

[DOI 10.28925/2663-4023.2025.30.914](https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.914)

УДК 004.77:004.724

Джусь Олексій Петрович

аспірант кафедри систем автоматизованого проектування

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ORCID: 0009-0004-0030-6162

oleksii.p.dzhus@lpnu.ua**Лобур Михайло Васильович**

доктор технічних наук, професор

завідувач кафедри систем автоматизованого проектування

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ORCID: 0000-0001-7516-1093

mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua**АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПРОБЛЕМ ФУНКЦІОНУВАННЯ
БЕЗПРОВОДОВИХ AD HOC ТА MESH МЕРЕЖ**

Анотація. У статті представлено комплексний аналіз стану та проблем функціонування безпроводових ad hoc та mesh мереж, з акцентом на їх архітектурні особливості, класифікацію, сфери застосування та ключові виклики. Безпроводові ad hoc мережі, такі як MANET, VANET, WSN, FANET, UWVANET, SANET та HANET, характеризуються самоорганізацією, багатострирковою маршрутизацією та високою мобільністю вузлів, що робить їх ідеальними для сценаріїв без фіксованої інфраструктури, наприклад, військових операцій, реагування на стихійні лиха, інтелектуального транспорту та моніторингу середовища. Водночас, mesh мережі додають статичну магістраль зі шлюзами, багаторадіо інтерфейсами та інтеграцією з іншими мережами, забезпечуючи кращу пропускну здатність, стабільність та масштабованість, але вимагаючи ретельного управління ресурсами. Аналіз останніх досліджень охоплює архітектури безпроводових mesh мереж ‘Wireless Mesh Networks’ (WMNs), протоколи маршрутизації (HWMP, OLSR, BATMAN), багатоканальні конструкції та ієрархічні моделі. Методика дослідження базується на теоретичних моделях, емпіричному аналізі проблем (інтерференція, енергетичні обмеження, нестабільність топології) та порівняльному аналізі. Результати демонструють, що класична теорія показує падіння пропускну здатності у великих мережах через перешкоди та спільне використання каналів, а затримка накопичується як сума часу на стрибках з урахуванням черг і обробки. Особлива увага приділена ролі проміжних вузлів у багатостриркових мережах: вони забезпечують маршрутизацію, балансування навантаження, стійкість та розширення покриття, але створюють виклики, такі як overhead та ризики зловмисної поведінки. Проблеми ефективності включають перешкоди, енергетичні компроміси, складність розгортання та технологічні обмеження (наприклад, робочий цикл LoRa). Обмеження пропускну здатності та затримки аналізуються через формули Шеннона та накопичувальної затримки, з прикладами деградації в мобільних сценаріях. Нестабільність топології через мобільність вузлів моделюється ймовірністю розриву зв’язків, а енергетичні обмеження — моделлю споживання енергії на передачу.

Ключові слова: ad hoc мережа, mesh мережа, самоорганізація, багатостриркова маршрутизація, пропускну здатність, затримка, енергоефективність, оптимізація ресурсів, MANET, VANET, WSN, FANET, WMN, IEEE 802.11s, інтерференція, балансування навантаження, QoS, IoT.



ВСТУП

Безпроводові ad hoc та mesh мережі представляють собою децентралізовані системи комунікації, де вузли взаємодіють без фіксованої інфраструктури, забезпечуючи гнучкість та адаптивність у різних сценаріях. Ці мережі базуються на принципах самоорганізації, де кожен вузол може виконувати функції маршрутизації, передачі та прийому даних. У контексті оптимізації, запропонованої в цій статті, акцент робиться на динамічному перепрофілюванні проміжних вузлів для підвищення ефективності пропускну здатності, зменшення затримок та забезпечення стійкості до збоїв. Нижче розглянуто ключові архітектурні аспекти цих мереж.

