

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-23>

УДК 621

МІХНЕНКО Ярослав

Національний технічний університет України «Інститут Імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-8440-2514>

yaroslavmikhnenko@gmail.com

КОНОНОВА Ірина

Національний технічний університет України «Інститут Імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-6945-0323>

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖАХ З КІЛЬКОМА СТРИБКАМИ

Стаття присвячена аналізу якості обслуговування безпроводових мереж, оскільки дане питання в сучасному світі стає все більш важливим аспектом для користувачів та у світі сучасних технологій. Забезпечення якості обслуговування (QoS – Quality of Service) у безпроводових мережах має особливо велике значення, оскільки вони використовуються для передачі даних і забезпечення комунікації між різними пристроями та користувачами, забезпечуючи стабільність підключення, швидкість передачі пакетів інформації, безпеку передачі, конфіденційність та пріорітезацію трафіку, що відправляється.

Серед безпроводових мереж нового покоління останніми роками особлива увага приділяється безпроводовим мережам з кількома стрибками. Оскільки безпроводові мережі з кількома стрибками значно відрізняються від безпроводових локальних мереж, дослідження проведено в даній статті було зосереджено на пошуку рішень, спрямованих на безпроводові мережі з кількома стрибками, оскільки забезпечення якості обслуговування в даних мережах не в повній мірі досліджено з погляду виникаючих проблем прихованих/відкритих станцій, непередбачуваності безпроводового середовища, мобільності вузлів та обмеження енергії.

В роботі описано складність забезпечення QoS у безпроводових мережах з кількома стрибками та запропоновано варіант забезпечення QoS у безпроводових мережах з кількома стрибками з багаторівневої точки зору. Крім того, представлено рішення QoS, специфічні для безпроводових мереж. А саме – рішення QoS для рівня управління доступом до посередників (MAC – Media Access Control), рішення на основі резервування ресурсів на мережевому рівні, рішення QoS без збереження стану на мережевому рівні, багатоканальна маршрутизація QoS, QoS фреймворки, рішення QoS для безпроводових сітчастих мереж.

Ключові слова: безвідмовність системи, безпроводові мережі, збої, моделі надійності, протоколи маршрутизації, стійкі відмови, структурне резервування, якість обслуговування.

MIKHENKO Yaroslav, KONONOVA Iryna

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ANALYSIS OF QUALITY OF SERVICE IN MULTI-HOP WIRELESS NETWORKS

The article is devoted to the analysis of the quality of service of wireless networks, since this issue in the modern world is becoming an increasingly important aspect for users and in the world of modern technologies. Ensuring the quality of service (QoS – Quality of Service) in wireless networks is of particular importance, as they are used to transmit data and ensure communication between different devices and users, ensuring connection stability, speed of information packet transmission, transmission security, confidentiality and traffic prioritization, that is sent.

Among the new generation wireless networks, multi-hop wireless networks have received special attention in recent years. Since multi-hop wireless networks are significantly different from wireless local area networks, the research carried out in this article was focused on finding solutions aimed at multi-hop wireless networks, since quality of service assurance in these networks has not been fully investigated from the point of view of emerging problems of hidden/ open stations, unpredictability of the wireless environment, node mobility and energy limitations.

The paper describes the complexity of providing QoS in multi-hop wireless networks and proposes an option to provide QoS in multi-hop wireless networks from a multi-level point of view. In addition, QoS solutions specific to wireless networks are presented. Namely, QoS solutions for the Media Access Control layer (MAC), solutions based on resource reservation at the network level, stateless QoS solutions at the network level, multi-channel QoS routing, QoS frameworks, QoS solutions for wireless mesh networks.

