

DOI 10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62

УДК 623.486

Хажанець Юрій Анатолійович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-8926-2474>

Білоус Олег Володимирович

<https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОТОКОЛІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ MESH-МЕРЕЖ

У даній роботі було проведено аналіз та класифікацію протоколів маршрутизації mesh-мереж. Mesh-мережі відіграють важливу роль в організації бездротового зв'язку, проте ефективність їх функціонування залежить від вибору оптимальних протоколів маршрутизації. У статті розглянуті різноманітні аспекти, такі як характеристики mesh-мереж, вимоги до протоколів маршрутизації та їх класифікація з урахуванням різних факторів, таких як маршрутні метрики, методи вибору шляху та реакція на зміни у мережі. Розуміння сучасних протоколів маршрутизації в mesh-мережах може служити важливим джерелом інформації для фахівців у галузі бездротових мереж та дослідників, які цікавляться цією проблематикою. Завданням дослідження було проведення аналізу та порівняння різних протоколів маршрутизації, таких як OLSR, B.A.T.M.A.N., Vabel тощо, з метою визначення їхніх переваг, недоліків та сфер застосування, а також аналіз основних проблем, таких як масштабованість, якість обслуговування (QoS), безпека тощо, з метою визначення основних викликів та можливих шляхів їх вирішення.

Ключові слова: аналіз, класифікація, маршрутизація, mesh-мережа, зв'язок, ефективність функціонування.

Вступ

У світі швидко розвиваються технології бездротових мереж, і однією з найбільш важливих та перспективних є технологія mesh-мереж.

Mesh-мережі на відміну від інших мереж вирізняються своєю динамічною топологією та здатністю до автономної роботи без необхідності наявності центральних вузлів. Завдяки своїм унікальним властивостям, mesh-мережі здобули широке визнання та використовуються в різноманітних сферах, від домашнього застосування до індустріальних розгалужених мереж. Слід зауважити, що дана технологія використовується і в Збройних Силах України.

Одним із ключових аспектів ефективності функціонування mesh-мереж є протоколи маршрутизації за якими вони працюють, адже саме вони визначають шляхи передачі даних між вузлами та абонентами. Дослідження та аналіз цих протоколів є критично важливим для розуміння їхнього впливу на ефективність функціонування mesh-мереж. У цій статті проведено огляд, аналіз та класифікацію протоколів маршрутизації у mesh-мережах з метою розкриття їхніх особливостей, переваг та недоліків.

Оскільки в більшості випадків mesh-мережі мають складну топологію, яка ще може і динамічно змінюватись, то під час їх розгортання та експлуатації часто виникають різні труднощі щодо забезпечення вимог до якості обслуговування (QoS), ефективності маршрутизації, масштабованості та ефективного використання ресурсів.

Метою статті є проведення аналізу та класифікації протоколів маршрутизації для

виявлення їх недоліків та переваг.

Матеріали та методи

У даному дослідженні застосовуються наукові методи аналізу та синтезу.

Результати

Мережі типу Mesh (або mesh-мережі) – це тип бездротових мереж, у яких кожен вузол мережі має можливість спілкуватися напряму з кожним іншим вузлом, що знаходиться в його зоні покриття. В таких мережах вузли можуть бути як стаціонарними пристроями, так і рухомими [1]. Саме тому дана технологія добре підходить для організації зв'язку в різних видах військових операцій, адже має гнучку архітектуру та продовжує працювати за динамічної зміни обстановки на полі бою.

Особливості функціонування mesh-мереж [1-16]:

Самоорганізація: mesh-мережі є самоорганізованими, що означає, що вони можуть автоматично адаптуватися до змін у топології та структурі мережі без централізованого керування.

Резервування маршрутів: в mesh-мережі кожен вузол може використовувати кілька маршрутів для комунікації з іншими вузлами, що забезпечує більшу надійність та стійкість мережі.

Масштабованість: mesh-мережі можуть легко масштабуватися, додаванням нових вузлів до мережі без значних змін в існуючій інфраструктурі.

Автономність: кожен вузол в mesh-мережі може працювати автономно, що означає, що він може продовжувати працювати навіть у випадку втрати зв'язку з іншими вузлами.

