

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ
НА ОСНОВІ MESH-МЕРЕЖ**

Студент групи ЕП.м – 91н



К.С. Однодворець

Науковий керівник,
к. ф.-м. н., ст.викладач



К. В. Тищенко

Завідувач кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики,
д.ф.-м.н., професор



І.Ю.Проценко

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи магістра є безпроводні мікроконтролерні модулі та їх прикладне використання в розподілених mesh-мережах.

Мета роботи полягає у вивченні принципів роботи та особливостей реалізації розподілених безпроводних мереж на базі стандартних протоколів зв'язку; Реалізації функціоналу розподіленої mesh-мережі на базі апаратних мікроконтролерних пристроїв, які працюють за стандартним безпроводним протоколом Wi-Fi.

У роботі розглянуто найбільш популярні безпроводні протоколи зв'язку, та особливості їх застосування при розгортанні mesh-мереж, показано їх основні переваги, недоліки та проаналізовано відмінності. У результаті проведених досліджень встановлено, що для використання в масштабах невеликих мереж доцільно використовувати пристрої з підтримкою протоколу Wi-Fi, оскільки він характеризується достатньою надійністю та захищеністю, а пристрої із його підтримкою широко розповсюджені і відносно простоті у налаштуванні.

Описано теоретичні аспекти розповсюдження радіохвиль у частотному діапазоні 2,4 ГГц та зроблено оцінку ослаблення сигналу при проходженні через перешкоди плоскої конфігурації (стіни будівель). На основі мікроконтролерного модуля ESP-8266 було реалізовано вузол mesh-мережі з передачею даних через віддалений сервер MQTT брокер. Описано функціональні можливості та можливі області застосування компонентів розподіленої безпроводної мережі.

Робота викладена на 35 сторінках, зокрема містить 8 рисунків, список цитованої літератури із 30 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БЕЗПРОВІДНИЙ ПРОТОКОЛ, МІКРОКОНТРОЛЕР, MESH-МЕРЕЖА, WI-FI, MQTT БРОКЕР.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. MESH-МЕРЕЖІ: ПРИНЦИП РОБОТИ, КОНСТРУКЦІЯ, ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	6
1.1 Огляд розповсюджених мережевих архітектур	6
1.2 Переваги та недоліки Mesh-мереж	8
1.3 Обґрунтування вибору засобів розробки.....	9
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТАНДАРТУ ТА ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ MESH-МЕРЕЖ	12
2.1 Децентралізація архітектури мережі	12
2.2 Протоколи для організації Wi-Fi Mesh-мереж	13
2.3 Постановка задачі з проектування мережі.....	15
2.4 Оцінка згасання Wi-Fi сигналу при проходженні через перешкоди	16
РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ І ПРОГРАМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТУ MESH-МЕРЕЖІ	22
3.1. Проектування мультиагентної mesh-мережі.....	22
3.2. Розробка вузла mesh-мережі з MQTT брокером	26
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33

ВСТУП

Інформаційні технології у сучасному світі відіграють величезну роль. Для доступу до інформації і створення глобального інформаційного простору використовуються комп'ютерні мережі передачі даних. Wi-Fi на сьогоднішній день широко використовується, але мало хто звертає увагу на те, що далеко не кожен маршрутизатор може впоратися з домашньою або публічною мережею. Сучасні Mesh-системи з кожним днем набирають популярність.

В умовах постійно зростаючих вимог до мереж передачі даних відбувається і розвиток засобів доступу до неї. Основним завданням є забезпечення швидкісного доступу до глобальних мереж на великі області. Велика увага приділяється розвитку бездротових засобів доступу, які дозволяють створювати мережеву інфраструктуру в різних умовах без складнощів, які властиві дротовим мережам.

Спочатку бездротові мережі не мали достатньої швидкості і територіального охоплення. Поліпшення методів кодування і використання інших частот дозволило покращити швидкісні характеристики, однак, нічого принципіально нового запропоновано не було. Через всю зростаючу популярність бездротового доступу до локальних і глобальних мереж, зросла актуальність розробки нових технологій бездротового доступу, таких як бездротові mesh-мережі, що відповідають стандарту 802.11 - 802.11s. Mesh-мережі дозволяють збільшувати область бездротового покриття за рахунок залучення самих вузлів передачі даних, в процесі маршрутизації. Це дозволяє скоротити кількість необхідних точок доступу і збільшити територію бездротового доступу.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала в аналізі літературних джерел стосовно конструктивно-технологічних та програмних характеристик mesh-мереж як сучасних електронних систем.

Результати роботи представлені і обговорені на Науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2021» (м.Суми).

РОЗДІЛ 1

MESH-МЕРЕЖІ: ПРИНЦИП РОБОТИ, КОНСТРУКЦІЯ, ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1 Огляд розповсюджених мережевих архітектур

Стандартні маршрутизатори виконують функції по елементарному принципу. Роутер підключений до мережі, а до самого роутера підключаються клієнти. Вони задіюють маршрутизатор, щоб передавати дані між собою і мати доступ до Інтернету. У таких випадках швидкість буде визначена саме заданими пристрою технічними характеристиками. Також на якість впливатиме відстань, присутність тих чи інших перешкод і кількість підключених пристроїв. І завжди в будинку буде таке місце, де сигнал на стільки слабкий, що їм взагалі не можна скористатися. Такі проблеми можна вирішити покупкою Wi-Fi роутерів, прокладанням окремого кабелю або використання додаткової точки доступу.

У комерційному сегменті проблеми такі ж, тільки більш масштабні [1-3]. Тому багато хто використовує Mesh мережі (рис.1.1). Чим же Mesh відрізняється від звичайного маршрутизатора? Вся справа в тому, що Mesh-мережа це не один пристрій, а кілька. Кожен окремий елемент відповідає за свою площу, де стежить за підключеними клієнтами і надає їм доступ до Internet. Що цікаво, так це те, що безпосередньо до Інтернет потрібно підключати тільки головний модуль (базу). Решта модулів підключаються до головного модулю для отримання доступу і роздачі його приєднаним клієнтам. Wi-Fi мережу в такому випадку створюється єдина для всієї сумарної площі від всіх модулів. В Mesh-мережах аналізується кожний зв'язок між модулями [4]. Самі модулі обмінюються даними про всіх підключених клієнтів. І сама мережа вирішує, до якого модулю підключити клієнта, щоб у нього був найкращий сигнал. До того ж передача даних між гаджетами всередині мережі може відбуватися і без участі головного модуля.