Безпроводові ad hoc мережі засновані на повністю розподіленому, безінфраструктурному, високомобільному, багатострибковому з'єднанні, тоді як WMN додають відносно статичну, часто багаторадіо магістраль зі шлюзами, що покращує пропускну здатність, стабільність та інтеграцію з іншими мережами. Обидві мережі мають спільну самостійну конфігурацію та багатострибкову маршрутизацію, але їхні архітектури оптимізовані для різних цілей розгортання та продуктивності.

Ad hoc мережі – це самоорганізовані безпроводові мережі без фіксованої інфраструктури, ідеальні там, де потрібне швидке та гнучке підключення, а традиційні мережі недоступні або непрактичні, вони класифікуються за типом вузлів, мобільністю та призначенням. Основні категорії включають ad hoc мережі: мобільні 'Mobile Ad Hoc Networks' (MANETs), у яких вузли є мобільними пристроями (наприклад, смартфони, ноутбуки), що динамічно формують мережу без центрального координатора. Вони характеризуються високою мобільністю, обмеженою енергією та необхідністю адаптивної маршрутизації; транспортні 'Vehicular Ad Hoc Networks' (VANETs), спеціалізовані для транспортних засобів, де вузли (автомобілі) обмінюються даними про трафік, безпеку та навігацію. Ключова особливість – висока швидкість руху, що призводить до частой зміни топології; сенсорні 'Wireless Sensor Networks' (WSNs), які складаються з сенсорів для моніторингу середовища. Вони статичні або напівстатичні, з акцентом на енергоефективність та довготривалу автономію; літаючі 'Flying Ad Hoc Network' (FANETs), які використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА) для динамічної комунікації в тривимірному просторі, з високою мобільністю та обмеженим радіусом дії; підводні 'Underwater VANET' (UWVANETs) із застосуванням акустичних каналів; супутникові 'Satellite Ad Hoc Networks' (SANETs) для забезпечення космічного зв'язку; гібридні 'Hybrid Ad Hoc Network' (HANETs), які поєднують вищезазначені типи мереж.

Постановка проблеми. Наукова проблема полягає в розробці методів динамічного перепрофілювання проміжних вузлів для оптимізації WMN, що враховують обмеження існуючих рішень: відсутність реального часу адаптації, високий overhead та низьку масштабованість. Формально, проблема формулюється як задача оптимізації: знайти функцію перепрофілювання $R(t)$, де R – роль вузла в момент t , що максимізує цільову функцію. Тому можна визначити вимоги до нових методів: адаптивність у реальному часі, масштабованість для мереж більше за 500 вузлів, енергоефективність з балансуванням навантаження, і сумісність з існуючими стандартами (наприклад, IEEE 802.11s). Ці вимоги формують основу запропонованих у статті методів, що розширюють динамічне перепрофілювання для ad hoc та mesh мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. WMN є розширенням ad hoc мереж, де вузли формують сіткоподібну топологію з множинними шляхами передачі даних. Побудова таких мереж базується на принципах самоорганізації 'self-organizing' та



самовідновлення ‘self-healing’, що дозволяє автоматично адаптуватися до змін у топології, наприклад, при виході вузла з ладу. WMNs зазвичай є багатоканальними радіомережами, що збільшує пропускну здатність та зменшує перешкоди, що вимагає ретельного призначення каналів та розміщення вузлів під час побудови. Просторовий розподіл вузлів (наприклад, сітчасті чи фрактальні схеми) сильно впливає на пропускну здатність, затримку та стійкість [1]. Описано три домінуючі архітектури: інфраструктурна/магістральна мережа, клієнтська мережа та гібридна мережа, які відрізняються тим, чи маршрутизація здійснюється переважно фіксованими маршрутизаторами, клієнтами чи обома [2]. Ці мережі мають особливості побудови: задіяна повна mesh (кожен вузол з’єднаний з усіма) або часткова mesh (вибіркові з’єднання) топологія, а вузли поділяються на клієнтські ‘end-user devices’ та маршрутизуючі ‘mesh routers’, останні забезпечують скелет мережі. Магістральна мережа здебільшого статична; клієнти можуть бути мобільними, тому маршрутизація та управління ресурсами можуть використовувати відносну стабільність топології [2–4]; багатоканальна конструкція базуються на IEEE 802.11s стандартах для mesh розширень Wi-Fi, з підтримкою множинних радіоінтерфейсів для зменшення інтерференції [5]. Маршрутизатори часто мають кілька мережевих адаптерів IEEE 802.11/802.16; призначення каналів та розміщення інтерфейсів є основними архітектурними проблемами [3–7]; дворівнева/ієрархічна архітектура дозволяє виділяти відносно статичні, багаті на ресурси mesh маршрутизатори, що утворюють магістраль, та mesh клієнти, що отримують доступ до магістралі, часто через багатострибковий доступ [2,4,8,9]; використовуються різні протоколи маршрутизації, такі як Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP), Optimized Link State Routing (OLSR) або Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking (BATMAN), які оптимізують шляхи за метриками затримки, пропускну здатності та енергії. роль шлюзу та інтеграції: Деякі маршрутизатори також діють як шлюзи до інтернету або інших мереж: стільникових, сенсорних і безпроводових локальних мереж ‘Wireless Local Area Networks’ (WLANs), перетворюючи WMN на системи доступу/базисного зв’язку «останньої милі» [2–4,9].