Рухомість: mesh-мережі можуть легко адаптуватися до руху вузлів, включаючи мобільні пристрої, які можуть змінювати своє

місцезнаходження в мережі.

Mesh-мережі знаходять широке застосування в сучасному світі через їхні унікальні властивості та можливість.

Переваги mesh-мереж:

Надійність: кожен вузол у mesh-мережі може взаємодіяти з кількома іншими вузлами, що робить мережу більш надійною. Якщо один вузол відмовляється, інші вузли можуть використати альтернативний маршрут для передачі даних.

Масштабованість: mesh-мережі легко масштабуються, оскільки нові вузли можуть бути додані без значних змін у існуючій інфраструктурі.

Гнучкість і адаптивність: mesh-мережі можуть адаптуватися до змін у топології та структурі без необхідності централізованого керування.

Самоорганізація: mesh-мережі мають здатність до самоорганізації, що означає, що вони можуть автоматично адаптуватися до змін у мережевому середовищі без втручання з боку користувача.

Зменшення залежності від централізованого керування: відсутність централізованого керування у mesh-мережах дозволяє уникнути однієї точкової відмови та забезпечує більшу стійкість мережі в цілому.

Проте у mesh-мереж є і низка недоліків пов'язаних з:

Складність маршрутизації: у mesh-мережах виникають складнощі з маршрутизацією через динамічну топологію та велику кількість вузлів, що може призвести до збільшення затримок та втрат пакетів.

Потребою у більшій пропускній здатності: оскільки кожен вузол у mesh-мережі може спілкуватися з кількома іншими вузлами, це може призвести до збільшення обсягу передачі даних і, відповідно, до потреби у більшій пропускній здатності.

Вартість розгортання та управління: розгортання та управління mesh-мережею може бути дорожчим та складнішим, особливо в великих масштабах, порівняно з іншими типами мереж.

Безпекою: забезпечення безпеки в mesh-мережах може бути складнішим завданням через бездротовий характер зв'язку та можливість перехоплення даних.

Впливу на продуктивність: збільшення кількості вузлів та обсягу даних у mesh-мережі може негативно вплинути на її продуктивність та ефективність.

Хоча mesh-мережі мають значні переваги в порівнянні з іншими мережами, вони також мають свої недоліки, які потрібно враховувати при їх розгортанні та експлуатації. Більшість з цих недоліків можливо вирішити за допомогою раціонального вибору протоколів маршрутизації в залежності від завдань, які будуть покладені на мережу. В складних багаторівневих mesh-мережах інколи виникає необхідність використовувати різні типи маршрутизації на різних рівнях. Важливість маршрутизації в mesh-мережах важко переоцінити, оскільки вона визначає ефективність, надійність та

продуктивність мережі в цілому. Ось деякі ключові аспекти, які пояснюють важливість маршрутизації в мережах Mesh:

Динамічна топологія: mesh-мережі характеризуються динамічною топологією, оскільки вузли можуть з'єднуватися та відключатися від мережі в будь-який момент часу. Маршрутизація в таких умовах стає складним завданням, оскільки потрібно постійно адаптуватися до змін у мережевому середовищі.

Багатократні маршрути: у mesh-мережі кожен вузол може мати кілька маршрутів до кожного іншого вузла. Ефективний вибір маршрутів та управління ними дозволяє забезпечити оптимальне використання ресурсів та мінімізувати затримки у передачі даних.

Стійкість до відмов: маршрутизація в mesh-мережі дозволяє забезпечити стійкість до відмов шляхом автоматичного переходу на альтернативні маршрути в разі виявлення неполадок або відмов вузлів.

Масштабованість: вірно обраний протокол маршрутизації дозволяє mesh-мережі легко масштабуватися, додаванням нових вузлів без значних змін у структурі мережі.

Вплив на продуктивність та пропускну здатність: невірно обраний протокол маршрутизації може призвести до збільшення затримок та зниження пропускної здатності мережі. Ефективна маршрутизація дозволяє забезпечити високу продуктивність та ефективне використання ресурсів.

Отже, маршрутизація в mesh-мережі є важливою складовою їхньої інфраструктури, оскільки вона визначає якість та продуктивність комунікації, а також стійкість мережі до непередбачених ситуацій. Вивчення та оптимізація протоколів маршрутизації є ключовим завданням для покращення функціональності та ефективності mesh-мережі. Тому варто сформулювати основні завдання та вимоги і до протоколів маршрутизації.