Key words: system failover, wireless networks, failures, reliability models, routing protocols, resilient failures, structural redundancy, quality of service.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Безпроводові мережі з декількома стрибками мають характеристики, які повністю відрізняються від звичайних проводових мереж. Забезпечення QoS може стати складним завданням для безпроводових мереж. Незважаючи на те, що існує ряд рішень QoS для WLAN, безпроводові мережі з кількома стрибками представляють нову парадигму, оскільки вони мають унікальні обмеження та вимоги. Оскільки основна увага цієї статті зосереджена на безпроводових мережах на базі множинного доступу з визначенням несучої

(CSMA – Carrier Sense Multiple Access) [9], далі буде наведено деякі з ключових причин, чому забезпечення QoS є доволі складним завданням у безпроводових мережах з кількома стрибками CSMA:

1). Спільне середовище. IEEE 802.11 працює за принципом множинного доступу з визначенням несучої, за допомогою якого вузли змагаються за першочерговий доступ до каналу. Протокол MAC на основі CSMA страждає від класичних проблем прихованої та відкритої станцій. Ці проблеми особливо ускладнюються безпроводовими мережами з кількома стрибками, в яких велика кількість вузлів може бути розподілена в регіоні. Через проблеми із прихованою/відкритою станцією можливі непередбачувані затримки. Крім того, точна оцінка метрик QoS для безпроводових з'єднань може бути доволі складною в умовах даних проблем.

2). Непередбачуване безпроводове середовище. Безпроводове середовище є непередбачуваним, і якість зв'язку змінюється з часом роботи. Існують фактори, які впливають на якість зв'язку, включаючи багатошляхове поширення, завмирання сигналу, шум та перешкоди. Ці фактори викликають випадкові коливання якості з'єднання, що спричиняє втрату та пошкодження пакетів і може ускладнити точне прогнозування пропускної здатності з'єднання та затримки.

3). Обмеження ємності. Пропускна здатність безпроводового зв'язку невелика та обмежена. Крім того, в даний час більшість безпроводових мереж з кількома стрибками використовують один радіо на вузол, що значно обмежує доступну пропускну здатність. Це ускладнює забезпечення QoS, оскільки більшість рішень QoS потребують механізмів, таких як пакети сигналізації та керування, щоб функціонувати, але через обмеження ємності іноді може бути важко задовольнити ці вимоги.

4). Мобільність вузла. У багатоузловій безпроводовій мережі вузли можуть бути мобільними (наприклад, MANET – Mobile Ad hoc Network)[6], і через мобільність існуюча топологія змінюється з часом, маршрути розриваються та повинні бути встановлені заново. Якщо маршрут порушується, зарезервована гарантія QoS порушується [4]. Крім того, фізичні характеристики зв'язку між вузлами змінюються, коли змінюється відстань до вузла. Змінна топологія мережі та різні характеристики каналу можуть ускладнити забезпечення QoS.

5). Енергетичні обмеження. У мобільних спеціальних мережах і особливо безпроводових сенсорних мережах енергоефективність є головним питанням маршрутизації[2]. Вузли мають обмежену енергію, і забезпечення QoS має враховувати залишковий заряд батареї, а також рівень енергоспоживання. Рішення QoS має відповідати використанню ресурсів. Таким чином, рішення QoS повинні бути енергоефективними.

6). Неточна оцінка пропускної здатності. Переважна більшість рішень QoS для безпроводових мереж з кількома стрибками вимагають оцінки пропускної здатності наскрізного шляху. Фундаментальна проблема безпроводових мереж з кількома стрибками полягає в тому, що дуже важко точно оцінити пропускну здатність безпроводового каналу. Це може бути викликано низкою причин, включаючи різні умови завантаження, проблеми прихованої/відкритої станції, непередбачувані колізії та пошкодження пакетів.

7). Обслуговування маршруту. Підтримка маршруту є відносно тривіальним завданням у проводовій мережі, оскільки топологія залишається статичною. Однак у безпроводових мережах з кількома стрибками маршрути можуть перериватися через низку причин, включаючи рухливість вузла, відключення електроенергії на деяких вузлах і умови каналу. Підтримка маршруту з точки зору забезпечення того, що маршрут, який використовується, підтримує необхідний QoS, є нетривіальним завданням для безпроводових мереж з кількома стрибками. Рішення QoS повинні мати ефективні механізми підтримки маршрутів.

8). Відсутність централізованого контролю. Безпроводові мережі з кількома стрибками вимагають повністю розподілених рішень QoS, оскільки централізованого механізму керування QoS немає, а рішення QoS мають бути розподіленими. Це виявляється складним, оскільки координація QoS між кількома розподіленими вузлами може бути складним завданням, особливо якщо розмір мережі великий.

