблиця Ж.3 – Число іонів в 1 см^3 повітря приміщення при роботі на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
позитивний	400	1500-3000	50000
негативний	600	3000-5000	50000

ВНТУ ФІРЕН ТКСТБ МКР 2019

Таблиця Ж.4 – Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення та мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об’єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об’єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Суміщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	г	великий	серед-ній	300	150	150	1,5	0,9

Таблиця Ж.5 – Допустимі рівні звукового тиску і еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку та еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Таблиця Ж.6 – Нормовані рівні віброприскорення [6]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц								Коректовані рівні віброприскорення, дБА
8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
73	73	79	85	91	97	103	109	76

ВНТУ ФІРЕН ТКСП МКР 2019

Таблиця Ж.7 – Мінімальні межі вогнестійкості приміщення [11]

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки				Плити, прогони	Балки, ферми
3	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	нн нн	нн нн

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см; M1 – M ≤ 25 см – для горизонтальних конструкцій; M ≤ 40 см – для вертикальних і похилих конструкцій; M2 – M > 25 см – для горизонтальних конструкцій; M > 40 см – для вертикальних і похилих конструкцій, нн – не нормується.

Таблиця Ж.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [13]

Об'єм приміщення, тис. м	Категорія пожежної небезпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, для щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м^2			Кількість людей на 1 м ширини евакуаційного виходу	Протипожежні розриви, м, при ступені їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Площа поверху в межах пожежного відсіку, м^2, для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	Б	3	40	25	15	45	9	12	15	1	5200	–	–

Примітки: н.о. – не обмежується, н.н. – не нормується.

ВНТУ ФІРЕН ТГСЗБ МКР 2019