Основні завдання та вимоги до протоколів маршрутизації в mesh-мережах:

Автономність: протоколи маршрутизації повинні бути здатні працювати в умовах відсутності централізованого управління. Вони повинні бути самоорганізованими і здатними до адаптації до змін у топології мережі без втрати продуктивності.

Масштабованість: протоколи маршрутизації повинні бути ефективними при роботі з великою кількістю вузлів та великим обсягом трафіку. Вони повинні забезпечувати швидкий пошук та вибір оптимальних маршрутів навіть у великих мережах.

Стійкість: протоколи маршрутизації повинні бути стійкими до відмов та збоїв у мережі. Вони повинні мати механізми виявлення відмов та автоматичного виправлення маршрутів для забезпечення неперервності обслуговування.

Низька затримка та висока пропускна спроможність: протоколи маршрутизації повинні забезпечувати мінімальну затримку та максимальну пропускну здатність для ефективної передачі даних у mesh-мережі.

Енергоефективність: у випадку бездротових мереж, особливо в мережах сенсорів, протоколи маршрутизації повинні бути енергоефективними, щоб забезпечити тривалу автономну роботу вузлів мережі від автономного джерела живлення.

Безпека: протоколи маршрутизації повинні забезпечувати захист від різноманітних атак, таких як перехоплення даних, перепрограмування маршрутів та вплив на мережевий трафік.

Підтримка якості обслуговування (QoS): в деяких додатках, таких як мультимедійні додатки або VoIP, важливо мати механізми управління якістю обслуговування, щоб забезпечити мінімальні затримки та гарну якість передачі даних.

Протоколи маршрутизації в mesh-мережах вирішують ці завдання та вимоги, забезпечуючи ефективне управління маршрутами та трафіком у мережі. Вони є ключовим елементом інфраструктури мережі, який визначає її продуктивність, надійність та ефективність в цілому.

Принципи вибору маршруту та пересилання пакетів у mesh-мережах можуть варіюватися в залежності від конкретного протоколу маршрутизації та умов мережі. Однак, існують деякі загальні принципи, які часто використовуються:

Метрики маршруту: кожен протокол маршрутизації може використовувати різні метрики для вибору оптимального маршруту. Це може бути кількість переходів (хопів), час затримки, пропускна спроможність, вартість маршруту тощо. Вузол мережі вибирає маршрут з найменшою метрикою для передачі пакету.

Таблиці маршрутизації: кожен вузол у mesh-мережі може підтримувати таблицю маршрутів, де для кожного вузла зберігається інформація про найкращий відомий маршрут до цього вузла. Ці таблиці маршрутизації підтримуються та оновлюються динамічно, щоб відображати поточний стан мережі.

Пересилання пакетів: після вибору маршруту для пакету, він передається через мережу від вихідного вузла до кінцевого пункту призначення. У mesh-мережі це може відбуватися через міжвузлове спілкування, де кожен вузол передає пакет далі вздовж маршруту до кінцевого пункту.

Протоколи маршрутизації на основі векторів відстані (DV): деякі протоколи маршрутизації, такі як RIP (Routing Information Protocol), використовують алгоритми на основі векторів відстані для вибору оптимального маршруту. У цих протоколах кожен вузол обмінюється інформацією про маршрути до інших вузлів у мережі, щоб побудувати таблиці маршрутизації.

Протоколи маршрутизації на основі стану лінії (LS): протоколи маршрутизації, такі як OSPF (Open Shortest Path First), використовують алгоритми на основі стану лінії для визначення оптимальних маршрутів. У цих протоколах кожен вузол обмінюється інформацією про стан своїх з'єднань з іншими вузлами, щоб побудувати глобальну карту мережі та вибрати оптимальні маршрути.

У загальному, принципи вибору маршруту та

пересилання пакетів у mesh-мережах спрямовані на забезпечення ефективності, надійності та швидкості передачі даних в умовах динамічної топології та обмежених ресурсів.

Зважаючи на різноманітність протоколів маршрутизації для mesh-мереж, можна їх класифікувати відповідно до типів протоколів, таких як Distance Vector, Link State, On-Demand та інші.