Таким чином, було виділено та структуровано вісім ключових причин чому забезпечення QoS є доволі складним завданням у безпроводових мережах з кількома стрибками CSMA. Надалі будуть розглянуті варіанти для вирішення цих проблем для забезпечення стабільності підключення, швидкості передачі пакетів інформації, безпеки передачі, конфіденційності та пріоритетзації трафіку, що відправляється.

Аналіз досліджень та публікацій

Рішення [3] є доволі подібними до рішення, що використовується в роботі рішення протоколу контролю допуску з урахуванням суперечок (CACSP – Contention-aware Admission Control Protocol) [1], а саме, що доступна смуга пропускання на вузлі розраховується як мінімальна смуга пропускання в околиці вузла з двома переходами. Процес виявлення маршруту знову поєднується з контролем допуску.

Для рішення QoS без збереження стану на мережевому рівні було використано розподілену спеціальну маршрутизацію із вилученням ядра (CEDAR – Core-Extraction Distributed Ad Hoc Routing)[5]. CEDAR головним чином зосереджується на управлінні основною центральною мережею та рішення диференціації послуг у бездротових мережах Ad Hoc (SWAN – Service Differentiation in Stateless Wireless Ad

Hoc Networks), що використовує контроль доступу для трафіку в реальному часі та регулює швидкість передачі TCP для трафіку на основі зворотного зв'язку від рівня MAC, щоб підтримувати межі затримки та пропускну здатності для трафіку в реальному часі.

Для вирішення питання з багатоканальною маршрутизацією QoS, використовувалось рішення багатошляхового динамічного протоколу маршрутизації джерела для бездротових мереж Ad-hoc (MP-DSR – Multipath Dynamic Source Routing Protocol for Wireless Ad-hoc Networks) [7] – це багатошляхове розширення QoS для DSR. MP-DSR намагається забезпечити наскрізну надійність (розраховану на основі доступності каналу на шляху) як показник QoS.

Для забезпечення QoS у безпроводових мережах з декількома проміжками було запропоновано низку структур QoS, а саме – *INSIGNIA* та інтегрована платформа Mobile Ad-hoc QoS (iMAQ) [8].

Формулювання цілей статті

Мета статті - розглянути варіанти для вирішення викладених проблем для забезпечення стабільності підключення, швидкості передачі пакетів інформації, безпеки передачі, конфіденційності та пріоритетизації трафіку, що відправляється.

Виклад основного матеріалу

Рішення QoS рівня MAC досліджені у сучасній технічній літературі для WLAN, однак безпроводові мережі з кількома стрибками значно відрізняються від WLAN і створюють нові проблеми [3]. Двома основними типами MAC для безпроводових мереж є множинний доступ із визначенням несучої (CSMA) і множинний доступ з розділенням часу (TDMA – Time division multiple access) [10]. Протоколи MAC на основі TDMA можуть забезпечити гарантії QoS у реальному часі, оскільки слоти можуть бути зарезервовані детерміновано. Однак рішення на основі TDMA більше підходять для WLAN з одним стрибком, і забезпечення синхронізації між розподіленими вузлами в мережі з кількома стрибками може бути проблематичним. Таким чином, MAC на основі CSMA широко використовується в безпроводових мережах з кількома стрибками, але через їхній ймовірний доступ до середовища вони страждають від низки проблем.

Наприклад технологія IEEE 802.11 працює за принципом CSMA. Крім проблем, властивих безпроводовому середовищу, таких як помилки каналу, завмирання сигналу та перешкоди, також виникають нові проблеми, такі як зіткнення та проблеми прихованих/відкритих станцій, завдяки механізму CSMA. Стандарт IEEE 802.11, хоча і широко використовується, не має механізмів для забезпечення QoS для потоків. У деяких рішеннях запропоновано налаштування різних параметрів IEEE 802.11 MAC для забезпечення QoS. Для прикладу, одне з рішень пропонує диференційовану розподілену координаційну функцію (DDCF - Differentiated Distributed Coordination Function)[11] для реалізації диференціації вузлів. Вузлам призначаються різні пріоритети відповідно до їх позиції у віртуальному кластері в мережі. Механізм кластеризації обробляється у верхніх шарах. У схемі Black Burst (BB), період класифікації пріоритету використовується для відділення станцій з вищим пріоритетом від станцій з нижчим пріоритетом. Стандарт 802.11e був запроваджений для усунення недоліків 802.11 для забезпечення якості обслуговування. IEEE 802.11e представляє 4 категорії доступу (AC), які підтримують 8 пріоритетів користувача (UP), також відомих як категорії трафіку (TC) на рівні MAC, щоб надати різні пріоритети потокам. Хоча 802.11e широко використовувався для диференціації послуг у мережах WLAN, їхня працездатність і придатність для забезпечення QoS у безпроводових мережах з кількома стрибками є сумнівною, оскільки мережа повністю розподілена та існують приховані проблеми станцій.