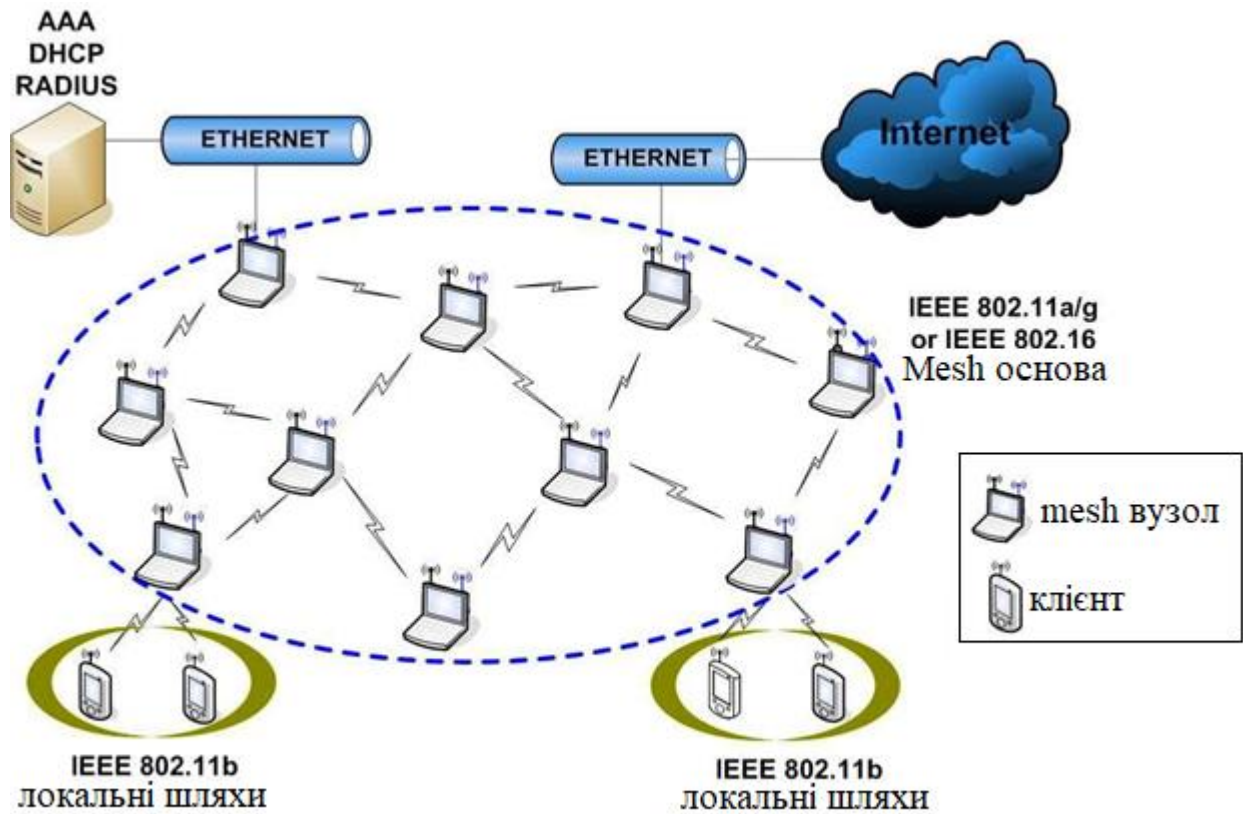


Рис.1.1. Топологія Mesh-мереж. Із роботи [1]

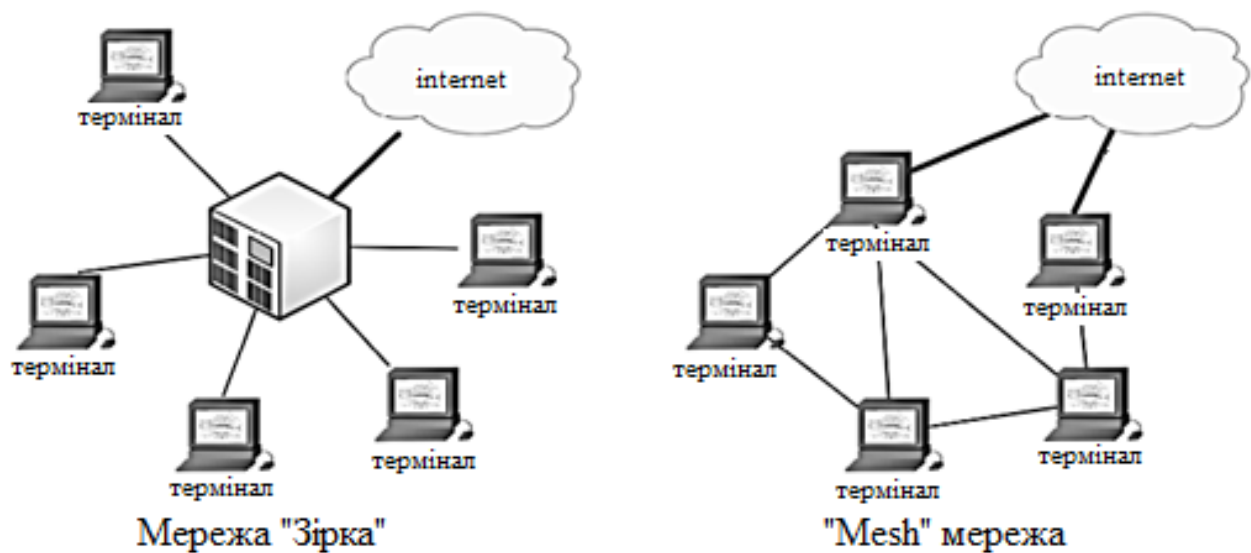


Рис.1.2 Порівняння структури стандартного маршрутизатора та Mesh-мережі. Із роботи [1]

Висока швидкість доступу до Internet зберігається за рахунок того, що в Mesh-рішеннях присутній окремий канал для обміну інформацією між собою, тому інформація направляється по найбільш короткому шляху. Як бачите, можна порівняти з тим, що Mesh-мережі складаються з пов'язаних між собою маршрутизаторів.

Основна різниця між мережами зв'язку та Mesh-системами в тому, що це бездротові мережі, які мають можливість динамічно самоорганізуються та самоконфігуруються. Система має топологію зірка, що означає, що всі кінцеві вузли підключені до єдиної центральної точки, яка з'єднується з верхній рівень мережі. На рис. 1.2 проілюстровано порівняння топології двох мереж.

1.2 Переваги та недоліки Mesh-мереж

Головна перевага Wi-Fi Mesh-мережі в тому, що це найпростіший спосіб розгортання швидкої Wi-Fi мережі на великих площах, який не вимагає прокладання кабелю і особливих знань. Все, що знадобиться, це наявність електричних розеток для подачі живлення модулів і будь-який смартфон зі спеціальним додатком для початкового налаштування мережі [5].

Робота Mesh-мережі в будинку. Рішення для дому надають можливість поєднати в одну мережу до десяти модулів. Так можна покрити Wi-Fi не тільки великий будинок, але і прибудинкову територію. Пристрої працюють самі по собі. Як тільки буде додано новий модуль, мережа його побачить і задасть потрібну конфігурацію. До переваг Mesh-рішень також потрібно віднести легкість налаштування, найвищу продуктивність і масштабуюче покриття. По суті, кожен окремий модуль є маршрутизатором, тільки у нього набагато красивіший дизайн і він в рази менший звичного роутера. Недоліком є те, що у нього немає розширених налаштувань, як у маршрутизаторів. Тому просунуті користувачі залишаться трохи незадоволені. Також в більшості випадків немає USB-порту, а ще й обмежена кількість LAN-портів.

Mesh модулі TP-Link. TP-Link Deco E4 є базовою Mesh-системою представленого виробника. З її допомогою буде створена Wi-Fi мережу на частотах 5 і 2.4 ГГц з відповідними швидкостями 867 і 300 Мбіт/с. Присутні і LAN-порти з обмеженням по швидкості в 100 Мбіт/с. Така система відмінно підійде тим, хто не потребує максимальної швидкості через стандартного підключення і бажає користуватися безшовним Wi-Fi.

TP-Link Deco E4. На вигляд TP-Link Deco M4 нічим не відрізняється від Deco E4, тільки ось забезпечені вже гігабітними портами WAN / LAN.

TP-Link Deco M5. Новим рівнем стала mesh-система Deco M5. Модулі вже більш компактні і відрізняються більшою продуктивністю. До провайдера можна під'єднатися на швидкостях до 1 Гбіт / с. Швидкість Wi-Fi в каналі 2.4 ГГц збільшилася до 400 Мбіт/с, а для каналу 5 ГГц залишилася на тому ж рівні в 867 Мбіт/с. Кількість вбудованих антен збільшилася в 2 рази. Тепер їх 4. Багато корисних функцій крім батьківського контролю і можливості створення гостьових мереж. До того ж є вбудований антивірус для ефективного захисту пристроїв в мережі.

TP-Link Deco P7. Найбільш просунутою Mesh-системою TP-Link на сьогоднішній день є Deco P7. Технічні характеристики аналогічні Deco M5. Відрізняється тим, що оснащена додатковим Powerline інтерфейсом, у якого швидкість приєднання досягає 600 Мбіт / с. З його допомогою можна задіяти звичайну електропроводку з метою передавати інформацію між модулями. Це дозволяє розміщувати модулі на великій відстані один від одного і таким чином створювати Wi-Fi мережі на значно більших площах.

1.3 Обґрунтування вибору засобів розробки

Mesh-мережі – перспективний клас широкосмугових бездротових мереж передачі мультимедійної інформації, який в найближчі роки знайде широке застосування в локальних і розподілених міських бездротових мережах (альтернатива WiMAX), в мультимедійних сенсорних мережах і т.д. [1, 3-5]

Один з головних принципів побудови mesh-мережі – самоорганізація архітектури, що забезпечує такі можливості:

- топологія мережі «кожен з кожним»;
- стійкість при відмові окремих компонентів;
- масштабованість мережі – збільшення зони інформаційного покриття в режимі самоорганізації;
- динамічна маршрутизація трафіку, контроль стану мережі і т.д.