1. Протоколи на основі векторів відстані (Distance Vector):

RIP (Routing Information Protocol);

Babel;

AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector).

2. Протоколи на основі стану лінії (Link State):

OSPF (Open Shortest Path First);

OLSR (Optimized Link State Routing);

DSR (Dynamic Source Routing).

3. Протоколи на основі попереднього запиту (On-Demand):

AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector);

DSR (Dynamic Source Routing);

DYMO (Dynamic MANET On-demand).

4. Hybrid Protocols (Гібридні протоколи):

ZRP (Zone Routing Protocol);

HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol).

5. Протоколи маршрутизації для бездротових сенсорних мереж (Wireless Sensor Networks – WSNs):

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy);

TEEN (Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol).

Кожен з цих типів протоколів має свої особливості та використовується в різних сценаріях mesh-мережі в залежності від вимог до продуктивності, надійності, енергоефективності та інших факторів. Вибір конкретного протоколу маршрутизації залежить від конкретних вимог та умов розгортання мережі.

Зважаючи на обсяг і складність кожного протоколу, навести детальний опис кожного з них у межах цього формату вкрай складно. Тому в роботі наведено лише загальний огляд кожного протоколу, що допоможе краще зрозуміти їхню функціональність та характеристики.

RIP (Routing Information Protocol): Distance Vector протокол, який використовується для маршрутизації в mesh-мережах та мережах загального користування. Використовує метрику кількості хопів та оновлює таблиці маршрутизації періодично або при зміні топології [2, 3].

OSPF (Open Shortest Path First): протокол на основі стану лінії, розроблений для використання в IP-мережах. Він використовує алгоритм Дейкстри для знаходження найкоротших маршрутів. OSPF підтримує динамічну зміну топології мережі [2, 3].

AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector): протокол маршрутизації на основі векторів відстані, який використовується в бездротових мережах із змінною топологією. Він працює на принципі вимоги, тобто шукає маршрути тільки тоді, коли це потрібно [5].

OLSR (Optimized Link State Routing): протокол

на основі стану лінії, розроблений спеціально для бездротових мереж, таких як mesh-мережі. OLSR використовує алгоритми оптимізації для зменшення навантаження на мережу та збереження енергії вузлів [2, 3].

Babel: реалізація протоколу маршрутизації на основі векторів відстані, зокрема призначена для бездротових мереж. Babel відомий своєю ефективністю та простотою в налаштуванні [6, 7].

ZRP (Zone Routing Protocol): гібридний протокол маршрутизації, який поєднує в собі як Distance Vector, так і Link State підходи. ZRP розділяє мережу на зони та використовує різні протоколи для маршрутизації всередині та поза зонами [6, 7].

DSR (Dynamic Source Routing): протокол маршрутизації, який працює на основі попереднього запиту та часто використовується у бездротових мережах, включаючи mesh-мережі [10].

DYMO (Dynamic MANET On-demand): протокол маршрутизації, призначений для мобільних ад-гок мереж (MANET). Він є відповіддю на вимоги ефективної маршрутизації в динамічних та непередбачуваних умовах, таких як бойові дії, екстрені ситуації, рятувальні операції та інші сценарії, де існує потреба у швидкій та надійній комунікації між мобільними вузлами [8].

HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol): протокол маршрутизації, розроблений для використання у бездротових mesh-мережах, особливо у стандарті IEEE 802.11s. Він поєднує в собі як принципи маршрутизації на основі векторів відстані (Distance Vector), так і на основі стану лінії (Link State), щоб оптимізувати процес маршрутизації та забезпечити високу ефективність мережі [6, 7].

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy): протокол маршрутизації, спеціально розроблений для бездротових сенсорних мереж (WSNs), де енергоефективність вузлів є критично важливою. LEACH використовує підхід з кластеризацією вузлів для зменшення витрат енергії та підвищення тривалості роботи мережі [16].

TEEN (Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol): протокол маршрутизації, спеціально розроблений для бездротових сенсорних мереж (WSNs), які вимагають енергоефективності та довговічності в роботі. TEEN забезпечує ефективне використання енергії в сенсорних вузлах шляхом встановлення порогів для активації передачі даних [16].