Відносно небагато рішень QoS було запропоновано спеціально для забезпечення QoS MAC рівня у безпроводових мережах з кількома стрибками. В одному рішенні автори пропонують алгоритм контролю доступу для WLAN з кількома стрибками на основі графіків конкуренції та аналізу пропускну здатності насичення для оцінки пропускну здатності кожної максимальної клітки. Інші рішення пропонують алгоритми контролю доступу для сітчастих мереж на основі 802.11e та забезпечують QoS для трафіку як з постійною швидкістю передачі даних (CBR), так і зі змінною швидкістю передачі даних (VBR). Уникнення зіткнень доступу з кількома переходами з резервуванням Piggyback (MACA/PR) представлено на рис. 1.

Забезпечення QoS на мережевому рівні. Маршрутизація є невід'ємною та значною частиною дослідження безпроводових мереж з кількома переходами. Більшість рішень QoS для безпроводових мереж з кількома стрибками працюють на мережевому рівні, а іноді й на крос-рівні з нижчими рівнями. Рішення на основі резервування, такі як Інтегровані послуги (IntServ - Integrated Services) для проводових мереж, мають фазу сигналізації (RSVP) для резервування ресурсів. Через накладні витрати на фазу сигналізації, яка необхідна для кожного потоку, підходи на основі резервування спочатку вважалися незастосовними до безпроводових мереж з кількома стрибками.