Mesh-мережі можуть бути стаціонарними або мобільними. Вузлами мобільної мережі можуть бути кишенькові ПК, мобільні телефони і т.п. Mesh-мережі описує стандарт IEEE 802.11s, зміни в якому практично не чіпають фізичний рівень. Всі нововведення відносяться до MAC-підрівня каналного рівня. Крім того, в стандарті 802.11s розглядаються питання маршрутизації пакетів в рамках mesh-мережі (мережевий і транспортний рівень моделі OSI, що виходить рамки IEEE 802.11).

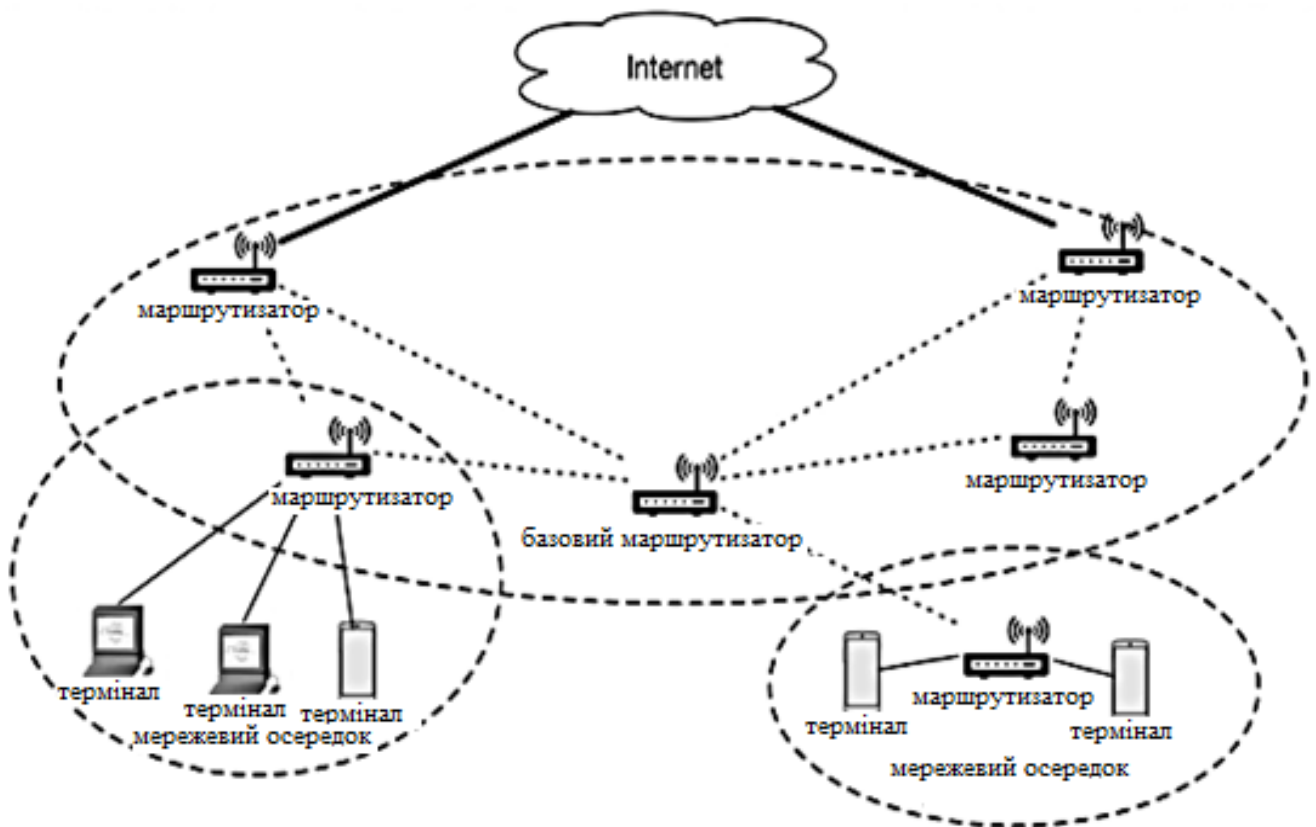


Рис.1.3. Гібридна структура Mesh-системи. Із роботи [5]

Інтегрувати гібридну мережеву структуру мережі в існуючу мережі є більш складним, але більш корисним завданням. Замість перемикання маршрутизаторів та базових станцій, користуються перевагами гібридної мережі, мережевого модуля. Функціональність взаємозв'язку повинна бути додана до модулів. Це можна зробити, перепрограмувавши його. У модулях зберігають не тільки власні дані, але і передані дані з інших модулів також потрібні раніше дані надсилаються. Функція мережевого спостереження також є важливою для підтримки функції самоконфігурації, як це може кожен вузол підключитися до оптимізованого вузла поблизу, коли є новий вузол запроваджено в мережі. Це можна зробити, відрегулювавши ВЧ модуль швидше шукає доступні вузли, коли ні підключений. Інтеграція таких можливостей додасть більше споживання енергії в кожному вузлі, і це може спричинити зниження рівня обслуговування певних пристроїв IoT [6].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СТАНДАРТУ ТА ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ MESH-МЕРЕЖ

2.1 Децентралізація архітектури мережі

Бездротові технології доступу дозволяють вирішити проблему доставки послуг абоненту. Це завдання може бути реалізована з використанням двох перспективних систем, системи рівня району - Wi-Fi Mesh, системи міського масштабу - WiMAX. WiMAX є централізованою системою, основана на створенні базових станцій, які концентрують трафік з певного сектора в одній точці. Однак при використанні цієї технології мобільність абонентських пристроїв майже відсутня.

Технологія Mesh (стандарт IEEE 802.11s) дозволяє повністю децентралізувати архітектуру мережі та збільшити зону її дії.

Мета розробки стандарту IEEE 802.11s - забезпечення автоматичної маршрутизації між вузлами мережі Wi-Fi, в якій кожен вузол для передачі інформації здатний задіяти сусідні, використовуючи (multi-hop) механізм перерозподілу трафіку і не більше 5% пропускної здатності каналу. Стандарт IEEE 802.11s регламентує протоколи виявлення, ідентифікації і встановлення з'єднання між сусідніми пристроями. Сукупність пристроїв, що працюють в мережі за стандартом IEEE 802.11s, утворює mesh-мережу. Таким чином, реалізується концепція поступового зростання і захоплення нових територій міста за допомогою розподілення мережі. Почавши розвиток мережі в одній точці, в ідеалі можна збільшувати зону її дії, просто додаючи нові пристрої. Прокладення додаткових комунікацій не потрібно.

Системи WiMAX і Wi-Fi Mesh мають різний підхід до побудови міської мережі – від глобального охоплення до поступового розвитку. Вони повинні доповнювати один одного, а не конкурувати між собою. WiMAX призначена забезпечувати транспорт даних в районі зосередження абонентів, а Wi-Fi Mesh

повинна виявити охоплення відокремлених, наприклад «спальних», мікрорайонів.

Висока мобільність mesh мереж дозволяє їх використовувати в специфічних ситуаціях, наприклад для створення системи зв'язку між ключовими об'єктами міської інфраструктури, розгортання мережі для екстрених служб в місцях, де немає вільного доступу до глобальної мережі [7, 8]. Плюси такої реалізації очевидні: всі мобільні об'єкти мають можливість бути на зв'язку незалежно від їх місцезнаходження, швидкості пересування і т.д. Швидке оповіщення в такій мережі забезпечить швидке реагування, а відповідно і більш високий рівень безпеки .

2.2 Протоколи для організації Wi-Fi Mesh-мереж

Найбільш популярними сучасними протоколами для організації Wi-Fi Mesh мереж є: CJDNS; B.A.T.M.A.N; DTN; Netsukuku; OSPF.

Розглянемо їх основні характеристики [2, 9]:

- авто-призначення адреси - клієнт сам вибирає собі адресу та може не міняти його, переходячи з однієї під мережі в іншу, немає єдиного центру видачі адресу;
- авто-маршрутизація – немає необхідності вручну налаштовувати маршрутизацію в мережі;
- розподілена маршрутизація – вузли обмінюються інформацією про маршрутизації;
- об'єднання мереж - вміє об'єднувати мережі через звичайний інтернет IPv / v6 - за яким протоколом працює мережа;
- авто-налаштування - дозволяє користуватися мережею без встановлення ПО;
- розробка - статус розробки мережі;
- підтримка OS - які операційні системи можуть бути повноцінними учасниками мережі.