Ці протоколи мають різні характеристики та призначення, і вони вибираються в залежності від конкретних потреб мереж. Таким чином різні протоколи мають свої переваги та недоліки, які можуть впливати на ефективність мережі в залежності від конкретних умов експлуатації. Опіраючись на проведений аналіз можливо розподілити протоколи за завданнями, що на них покладаються:

Енергоефективність: протоколи, такі як LEACH та TEEN, спрямовані на збереження енергії в сенсорних мережах, де енергія є обмеженим ресурсом. Результати експериментів показують, що

ці протоколи можуть значно збільшити тривалість роботи мережі порівняно з класичними алгоритмами маршрутизації [16].

Пропускна спроможність: деякі протоколи, наприклад, HWMP, можуть забезпечити високу пропускну здатність шляхом використання мультиплексування маршрутів та оптимізації маршрутів. Це особливо корисно для великих мереж з високим обсягом трафіку.

Масштабованість: протоколи, такі як DSR, можуть бути ефективними у великих бездротових мережах, оскільки вони не вимагають централізованого управління та глобальних таблиць маршрутизації. Проте, у великих мережах можуть виникати проблеми з петлями маршрутизації та оптимізацією маршрутів.

Надійність: кожен протокол має свої механізми для забезпечення надійності передачі даних, проте вони можуть мати різні рівні надійності в залежності від умов мережі. Наприклад, протоколи на основі векторів відстані можуть мати проблеми зі збереженням актуальності маршрутів у складних топологіях.

Узагальнюючи, вибір протоколу маршрутизації повинен бути зроблений з урахуванням конкретних вимог до мережі, таких як енергоефективність, пропускна спроможність, масштабованість та надійність. Також важливо провести експериментальне тестування в реальних умовах для оцінки ефективності протоколу у конкретному середовищі.

Так, в різних сегментах мережі можуть використовуватися різні протоколи маршрутизації залежно від потреб і характеристик цих сегментів. Це може бути доцільним у випадках, коли різні частини мережі мають різні вимоги до продуктивності, енергоефективності або надійності. Наприклад:

Сегменти з високим навантаженням: великі сегменти мережі з великим обсягом трафіку можуть використовувати протоколи з високою пропускну здатністю, такі як HWMP, для оптимізації передачі даних і забезпечення швидкої доставки.

Сегменти з обмеженими ресурсами: в сегментах мережі, де енергія є обмеженим ресурсом, можна використовувати енергоефективні протоколи, такі як LEACH або TEEN, для збереження енергії та подовження тривалості роботи мережі.

Сегменти з високими вимогами до надійності: для сегментів мережі, де надійність передачі даних є критично важливою, можна використовувати протоколи з механізмами перевірки доставки та відновлення помилок, такі як DSR.

Сегменти з різноманітною топологією: у сегментах мережі з складною або змінною топологією можна використовувати протоколи, які можуть ефективно пристосовуватися до змін, наприклад, DYMO.

Використання різних протоколів у різних сегментах мережі дозволяє оптимізувати роботу мережі відповідно до конкретних потреб та умов експлуатації. Однак важливо забезпечити сумісність

і взаємодію між різними сегментами для забезпечення їхньої працездатності та стабільності мережі в цілому.

Аналізуючи вищезазначене можливо сформулювати тенденції у використанні та розвитку протоколів маршрутизації в

mesh-мережах. Основні тенденції у цьому напрямку включають:

Енергоефективність та довговічність: з поширенням мобільних і бездротових пристроїв зростає значення протоколів, які спрямовані на збереження енергії та подовження тривалості роботи мережі. Протоколи, які використовують порогову активацію та інші енергозберігаючі методи, стають все більш популярними [16].

Масштабованість та динамічність: з ростом кількості підключених пристроїв та збільшенням обсягів трафіку стає важливим розвиток протоколів, які забезпечують ефективну масштабованість та адаптивність до змін у топології мережі.

Безпека: з поширенням бездротових технологій та збільшенням обсягу конфіденційної інформації, що передається через мережу, зростає потреба в безпеці mesh-мережі. Розвиток протоколів забезпечення конфіденційності, цілісності та аутентифікації стає актуальним.