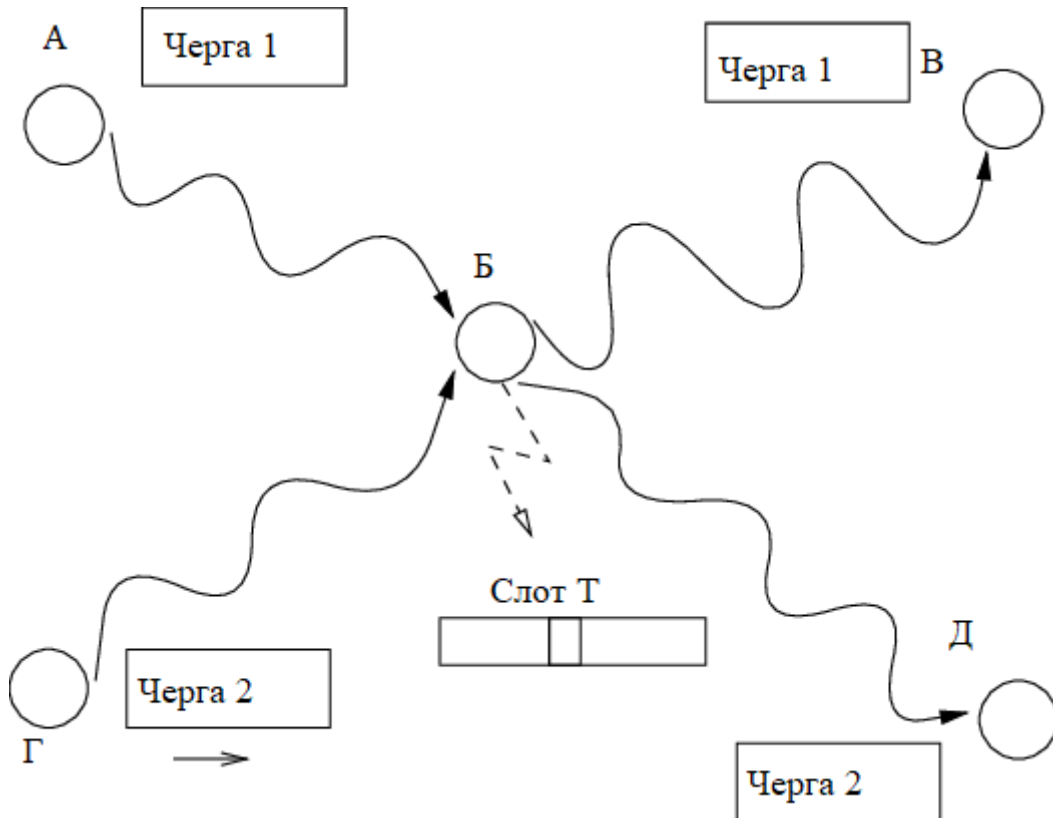


Рис. 1. Уникнення зіткнень доступу з кількома переходами з резервуванням

Це є протокол MAC-рівня, який використовує механізм на основі резервування для встановлення з'єднання на основі QoS через одне посилання. Він має як компонент сигналізації, так і алгоритм маршрутизації QoS для забезпечення наскрізних гарантій якості обслуговування.

На рис. 2 показана широка класифікація протоколів маршрутизації для безпроводових мереж з кількома стрибками.

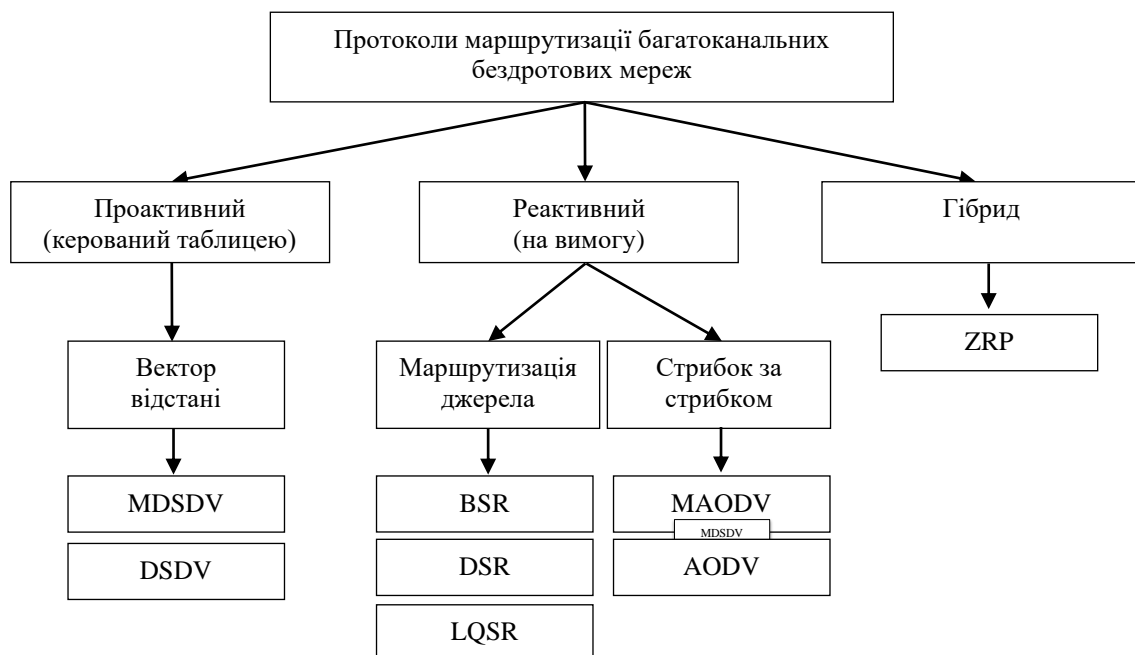


Рис. 2. Таксономія сімейств маршрутизації для безпроводових мереж з кількома переходами