Протокол AODV є протоколом, використовуваним для створення топології мережі реактивним способом, що означає його властивість встановлювати маршрут до потрібного хоста на вимогу. Якщо вузлу мережі А потрібно передати дані вузлу мережі В, а відповідний маршрут невідомий, то вузол А посилає ширококомовний запит PREQ для пошуку маршруту до вузла В. Цей запит передається сусідам вузла А, ті пересилають його своїм сусідам і т.д. Коли до якогось вузла приходиться запит PREQ, він записує туди дані про себе і пересилає далі, відповідно, кожен вузол, який отримав запит знає маршрут, по якому запит пройшов від вузла-ініціатора до нього.

Через якийсь час цей запит дійде або до вузла В, або до вузла, який знає маршрут від себе до вузла В. В обох випадках вузлу А відправляється відповідь PREP, який йде вже не ширококомовно, а цілеспрямовано по знайденому маршруту. В результаті вибудовується двонаправлений маршрут. Як тільки вузол А отримує відповідь PREP, він відразу ж починає передачу даних по цьому маршруту, не чекаючи відповіді по інших каналах. Якщо через деякий час виявиться, що існує більш короткий маршрут, вузол автоматично продовжить відправляти пакети коротшим шляхом .

Формат пакета AODV виглядає наступним чином [3, 9-11]:

- Тип (8 біт) - «1»
- Прапор «J» - встановлюється, якщо RREQ передається ширококомовно
- Прапор «R» - встановлюється при відновленні маршруту
- Прапор «G» - встановлюється в тому випадку, якщо необхідно встановити не тільки маршрут до вузлоотримувача, а й зворотний маршрут від вузлоотримувача до вузлоініціатора.
- Прапор «D» - встановлюється, якщо необхідно доставити повідомлення RREQ безпосередньо до вузлоотримувача.
- Прапор «U» - встановлюється в тому випадку, якщо порядковий номер вузлоотримувача невідомий.
- 11 біт зарезервовано

- Hop Count (Кількість переходів) - 8 біт
- RREQ ID (ідентифікаційний номер повідомлення RREQ)
- IP-адресу вузлоотримувача (Destination IP Address)
- Порядковий номер вузлоотримувача (Destination Sequence Number)
- IP-адресу вузлоініціатора (Originator IP Address)
- Порядковий номер вузлоініціатора (Originator Sequence Number)

Після того, як маршрут створений, відправляються пакети без маршрутної інформації. Агенти А і В зберігають інформацію про зв'язує їх маршруті. Якщо цей зв'язок довгий час не використовується, то всі дані про неї стираються.

Гібридний протокол маршрутизації mesh-мережі (Hybrid Wireless Mesh Protocol) заснований на протоколі AODV. Згідно з цим протоколом вузли мережі можуть шукати шляхи двома способами, в тому числі і поєднуючи їх:

- Реактивний спосіб. Має на увазі пошук шляху безпосередньо перед відправкою інформації аналогічно протоколу AODV.
- Проактивний спосіб. Чи означає, що пошук шляху відбувається регулярно, незалежно від вимоги передати дані в поточний момент часу. Процедурю ініціює кореневий вузол, в результаті на мережі будується графік шляхів з вершиною в кореневому вузлі. Кореневий вузол вибирається на самому початку, тобто мережа є централізованою.

Динамічна маршрутизація від джерела (Dynamic Source Routing). DSR - протокол маршрутизації з топологією mesh. Схожий з AODV тим, що формує маршрут на вимогу через циркулярний запит. Однак істотна відмінність між цими двома протоколами в тому, що DSR постійно оновлює маршрутизацію. Тобто інформація про маршрут зберігається в кожному повідомленні.

2.3 Постановка задачі з проектування мережі

Розглянемо систему нерухомих приймачів для збору інформації на великій території [1, 2, 12-14]. Наприклад, передавачі розкидаються в лісі і вимірюють

температуру навколишнього середовища з метою швидкого оповіщення про лісові пожежі. Радіус зв'язку кожного передавача не охоплює всю територію. Кожен агент має можливість зв'язуватися всього з декількома сусідніми агентами. Потрібно запропонувати алгоритм, що дозволяє об'єднати всі ці передавачі (далі агенти) в порожнисту мережу, в якій агенти зможуть зв'язуватися один з одним і передавати інформацію.

Отримана мережа повинна відповідати таким властивостям:

- кожен агент має обмежений заряд батареї;
- система складається з декількох сотень агентів, рівномірно розподілених по великій площі. Кожен агент має обмежений радіус зв'язку, в який потрапляє кілька інших агентів. При консультації з експертами було встановлено, що для охоплення заданої території потрібно близько 300 агентів;
- поруч з мережею існує агрегатор з безперебійним джерелом живлення, який може запитувати інформацію, що зберігається на конкретних вузлах mesh-мережі. Дальність дії приймач агрегатора така, що може взаємодіяти лише з деякими найбільш близькими агентами мережі;
- мережа повинна бути стійкою до втрати агентів і вміти відновлювати маршрути в такому випадку;
- система повинна гарантовано функціонувати в середньому довше, ніж при використанні існуючих алгоритмів. Система буде вважатися такою, що вийшла з ладу, якщо якийсь з агентів втратить зв'язок з агрегатором і не зможе її відновити. Також потрібно змодельовати отриману мережу на одній з мов програмування і порівняти терміни максимальні терміни гарантованого функціонування системи з мережею, побудованої по протоколу AODV.

2.4 Оцінка затухання Wi-Fi сигналу при проходженні через перешкоди

Проблемі поширення радіохвиль усередині приміщень останнім часом приділяється все більша увага. Це пов'язано, перш за все, з модернізацією локальних інформаційних мереж за допомогою технології Wi-Fi [4, 15, 16].

Наявність всередині будівлі стін, меблів, радіоелектронної апаратури та інших об'єктів створює складне середовище для поширення радіохвиль, котре істотно відрізняється від вільного простору. Основними ефектами, що спостерігаються при поширенні радіохвиль усередині приміщень, є багатопромінність, обумовлена багаторазовими відбиванням радіохвиль від стін і інших об'єктів, дифракція на краях предметів і загасання радіохвиль при проходженні через перешкоди.

У каналах бездротового зв'язку спостерігаються загасання сигналів двох типів - крупнозернисте і дрібнозернисте [1, 17]. Крупнозернисте загасання відображає середнє ослаблення потужності сигналу внаслідок поширення на відстань. Крупнозернисте загасання визначається наявністю уздовж траєкторії поширення таких об'єктів, як стіни, двері, перекриття будівель та ін. Дослідження крупнозернистого загасання дозволяють приблизно розрахувати втрати на шляху, як функцію відстані. У цьому випадку потужність сигналу зменшується з відстанню за степеневим законом, а відхилення від середнього значення визначаються логарифмічно нормальним розподілом.

Дрібнозернисте загасання обумовлено варіаціями амплітуди і фази сигналу на масштабах порядку довжини хвилі і проявляється як розширення сигналу в часі (часове розсіювання) і нестационарну поведінку частотного каналу зв'язку. У системах бездротового зв'язку параметри каналу змінюються в часі через рух передавача або приймача. Дрібнозернисте загасання називається релеєвським, якщо пряма видимість між передавачем і приймачем відсутня, а сигнал в точку прийому приходить в результаті багаторазових відбивань від різних об'єктів. Якщо між передавачем і приймачем пряма видимість, то дрібнозернисте загасання описується функцією щільності ймовірності Райса [18-20]. Цей вид загасання вносить значний вклад в затухання в каналах мобільного зв'язку через те, що поширення сигналу відбувається на великі відстані. У разі ж поширення Wi-Fi сигналу в межах будівлі цим видом загасання можна знехтувати.

Величина крупнозернистого загасання сигналу залежить як від відстані від точки передачі, так і від частоти сигналу. При вимірюванні в децибелах

величини загасання сигналу використовують співвідношення [2, 20]:

$$L = 20X \lg\left(\frac{4\pi \cdot d \cdot f}{c}\right), \quad (1)$$

де X - коефіцієнт ослаблення, рівний 1 для відкритого простору; d - відстань від точки передачі; f - частота сигналу; c - швидкість світла.

Із співвідношення безпосередньо випливає, що зі збільшенням частоти переданого сигналу збільшується і його загасання. На рис. 2.1 показана геометрична схема проходження електромагнітної хвилі при поширенні Wi-Fi сигналу через перешкоду.