Широкий спектр застосувань: mesh-мережі застосовуються в різних областях, від домашнього використання до промислових та муніципальних мереж. Розвиток протоколів, що враховують конкретні потреби та вимоги різних сегментів ринку, стає дедалі більш актуальним.

Стандартизація та інтеграція: з погляду стандартизації та інтеграції протоколів, існує тенденція до розробки універсальних стандартів та інтерфейсів, що дозволяють різним пристроям та системам взаємодіяти між собою.

Розвиток нових технологій: з появою нових технологій, таких як штучний інтелект, IoT (інтернет речей), блокчейн тощо, можна очікувати розвитку протоколів, які використовують ці технології для оптимізації мережі та забезпечення нових функціональних можливостей.

Стійкість: останнім часом mesh-мережі почали використовувати у військовій сфері, що потребує проведення додаткових досліджень щодо ефективності їх застосування на полі бою, стійкості їх роботи за умови впливу засобів радіоелектронної боротьби та кібератак.

В цілому, розвиток протоколів маршрутизації в mesh-мережах спрямований на покращення продуктивності, надійності та безпеки мережі, а також на адаптацію до різних умов експлуатації та розвитку нових технологій.

Слід також особливу увагу звернути на використання mesh-мереж у військовій сфері, адже це потребує проведення цілої низки досліджень щодо ефективності її функціонування в складних радіоелектронних умовах та динамічних змін топології мережі. Такі дослідження можуть створити умови для розробки нових протоколів маршрутизації, що будуть враховувати нові

показники такі наприклад, як розвідзахищеність, імітостійкість та інші.

Обговорення

Проведене дослідження продемонструвало, що вибір протоколу маршрутизації значно впливає на ефективність функціонування mesh-мереж. Зокрема, протоколи, такі як OLSR, B.A.T.M.A.N. та Babel, мають різні сильні сторони та недоліки, що робить їх підходящими для різних умов застосування.

Класифікація протоколів, наведена у роботі, враховує різні фактори, такі як маршрутні метрики, методи вибору шляху та реакція на зміни у мережі, що дозволяє глибше зрозуміти їхні характеристики та сфери застосування.

Сильними сторонами даного дослідження є всебічний аналіз сучасних протоколів маршрутизації, їх детальна класифікація та порівняння. Розглянуто основні проблеми, такі як масштабованість, якість обслуговування (QoS) та безпека, що дозволило визначити ключові виклики та можливі шляхи їх вирішення. Однак, слабкою стороною роботи є обмежене тестування в реальних умовах. Результати базуються переважно на теоретичних аналізах та симуляціях, що може не повністю відображати реальні умови експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості оптимального вибору протоколу маршрутизації для конкретних умов використання mesh-мереж. Це важливо для інженерів і проєктувальників бездротових мереж, оскільки правильний вибір протоколу може значно покращити продуктивність та надійність мережі. Теоретичне значення нашого дослідження полягає у створенні основи для подальших досліджень та розробок у сфері протоколів маршрутизації, що може сприяти вдосконаленню існуючих та розробці нових рішень.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці протоколів маршрутизації для mesh-мереж в умовах радіоелектронного та вогневого впливу противника.

Висновки

високою масштабованістю, енергоефективністю та адаптивністю до змін у топології мережі. Не дивлячись на те, що кожен протокол має свої переваги та обмеження, загальний розвиток цієї області демонструє потенціал для подальшого зростання та вдосконалення.

Однак, незважаючи на досягнення, у цій області все ще є виклики, такі як забезпечення безпеки та стійкості мережі, оптимізація масштабованості та управління ресурсами. Також, з розвитком нових технологій, таких як IoT та штучний інтелект, виникає потреба у протоколах, які можуть ефективно взаємодіяти з цими технологіями та забезпечувати нові функціональні можливості.

Подальший розвиток протоколів маршрутизації в mesh-мережах може спонукати і застосування їх у військовій сфері де до загальноприйнятих викликів з'являються і нові, що потребують проведення додаткових досліджень.