Протоколи маршрутизації на вимогу (проактивні), такі як AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector – спеціальний вектор відстані на вимогу) [12],[14], MAODV(multicast operation of the Ad hoc On-Demand Distance Vector – багатонадресна операція спеціального вектора відстані на вимогу) [13] та DSR(Dynamic Source Routing – динамічна маршрутизація джерела) [14], BSR (Buffer Status Report – звіт стану буфера) і LQSR(link quality source routing – маршрутизація джерела якості зв'язку), були розроблені для безпроводових мереж з кількома стрибками. На етапі виявлення маршруту ці протоколи транслюють пакет запиту маршруту, який потім повторно транслюється проміжними вузлами, доки він не досягне пункту призначення, який потім надсилає відповідь маршруту. Нещодавно шляхом поєднання фази сигналізації з виявленням маршруту в протоколах маршрутизації на вимогу, таких як AODV, була вирішена проблема фази сигналізації. З іншого боку, деякі рішення QoS виконують контроль доступу без збереження стану, тобто ресурси не резервуються на проміжних вузлах, протокол просто перевіряє під час прийому потоку, чи існує будь-який шлях від джерела до пункту призначення, який відповідає вимогам QoS вхідного потоку. Далі наведено деякі широкі класи/області для забезпечення QoS у безпроводових мережах з кількома стрибками на мережевому рівні.

Протокол зонної маршрутизації(ZRP)[14] – це комбінація двох типів методів реактивної та проактивної маршрутизації в один метод маршрутизації, відомий як протокол гібридної маршрутизації. ZRP мінімізує накладні витрати на контроль проактивної маршрутизації та зменшує затримку через пошук маршрутизації в реактивних протоколах маршрутизації. Протокол ZRP створює зону, яка оточує кожен вузол, що складається з його сусіднього вузла. ZRP реформовано за допомогою двох допоміжних протоколів, першого проактивної маршрутизації і другого протоколу реактивної маршрутизації.

Рішення на основі резервування ресурсів на мережевому рівні. Значна кількість рішень QoS для безпроводових мереж з кількома стрибками забезпечують гарантії QoS шляхом інтеграції маршрутизації з резервуванням ресурсів. У Contention-aware Admission Control Protocol (CACP) автори пропонують алгоритм контролю доступу для одноканальних мереж з кількома стрибками [1], заснований на знанні локальних ресурсів, доступних у вузлі, і ефекту допуску нового потоку на сусідні вузли. Вони використовують механізм визначення несучої на рівні MAC для оцінки локально доступної смуги пропускання на вузлі. CACP працює з протоколом маршрутизації на вимогу, таким як DSR, але є достатньо загальним, щоб працювати майже з будь-яким існуючим протоколом маршрутизації на вимогу для ad-hoc мереж. Подібні рішення були запропоновані, у яких доступна смуга пропускання на вузлі розраховується як мінімальна смуга пропускання в околиці вузла з двома переходами. Процес виявлення маршруту знову поєднується з контролем допуску.

Destination Sequenced Distance Vector(DSDV) [15] – це векторний протокол маршрутизації з поетапним переходом, який вимагає від кожного вузла періодичної трансляції оновлень маршрутизації. Це керований таблицею алгоритм, заснований на модифікаціях механізму маршрутизації Беллмана-Форда. Кожен вузол у мережі підтримує таблицю маршрутизації, яка містить записи для кожного з пунктів призначення в мережі та кількість переходів, необхідних для досягнення кожного з них. З кожним записом пов'язаний порядковий номер, який допомагає ідентифікувати застарілі записи. Цей механізм дозволяє протоколу уникнути утворення циклів маршрутизації. Кожен вузол періодично надсилає оновлення, позначені по всій мережі монотонно зростаючим парним порядковим номером для оголошення свого місцезнаходження. Пізніше було запропоновано модифікований до протоколу DSDV - MDSDV(modified destination-sequenced distance-vector routing mechanism) протокол. На відміну від DSDV, запропонований MDSDV використовує інтегровані ефекти пропускну здатності та кількості переходів як метрики маршрутизації для вибору відповідних маршрутів.

Рішення QoS без збереження стану на мережевому рівні. Інший клас рішень QoS забезпечує контроль доступу без резервування ресурсів. Популярним рішенням QoS у цій категорії є Core-Extraction Distributed Ad Hoc Routing – CEDAR. CEDAR головним чином зосереджується на управлінні основною центральною мережею. У цьому ядрі інформація про стан каналів з великою пропускну здатністю періодично поширюється. Кожен вузол, що належить до ядра, повинен підтримувати не тільки локальну топологію, але й розраховувати маршрути для вузлів поблизу нього. CEDAR вибирає маршрути з QoS, коли це запитується. Основний шлях спочатку створюється шляхом розповсюдження керуючого повідомлення всередині базової мережі. Згодом виконується розрахунок QoS маршруту, щоб зменшити довжину основного шляху шляхом використання інформації про часткову топологію, доступної в ядрі. Продуктивність CEDAR залежить від якості управління локальними ресурсами вузлами ядра. SWAN використовує контроль доступу для трафіку в реальному часі та регулює швидкість передачі TCP для трафіку на основі зворотного зв'язку від рівня MAC, щоб підтримувати межі затримки та пропускну здатності для трафіку в реальному часі.