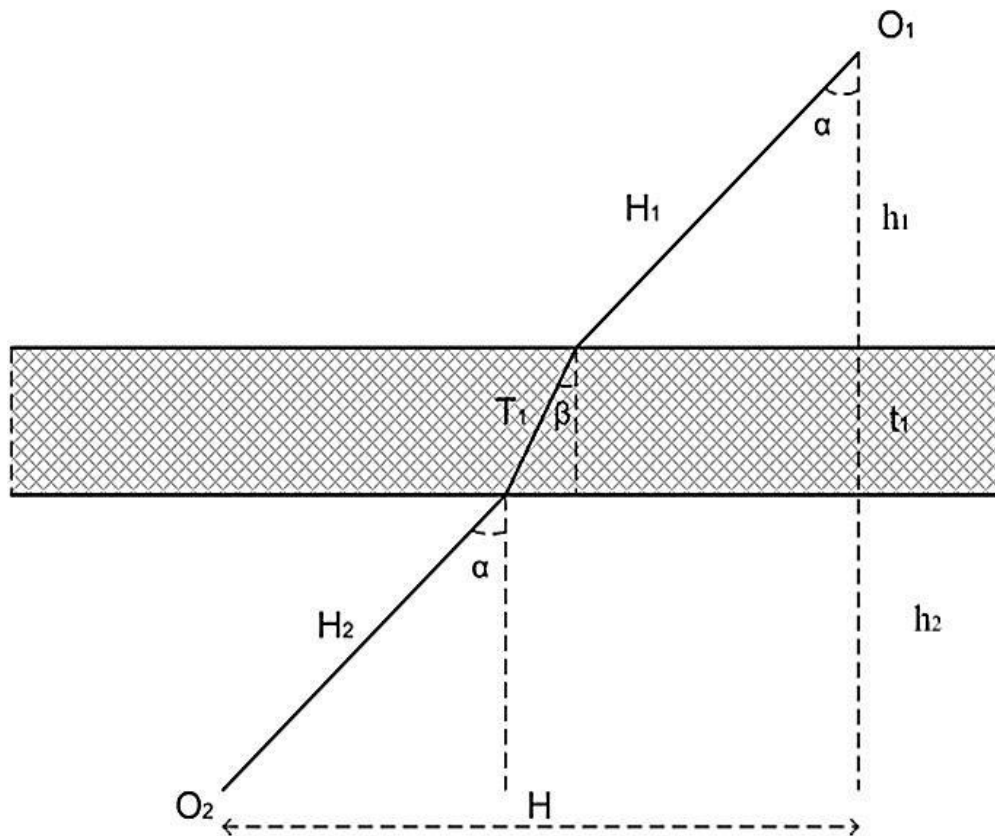


Рис.2.1. Поширення Wi-Fi сигналу через перешкоду

Нехтуючи в першому наближенні перевідбиваннями хвилі всередині середовища на межах поділу, загальне затухання в точці O_2 запишемо у вигляді:

$$L = L_{H_1} + L_{O_1} + L_{T_1} + L_{O_2} + L_{H_2}, \quad (2)$$

де L_{H_1} - загасання, викликане проходженням ділянки відкритого простору H_1 ; L_{O_1} - загасання, викликане віддзеркаленням частини хвилі від межі двох середовищ; L_{T_1} - загасання, викликане проходженням ділянки стіни довгою T_1 ; L_{O_2} - загасання, викликане віддзеркаленням частини хвилі від межі двох середовищ; L_{H_2} - загасання, викликане проходженням ділянки відкритого простору H_2 .

Таким чином, загасання L_{H_1} , L_{T_1} , L_{H_2} будуть визначатися за співвідношеннями:

$$L_{H_1} = 20 \lg\left(\frac{4\pi H_1 f}{c}\right), \quad L_{H_1} = K_m \lg\left(\frac{4\pi T_2 f}{c}\right), \quad L_{H_2} = 20 \lg\left(\frac{4\pi H_2 f}{c}\right).$$

Більшість антен, використовуваних в WLAN, є антенами з вертикальної поляризацією. Таким чином, загасання L_{O_1} і L_{O_2} , викликані відображенням частини хвилі від межі двох середовищ знаходимо на основі співвідношень:

$$L_{O_1} = 10 \lg\left(\frac{P}{P_{np}}\right) = 10 \lg\left(\frac{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta}{(n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta)^2}\right), \quad (3)$$

$$L_{O_2} = 10 \lg\left(\frac{P}{P_{np}}\right) = 10 \lg\left(\frac{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta}{(n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta)^2}\right), \quad (4)$$

де P і P_{np} - потужність сигналу до відбиття від межі двох середовищ і потужність сигналу після проходження кордону двох середовищ; n_1 і n_2 - показники заломлення середовища 1 і середовища 2.

Таким чином, загальне загасання сигналу при проходженні відстані від передавача до приймача буде визначатися формулою [20]:

$$L = 20 \lg\left(\left(\frac{4\pi f}{c}\right)^2 H_1 H_2\right) + 20 K_m \lg\left(\frac{4\pi T_2 f}{c}\right) + \quad (5)$$

$$+ 10 \lg \left(\frac{(4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta)^2}{((n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta)(n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta))^2} \right), \quad (6)$$

У разі, якщо кількість стін буде k і матеріал їх однаковий, співвідношення (5) матиме вигляд:

$$L = 20 \lg \left(\left(\frac{4\pi f}{c} \right)^{k+1} H_1 H_2 \dots H_{k+1} \right) + 20 K_m \lg \left(\frac{4\pi f}{c} \right)^k T_1 T_2 \dots T_k + \\ + 20 \lg \left(\frac{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta}{(n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta)(n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta)} \right) \sum_{i=1}^k i. \quad (7)$$

Також слід брати до уваги фокусування радіохвилі внаслідок рефракції

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (8)$$

В діапазоні частот 3-5 ГГц діелектрична проникність цегли і бетону змінюється слабо і становить $\varepsilon \approx 3,5 - 4,0$, тому при розрахунках можна брати $n_1 = 1$ (повітря), $n_2 = 1,9-2$ (стіна).

Ослаблення сигналу при розповсюдженні хвилі від точки O_1 в точку O_2 буде визначатися так:

$$L = 20 \lg \left(\left(\frac{4\pi f}{c} \right)^2 h_1 h_2 \sin^2 \alpha \right) + 20 K_m \lg \left(\frac{4\pi n_1 \sin \beta}{c} \right)^k + \\ + 20 \lg \left(\frac{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta}{(n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta)(n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta)} \right). \quad (9)$$

Внаслідок фокусування хвилі відбуватиметься зміщення хвилі і, отже, зменшення відстані H . Відносне зміна буде визначатися формулою:

$$\Delta H = (h_1 + t_1 + h_2) \tan \alpha - (h_1 + h_2) \tan \alpha - t_1 \tan \beta = (\tan \alpha - \tan \beta) t_1. \quad (10)$$

Таким чином, зміщення хвилі буде визначатися товщиною стіни і різницею тангенсів кутів. З урахуванням співвідношення (10) зсув хвилі ΔH в залежності від кута падіння α і товщини стін показано на рис. 2.2.

Зміщенням хвилі можна знехтувати, якщо воно не перевищує 1 метра.