Список використаних джерел

1. С. Стіренко, "Спосіб конструювання трафіку в бездротовій MESH мережі великої розмірності," Магістерська дисертація, Київ, 2022. Доступно: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8993716a-ace6-4893-becc-9165b3ab3304/content>
2. K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 11, pp. 325-349, 2015.
3. I.F. Akyildiz, X. Wang, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 5, pp. 102-114, 2005.
4. J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris, "Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 35, no. 4, pp. 1-12, 2005.
5. T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483-502, 2002.
6. T. Clausen, P. Jacquet, M. Laurent, and L. Viennot, "Comparative study of routing protocols for mobile ad hoc networks," in *Proceedings of the IFIP Conference on Personal Wireless Communications*, 2003, pp. 195-210.
7. R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 8, no. 1, pp. 114-128, 2004.
8. L.M. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 2001, vol. 3, pp. 1548-1557.
9. A. Jaffe, T. Zahariadis, L. Tassiulas, E. Hardouin, and C. Gomez, "Wireless mesh networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 2, no. 138, pp. 83-105, 2018.
10. D.B. Johnson, D.A. Maltz, J. Broch, and J. Jetcheva, "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)," *Internet-Draft*, 2001.
11. C.E. Perkins and E.M. Royer, "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," in *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1999, pp. 90-100.
12. A. Raniwala and T. C. Chiueh, "Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 2005, vol. 3, pp. 2223-2234.
13. T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
14. L. Wang, J. S. Lee, and M. Chiang, "Network planning for mmWave communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 6, pp. 138-145, 2013.
15. Y. Zhang, H. Luo, J. Luo, and Z. Yang, "A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks," *Computer Communications*, vol. 30, no. 14-15, pp. 2846-2861, 2007.

Yuriy Khazhanets (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-8926-2474>

Oleh Bilous

<https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

CLASSIFICATION OF ROUTING PROTOCOLS IN MESH NETWORKS

This paper presents an analysis and classification of routing protocols for mesh networks. Mesh networks play a crucial role in organizing wireless communication, yet the efficiency of their operation depends on the selection of optimal routing protocols. Various aspects are considered in the article, such as the characteristics of mesh networks, requirements for routing protocols, and their classification based on different factors like routing metrics, path selection methods, and network responsiveness to changes. Understanding contemporary routing protocols in mesh networks can serve as a valuable source of information for wireless network professionals and researchers interested in this area. The research task involved analyzing and comparing different routing protocols, such as OLSR, B.A.T.M.A.N., Babel, etc., to determine their advantages, disadvantages, application areas, and addressing major issues like scalability, quality of service (QoS), security, etc., aiming to identify key challenges and potential solutions.

Keywords: *analysis, classification, routing, mesh network, communication, operational efficiency.*

References

1. S. Stirenko Sposib konstruiuvannia trafiku v bezdrotovii MESH merezhi velikoi rozmirnosti. Magisterska dysertatsiia. K. – 2022 r. 152. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8993716a-ace6-4893-becd-9165b3ab3304/content>
2. K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 11, pp. 325-349, 2015.
3. I.F. Akyildiz, X. Wang, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 5, pp. 102-114, 2005.
4. J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris, "Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 35, no. 4, pp. 1-12, 2005.
5. T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483-502, 2002.
6. T. Clausen, P. Jacquet, M. Laurent, and L. Viennot, "Comparative study of routing protocols for mobile ad hoc networks," in *Proceedings of the IFIP Conference on Personal Wireless Communications*, 2003, pp. 195-210.
7. R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 8, no. 1, pp. 114-128, 2004.
8. L.M. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 2001, vol. 3, pp. 1548-1557.
9. A. Jaffe, T. Zahariadis, L. Tassioulas, E. Hardouin, and C. Gomez, "Wireless mesh networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 2, no. 138, pp. 83-105, 2018.
10. D.B. Johnson, D.A. Maltz, J. Broch, and J. Jetcheva, "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)," *Internet-Draft*, 2001.
11. C.E. Perkins and E.M. Royer, "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," in *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1999, pp. 90-100.
12. A. Raniwala and T. C. Chiueh, "Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 2005, vol. 3, pp. 2223-2234.
13. T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
14. L. Wang, J. S. Lee, and M. Chiang, "Network planning for mmWave communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 6, pp. 138-145, 2013.
15. Y. Zhang, H. Luo, J. Luo, and Z. Yang, "A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks," *Computer Communications*, vol. 30, no. 14-15, pp. 2846-2861, 2007.