Багатоканальна маршрутизація QoS. У деяких випадках один шлях між джерелом і одержувачем не може підтримувати необхідну якість обслуговування. Щоб вирішити цю проблему, деякі рішення QoS використовують багатошляховий підхід, у якому алгоритм шукає кілька шляхів для маршруту QoS, де кілька шляхів спільно розглядаються як відповідні вимогам QoS. Кілька шляхів разом задовольняють

необхідну якість обслуговування. У цьому рішенні також використовується ідея перевірки квитків, щоб обмежити витрати на контроль. MP-DSR — це багатошляхове розширення QoS для DSR. MP-DSR[17] намагається забезпечити наскрізну надійність (розраховану на основі доступності каналу на шляху) як показник QoS.

QoS Фреймворки. Структура QoS зазвичай відноситься до рішення, що містить кілька компонентів для обробки QoS і часто охоплює кілька рівнів стеку протоколів. Для забезпечення QoS у безпроводових мережах з декількома проміжками було запропоновано низку структур QoS:

INSIGNIA — це протокол QoS, запропонований для підтримки адаптивних послуг у мобільних ad-hoc мережах. INSIGNIA використовує внутрішньосмугову сигналізацію (відноситься до механізму, за допомогою якого керуюча інформація передається разом із пакетами даних), яка забезпечує відновлення та адаптацію зарезервованих ресурсів для підтримки QoS (мінімальної пропускну здатності) до умов мережі, що динамічно змінюються. Зазвичай вважається, що внутрішньосмугова сигналізація добре підходить для швидко мінливої динаміки мережі мобільного зв'язку ad-hoc. Керуючі повідомлення, які використовує INSIGNIA, передаються в пакетах IP-даних, які встановлюють м'які стани для кожного окремого потоку в маршрутизаторах, через які проходить маршрут.

iMAQ Фреймворк. Інтегрована платформа Mobile Ad-hoc QoS (iMAQ)[16] — це, по суті, фреймворк, розроблений для підтримки передачі мультимедіа через мобільні тимчасові мережі. Існує рівень маршрутизації разом із рівнем служби проміжного програмного забезпечення. iMAQ працює на різних рівнях (міжрівневих), оскільки ці два рівні співпрацюють один з одним, включаючи обмін інформацією, щоб мати можливість забезпечити гарантії якості обслуговування мультимедійного трафіку. Використовується протокол маршрутизації на основі протоколу маршрутизації QoS на основі розташування, тоді як рівень проміжного програмного забезпечення взаємодіє як з програмами, так і з мережевим протоколом для покращення якості обслуговування. Цікавою технікою, яка використовується проміжним рівнем ПЗ, є передбачення розподілу шляхом використання інформації про місцезнаходження з мережевого рівня. Щоб покращити доступність даних, рівень проміжного програмного забезпечення реплікує дані між різними мережевими групами до того, як мережа буде розділена.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У цій статті було представлено безпроводові сітчасті мережі, а також їх компоненти, класифікацію та технології. Було підкреслено відмінності між mesh-мережами та традиційними безпроводовими мережами з кількома стрибками. Також було розглянуто та деталізовано проблему, що полягає в складності забезпечення QoS та маршрутизації в безпроводових мережах з кількома стрибками загалом і в сітчастих мережах зокрема. Було надано загальний огляд забезпечення QoS і маршрутизації в безпроводових мережах з кількома стрибками в цілому.

В роботі запропоновано рішення для маршрутизації та покращення QoS, що стосуються сітчастої мережі з кількома стрибками.