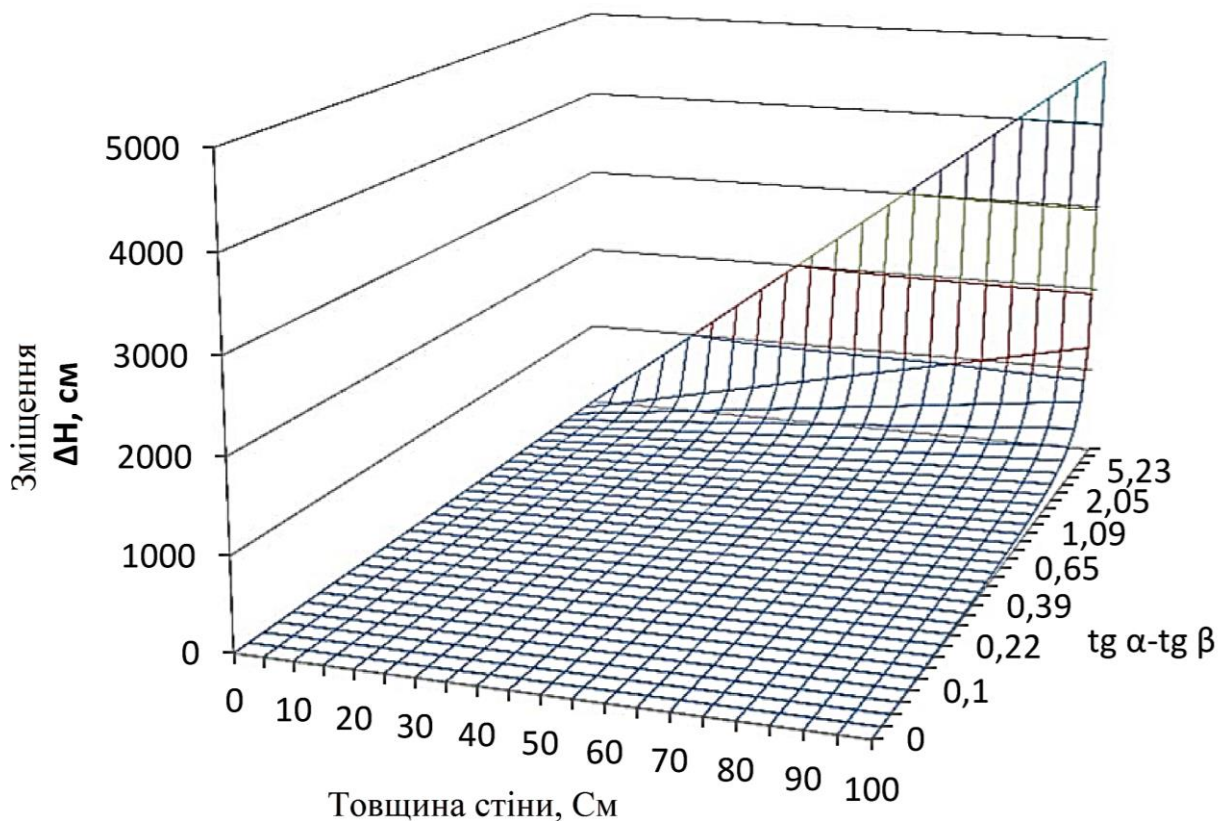


Рис. 2.2 Залежність зсуву хвилі від товщини стіни та кута падіння

Вищевказаний алгоритм дозволяє отримати значення кута падіння хвилі в межах заданої похибки. Швидкість збіжності алгоритму буде визначатися параметрами H , h_1 , h_2 , t_1 . При необхідності збільшення точності алгоритму обчислення кута падіння слід зменшувати ΔH .

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ І ПРОГРАМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТУ MESH-МЕРЕЖІ

3.1. Проектування мультиагентної mesh-мережі

У реальних умовах система буде реалізована безпосередньо на пристроях. В рамках нашого завдання потрібно тільки спроектувати систему і протестувати її на одній з мов програмування. Для тестування алгоритму була вибрана мова C# під платформою .NET Framework 4.5. В ході роботи використовувалася IDE Visual Studio 2013. Було прийнято рішення створити новий протокол на базі вже існуючих і описаних вище. Як базовий був обраний AODV. Оскільки в нашій системі передбачається велика кількість повідомлень, заново встановлювати таблиці маршрутизації перед кожною відправкою даних буде складно, тому був обраний проактивний метод визначення топології комірчастої мережі, оскільки він більш ефективний з точки зору енерговитрат в рамках поточної задачі (рис. 3.1).

Повідомлення передаються по радіоканалу. Принцип передачі радіосигналу наступний. Інформація кодується модуляцією несучої частоти. Передавач випромінює електромагнітні хвилі в деякому проміжку частот. Змінами частот в даному проміжку кодується сигнал. Передавач витрачає енергію на генерацію електромагнітних хвиль і обробку повідомлень, в зв'язку з чим можемо вважати, що залежність між кількістю переданої інформації і енерговитратами лінійна. Крім генерації хвиль передавач витрачає енергію на включення випромінювання, але в першому наближенні цими витратами можна знехтувати. При включенні кожен агент розсилає ширококомовний запит на пошук агрегатора. Запит складається з повідомлення, в якому містяться: Id агента-ініціатора; список вже відвіданих агентів.

Коли агент отримує такий запит, він перевіряє, чи міститься його id в списку відвіданих агентів. Якщо немає, то додає його туди і розсилає оновлений

запит. В іншому випадку ніяких дій не відбувається. Коли такий запит доходить до агрегатора, він відсилає у відповідь запит по шляху, що зберігається в списку відвіданих агентів. Коли у відповідь запит досягає агента-ініціатора, той починає передачу даних по отриманому шляху. Якщо ж в якийсь момент до агрегатора доходить запит з більш коротким шляхом, то відправляється ще один відповідний запит за оновленим шляхом, а агент-ініціатор, отримавши його, негайно починає використовувати більш короткий шлях. Таким чином, видно, що основа алгоритму схожа з алгоритмом AODV.

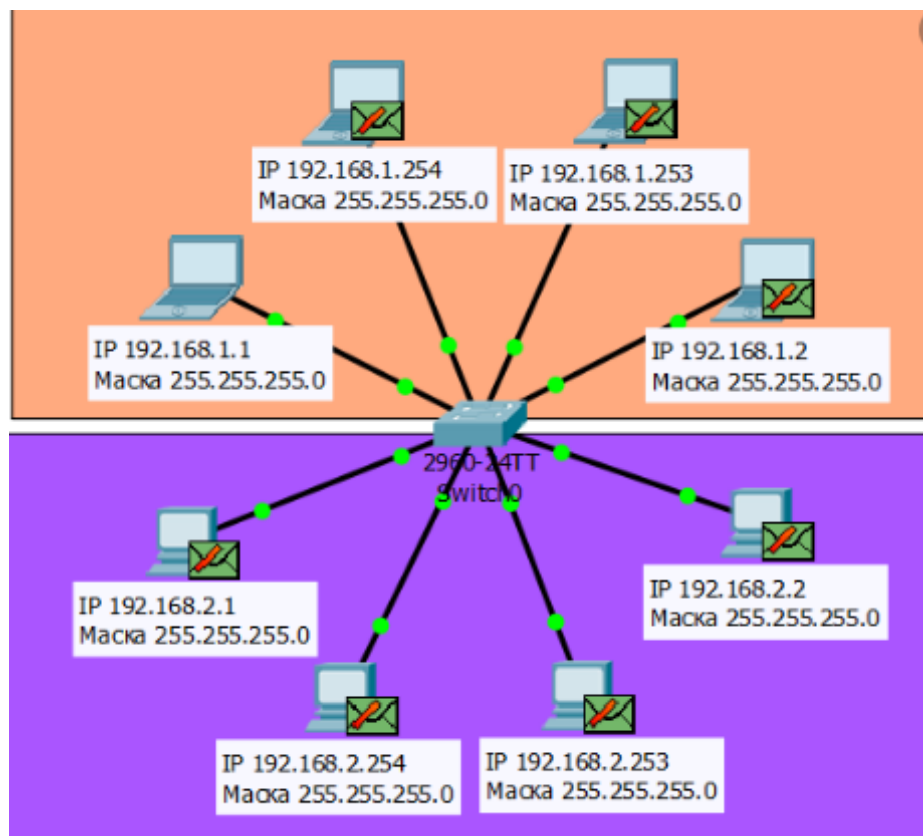


Рис. 3.1. Формат широкомовного запиту. Адаптовано із роботи [6]

Як було сказано в постановці завдання, в передбачуваному використанні заплановано приблизно 300 агентів. Щоб мінімізувати енерговитрати і максимально продовжити життя системі, ми можемо видозмінити алгоритм конкретно під це завдання.

Обсяг інформації, що передається планується не дуже великим, оскільки

агенти збирають інформацію про навколишнє середовище, наприклад температуру і вологість. Таким чином, виходить, що обсяг корисної інформації можна порівняти з об'ємом службової інформації. Першим кроком очевидно припустити, що варто зменшити обсяг службової інформації повідомлення. Для того, щоб зберігати Id кожного агента досить всього 9 біт (такою кількістю біт ми можемо закодувати до 512 чисел).

Саме повідомлення має наступний вигляд:

- Id агента відправника (9 біт).
- Id агента одержувача (9 біт).
- Список агентів, через які повідомлення повинно пройти (за 9 біт на кожного).