References

1. Sivaram M., Yuvaraj D., Mohammed A., Manikandan V., Porkodi V., Yuvaraj N. Improved Enhanced Dbtma with Contention-Aware Admission Control to Improve the Network Performance in Manets *Computers Materials & Continua*. 2019. № 58 (2). P. 435–454. DOI:10.32604/cmc.2019.06295.
2. Gao W., Du W., Zhao Z., Min G., Singhal M. Towards Energy-Fairness in LoRa Networks: *2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Dallas, 07-10 July 2019. Dallas, 2019. P. 788–798. DOI: 10.1109/ICDCS.2019.00083.
4. Singh M., Baranwal G. Quality of Service (QoS) in Internet of Things: *2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, Bhimtal, 23-24 February 2018. 2018, Bhimtal, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/IoT-SIU.2018.8519862.
5. Tanganelli G., Vallati C., Mingozzi E. Ensuring Quality of Service in the Internet of Things. *New Adv. Internet Things. Springer Cham*. 2018. № 715, P. 139–163. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58190-3_9. (дата звернення: 15.11.2022).
6. Othman O., Khalifa A. Comprehensive Classification of MANETs Routing Protocols. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*. 2017. № 6 (3). P. 141–158, URL: <https://www.academia.edu/58530911/A>. (дата звернення: 3.10.2022).
7. P.S. Patheja, Akhilesh A. Waoo, Lokesh Malviyal Multipath Dynamic Source Routing Protocol for Ad-Hoc Network. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012. № 2 (3). P. 436–439 URL: <https://www.academia.edu/70703370/Multipath> (дата звернення: 15.11.2022).
8. Mandhare V.V., Thool R.C. Improving QoS of Mobile Ad-hoc Network Using Cache Update Scheme in Dynamic Source Routing Protocol. *Procedia Computer Science*. 2016. № 79. P. 692–699. DOI: doi.org/10.1016/j.procs.2016.03.090
9. CSMA CD (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection) URL: <https://www.linkedin.com/pulse/csma-cd-carrier-sense-multiple-access-collision-detection-ns3edu/>. (дата звернення: 15.09.2022).
10. Aroulanandam V., Latchoumi T., Balamurugan K., Yookesh T. Improving the Energy Efficiency in Mobile Ad-Hoc Network Using Learning-Based Routing. *PIA*. 2020. P. 337–343 DOI: <https://doi.org/10.18280/ria.340312>.
11. Mumtaz A., Doja M., Amjad M. An energy efficient IS-MAC based on distributed coordination function (DCF) for wireless passive sensor networks. *Journal of Information and Optimization Sciences*. 2020. № 2. P. 555–66. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02522667.2020.1733185>.

12. Taewon S., Kim T. Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs. *Applied Sciences*. 2020. № 11 (1). P. 317. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app11010317>.
13. Kinjal U., Scholer A., Rajkot R. Efficient Multicast Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol. *Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET)*. 2015. № 5 (2). P. 26-30. URL: <https://www.jncet.org/Manuscripts/Volume-5/Special%20Issue-2/Vol-5-special-issue-2-M-05.pdf>. (дата звернення: 08.09.2022).
14. Fash S., Gorbenko A. Theoretical and experimental study of performance anomaly in multi-rate IEEE802.11ac wireless networks. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2022. № 4. P. 85–97. DOI: <http://dx.doi.org/10.32620/reks.2022.4.06>.
15. Gawiya M., Al-quha A., Allathaaa A., Z. Al-Hubaishia. Performance Analysis of Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol in MANET. *International Journal of Ad Hoc, Vehicular and Sensor Networks*. 2022. P. 10–23. URL: https://www.researchgate.net/publication/360401024_Performance_Analysis_of_Destination_Sequenced_Distance_Vector_Routing_Protocol_in_MANET. (дата звернення: 04.09.2022).
16. Krishnaiah S., Subramanyam Dr. Framework on Quality of Service in Mobile Ad Hoc Networks. *International Journal of Advanced Scientific Technologies in Engineering and Management Sciences* 2017. № 3 (5). P. 12–18. URL: <https://www.ijastems.org/wp-content/uploads/2017/05/v3.i5.3.Framework-on-Quality-of-Service-in-Mobile-Ad-Hoc-Networks.pdf>. (дата звернення: 24.08.2022).
17. Liang Q, Lin T, Wu F, Zhang F, Xiong W. A dynamic source routing protocol based on path reliability and link monitoring repair. *Plos One*. 2021. № 16(5). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251548>.