У результаті виходить, що кожне повідомлення має вагу $(18 + 9N)$, де N – кількість агентів, через які проходить повідомлення.

Перебалансування таблиць маршрутизації

Також потрібно, щоб вся система функціонувала максимально довго. Це передбачає, що кожен агент повинен існувати максимально довго.

Можлива ситуація, коли у різних агентів в початковий момент часу різні рівні заряду батарей. Також в процесі роботи неминуча незбалансована навантаження на агентів. Очевидно, що чим ближче агент знаходиться до штабу, тим більше повідомлень буде проходити через нього. У разі використання стандартного алгоритму AODV найзавантаженіші агенти вийдуть з ладу, що може порушити цілісність системи. Щоб цього уникнути пропонується використовувати граничне значення для рівня батареї агентів, при якому мережа буде перебудовувати існуючі таблиці маршрутизації, щоб по мінімуму навантажувати пристрої з розряджені акумуляторами. Агрегатор зберігає всю інформацію про маршрути в мережі, в той час як агенти знають тільки про оптимальний шлях. Кожен список маршрутів до конкретного вузла відсортований за кількості проміжних ланок (рис. 3.2). Якщо рівень заряду батареї якогось з агентів A досяг критичного мінімуму, агрегатор для кожного агента, який використовує даний вузол A , вибирає наступний по довжині

Порівняння з AODV. Як тестування були згенеровані мережі з рівномірно розподіленими агентами по квадратним областям. В ході експериментів змінювалися такі параметри:

- кількість агентів;
- радіус зв'язку агентів;
- розміри досліджуваної області.

У роботі проведено 2 тестування. В рамках першого тестування проводилося порівняння роботи мережі, побудованої за протоколом AODV з роботою мережі, побудованої за описаним вище алгоритмом, але без об'єднання повідомлень. Зроблено це було, оскільки невідомо, як часто в реальній системі буде виникати ситуація, сприятлива для об'єднання повідомлень. По-перше, повідомлення можуть приходити дуже рідко. По-друге, в разі сильних радіоперешкод краще передавати дані маленькими частинами, щоб при втраті якогось пакета було простіше його відновити.

3.2. Розробка вузла mesh-мережі з MQTT брокером

Одним з популярних відкритих протоколів зв'язку для комунікації у mesh-мережах є MQTT. Його основою є http(s) сокет з'єднання. Протокол описує лише мову, а не спосіб доставки даних та вимагає наявності сервера – брокера, який об'єднує під'єднаних пристроїв у мережу. Самі ж пристрої при підключенні підписуються на повідомлення, в яких надсилаються дані і брокер відсилає тільки ті повідомлення, які потрібні конкретному пристрою (рис. 3.3).

Підключитися до брокер сервера можна двома способами: скористатися безкоштовними MQTT брокерами або налаштувати свій власний сервер. Перший варіант більш простий у реалізації, оскільки комунікація між підключеними вузлами mesh-мережі у них реалізовується на основі готових сервісів, а для налаштування мережі необхідно лише правильно підключити пристрої до брокера і налаштувати інформаційні залежності між ними. Популярним безкоштовним MQTT брокером є сервіс cloudmqtt.com, хоча він має обмеження

по кількості пристроїв і запитів, але для демонстрації комунікаційних можливостей цього достатньо. При реєстрації у сервісі, користувачу видається логін, пароль, сервер до якого потрібно робити підключення ваших елементів mesh-мережі.

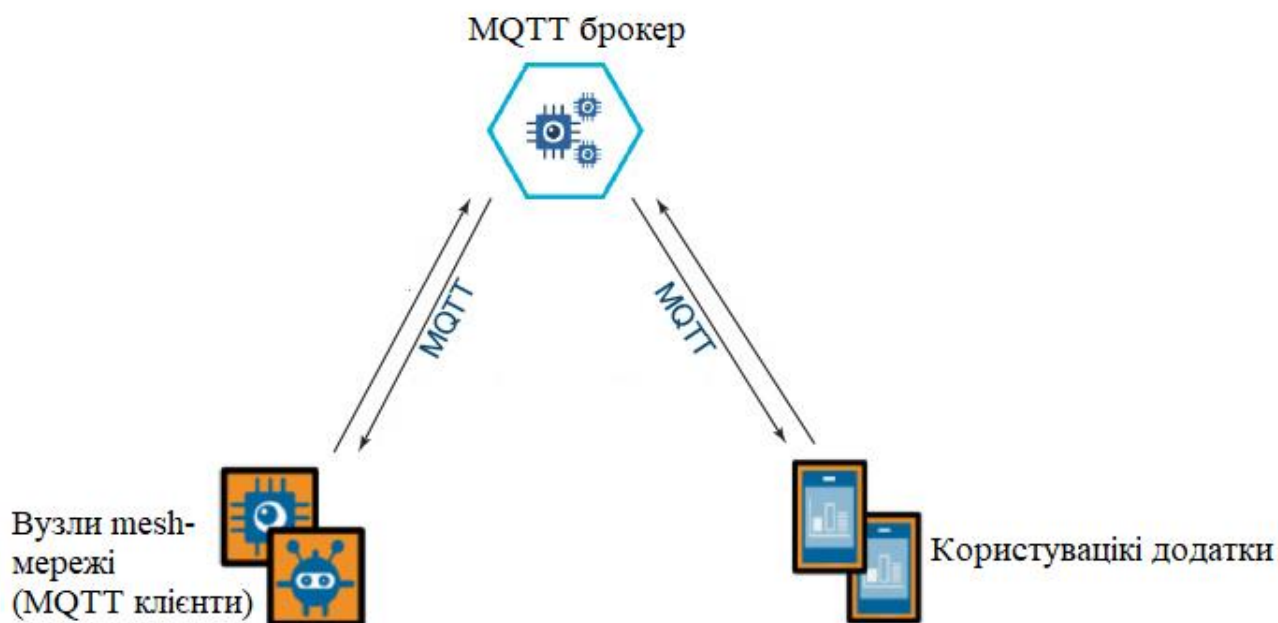


Рис. 3.3. Схема mesh-мережі з MQTT брокером/ Адаптовано із роботи [6]

Для реалізації власного елемента mesh-мережі можна використати будь який програмований мікроконтролерний модуль із підтримкою передачі даних по протоколу Wi-Fi. Для реалізації пристроїв зручно використовувати модуль ESP8266, оскільки він має вбудований стабілізатор на 3.2 вольтів і велику кількість портів для підключення датчиків і контролерів, та, що найголовніше, його можна програмувати мовою C++ із використанням зручного середовища Arduino IDE.

У рамках кваліфікаційної роботи магістра ми не маємо наміру створити закінчений пристрій, а лише реалізувати зв'язок між окремими елементами у mesh-мережі. Тому код написаної нами програми буде реалізовувати саме комунікаційні функції по відправці та отриманні повідомлень.

На першому етапі написання програмного забезпечення необхідно підключити зовнішні бібліотеки для роботи з модулем ESP-8266 та MQTT брокером:

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
```

Далі нами були описані константи та змінні, які будуть необхідні у процесі роботи програми на мікроконтролері, призначення кожного елемента опишемо у коментарях для коду:

```
const char *ssid = "xxxxxx"; // Ім'я мережі (роутера)
const char *pass = "xxxxxx"; // Пароль до мережі
(роутера)

const char *mqtt_server = "m13.cloudmqtt.com"; // Ім'я
сервера MQTT

const int mqtt_port = 14483; // Порт для підключення
до сервера MQTT

const char *mqtt_user = "xxxxxx"; // ідентифікаційні
дані (логін) для підключення до сервера MQTT

const char *mqtt_pass = "xxxxxx"; // Пароль для
підключення до сервера MQTT

const int led = 5; // діод на платі для візуальної
сигналізації

//Службова інформація для зв'язку з MQTT брокером
#define BUFFER_SIZE 100
int tm = 300;
float temp = 0;
WiFiClient wclient;
PubSubClient client(wclient, mqtt_server, mqtt_port);
```

Виконавши ініціалізацію всіх необхідних констант та змінних мікроконтролер перейде до виконання операцій ініціалізації апаратних

можливостей, котрі описані у блоці коду, що виконується один раз при запуску контролера:

```
void setup() {
    Serial.begin(115200); //налаштування передачі даних
по протоколу Serial на швидкості 115200 бод
    delay(10); // затримка виконання програми на 10
мілісекунд
    pinMode(led, OUTPUT); //настройка порту з
світлодіодом як виходу
}
```

Для реалізації задуманого функціоналу пристрою реалізуємо код, який буде здійснювати відправку повідомлень MQTT брокеру, тобто на сервер, котрий здійснює маршрутизацію потоків даних у mesh-мережі:

```
void refreshData() {
    if (tm == 0) {
        time = millis(); //запис поточного часу у тимчасову
змінну
        client.publish("test/1", time);
        tm = 3000; // пауза між відправками 3 секунди
    }
    tm--;
}
```

Кожен вузол мережі може не лише відправляти дані брокеру, а і отримувати їх, тому реалізуємо код функції для виконання цієї операції:

```
void callback(const MQTT::Publish& pub)
{
    String payload = pub.payload_string();
    String topic = pub.topic();
```

```

    Serial.print(pub.topic()); // виводимо у послідовний
порт назву повідомлення
    Serial.print(" => ");
    Serial.println(payload); // виводимо у послідовний порт
значення отриманих даних
    // перевіряємо, чи з правильного повідомлення були
отримані дані
    if(topic == "test/2")
    {
        Serial.println("test/2 ОК"); // виводимо
підтвердження, що ми отримали правильне повідомлення
    } }

```

Опишемо код головної програми, який виконується циклічно у процесі роботи контролера:

```

void loop() {
    // підключаємося до мережі wi-fi (якщо не підключені)
використовуючі дані, описані в константах на початку
програми
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        Serial.print("Connecting to ");
        Serial.print(ssid);
        Serial.println("...");
        WiFi.begin(ssid, pass);

        if (WiFi.waitForConnectResult() != WL_CONNECTED)
return;
        Serial.println("WiFi connected");
    }
    // підключаємося до MQTT сервера
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {

```

```

if (!client.connected()) {
  Serial.print("Connecting to MQTT server ");
  Serial.print(mqtt_server);
  Serial.println("...");
  if
(client.connect(MQTT::Connect("arduinoClient2").set_auth(
mqtt_user, mqtt_pass))) {
  Serial.println("Connected to MQTT server ");
  client.set_callback(callback);
  // Підписуємось на отримання повідомлень від
необхідних нам вузлів mesh-мережі
  client.subscribe("test/1");
  client.subscribe("test/2");
} else {
  Serial.println("Could not connect to MQTT
server");      }    }
if (client.connected()){
  client.loop();
  refreshData();      }    }    }

```

Написаний код для мікроконтролера забезпечує базовий функціонал mesh-мережі, а саме відправку та отримання повідомлень між декількома окремими пристроями із використанням віддаленого посередника – MQTT брокера. За необхідності розгортання мережі з реальними датчиками, останні можуть з легкістю бути підключені до мікроконтролерних модулів ESP-8266, а в коді програми здійснюватись відправка реальних даних замість тестових повідомлень. Функція отримання повідомлень може приймати від MQTT брокера надіслані дані взагалі без доопрацювання коду програми, оскільки формування пакету даних здійснюється на стороні віддаленого сервера а вузли mesh-мережі забезпечують лише їх розшифрування.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуті принципи роботи, конструктивно-технологічні особливості та програмне забезпечення Mesh-мереж як сучасних електронних систем.
2. Показано, що Mesh-мережа - це домашня Wi-Fi система, створена для усунення зон зі слабким сигналом і забезпечення безперервного покриття Wi-Fi в усьому будинку. Mesh-системи забезпечують більш високу швидкість, широке покриття і надійне з'єднання для пристроїв, підключених до мережі. У той час як звичайні роутери роздають Wi-Fi з однієї точки, у систем Mesh Wi-Fi їх декілька.
3. Для створення Mesh Wi-Fi мережі використовується два або більше модулів Mesh Wi-Fi. Один модуль підключається до інтернету, а інші розміщуються по всьому будинку для створення потужної Wi-Fi мережі. На відміну від стандартних роутерів, ці модулі є частиною єдиної мережі з одним SSID і паролем. Тому для налаштування і розширення Mesh-мережі досить просто додавати нові модулі.
4. Модулі Mesh необхідні для ефективної роботи Wi-Fi, оскільки вони утворюють послідовний ланцюжок з іншими модулями в мережі. Сигнал буде хорошим навіть у найвіддаленіших від роутера модулів. Модулі взаємодіють один з одним для визначення кращого діапазону для ваших пристроїв, а також для перенаправлення трафіку в разі збою одного з модулів.
5. Розроблено код програми для вузла mesh-мережі із комунікацією посередництвом віддаленого сервера MQTT брокера на базі контролера ESP-8266 підключеного до мережі Wi-Fi. Показано, що такий пристрій може з легкістю отримувати і передавати дані у розподілених комірчастих мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кулаков Ю.А., Луцький Г.М. Локальні мережі. – Київ: Юніор, 1998. – 45 с.
2. Гамаюн І. П., Безменова О.П. Оцінювання міри схожості між об'єктам, що характеризуються кількісними і номінальними ознаками. – Харків : НТУ «ХП», 2013. – 19 с.
3. Тарнавський Ю.А., Кузьменко І.М. Організація комп'ютерних мереж: підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 259 с.
4. Городецька О.С., Гикавий В.А., Онищук О.В. Комп'ютерні мережі: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 129 с.
5. Буров Є. В. Комп'ютерні мережі. – Львів: Бак, 2003. – 468 с.
6. Бірюков М.Л., Стеклов В.К., Костік Б.Я. Транспортні мережі телекомунікацій: системи мультиплексування. – Київ: Техніка, 2005. – 312 с.
7. Dong M., Ota K., Liu A., Guo M. Joint optimization of lifetime and transport delay under reliability constraint wireless sensor network. *IEEE Trans Wirel Commun.* – 2016. – V.27(1). – P.225–236.
8. Ren J., Zhang Y., Liu A., Zhang N. (2016) Dynamic channel access to improve energy efficiency in cognitive radio sensor networks. *IEEE Trans Wirel Commun.* – 2016. – V.15(5). – P.3143–3156.
9. Alicherry M., Bhatia R., Li L.E. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. In: *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking.* – 2005. – P.58–72.
10. Si W., Selvakennedy S., Zomaya A.Y. (2010) An overview of channel assignment methods for multi-radio multi-channel wireless mesh networks. *J. Parallel. Distrib. Comput.* – 2010. – V.70(5). – P. 505–524.
11. Pirzada A.A., Portmann M., Indulska J. Performance analysis of multi-radio aodv in hybrid wireless mesh networks. *Comput. Commun.*–2008. – V.31(5). – P. 885–895.
12. Mogaibel H.A., Othman M., Subramaniam S., Asilah Wati Abdul Hamid N. On-demand channel reservation scheme for common traffic in wireless mesh networks. *J. Net. Comput Appl.* – 2012. – V.35(4). – P. 1329–1351.

13. Draves R., Padhye J., Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM. – 2004. – P.114–128.
14. Chandra R., Bahl P. Multinet: Connecting to multiple iee 802.11 networks using a single wireless card. In: INFO-COM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies . – 2004. – V.2. – P. 882–893.
15. Xie K., Wang X., Liu X. (2016) Cooperative routing with relay assignment in multi-radio multi-hop wireless networks. IEEE Trans. Comput. – 2016. – V.24(2). –P.859–872.
16. Xie K., Wang X., Liu X. Interference-aware cooperative communication in multi-radio multi-channel wireless networks. IEEE Trans. Comput.– 2016. – V.65(5). – P. 1528–1542.
17. Gui J, Zhou K, Xiong N (2016) A cluster-based dual-adaptive topology control approach in wireless sensor networks. Sensors. – 2016. – V.16(10). – P. 1576.
18. Wang K., Yang K., Chen H. Computation diversity in emerging networking paradigms. IEEE Wirel Commun. – 2017. – V.24(1) . – P.88–94.
19. Zhang D., Chen Z., Awad M.K., Zhou H., Zhang N., Shen X. Utility-optimal resource management and allocation algorithm for energy harvesting cognitive radio sensor networks. In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2017. – V.34. – P.3552–3565.
20. Zhang D., Chen Z., Ren J., Zhang N., Awad M.K., Zhou H., Shen X. Energy-harvesting-aided spectrum sensing and data transmission in heterogeneous cognitive radio sensor network. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology. IEEE. – 2017. – P. 831–843.