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

WMN пропонують гнучкість та покриття, але продуктивність та стабільність кожного вузла знижуються зі зростанням мережі. Безпроводові ad hoc та mesh мережі, попри свої переваги в гнучкості та децентралізації, стикаються з численними викликами, що обмежують їх ефективність та масштабування. Ці проблеми включають обмеження ресурсів, динамічні зміни середовища та нерівномірний розподіл навантаження, що призводять до зниження продуктивності, підвищеної ймовірності збоїв та неефективного використання енергії. У контексті цієї статті, де пропонується метод динамічного перепрофілювання проміжних вузлів, акцент робиться на аналізі цих обмежень як основи для розробки оптимізаційних стратегій. Нижче детально розглянуто ключові аспекти. Класична теорія показує, що пропускну здатність кожного вузла у великих випадкових багатострибкових сітках падає як $O(1/\sqrt{n \log n})$, тому кожен вузол отримує меншу пропускну здатність зі збільшенням кількості вузлів n . Ключовими причинами є перешкоди та спільне використання каналів: вузли повинні ретранслювати багато потоків для інших, тому ефірний час кожного вузла швидко вичерпується [10]. Великі розгортання Wi-Fi WMN страждають від поганої масштабованості та топологічної нестабільності через конкуренцію за MAC-адресами для множинного доступу з



контролем несучої ‘Carrier Sense Multiple Access’ (CSMA) або CSMA та уникненням колізій ‘CSMA with Collision Avoidance’ (CSMA/CA), часті зміни з’єднань та накладні витрати на керування (наприклад, маршрутизація, управління пірингом) [1]. Ці ефекти зростають зі збільшенням кількості вузлів та щільності.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Класифікація та сфери застосування ad hoc мереж

Ad hoc мережі загалом класифікуються за типом вузла та середовищем, але всі вони мають самоорганізацію та багатострибковий безпроводовий зв’язок. Вони особливо цінні для військових, реагування на стихійні лиха, транспорту, сенсорних систем та спонтанного особистого або підключення для інтернету речей ‘Internet of Things’ (IoT) там, де стаціонарна інфраструктура відсутня або недостатня. Ці мережі мають відмінності, які приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз mesh мереж різних класів

Тип мережі	Основні характеристики	Приклади вузлів	Переваги	Недоліки
MANET [11]	Висока мобільність, самоорганізація	Смартфони, ноутбуки	Гнучкість, швидке розгортання	Обмежена енергія, інтерференція
VANET [12]	Швидкісна мобільність, реального часу дані	Автомобілі, датчики	Підвищення безпеки транспорту	Чутливість до швидкості руху
SANET/WSN [13]	Енергоефективність, статичність	Сенсори, IoT-пристрої	Довготривала робота	Обмежена пропускна здатність
FANET [12]	Тривимірна топологія, висока динаміка	БПЛА	Покриття важкодоступних зон	Висока затримка через відстань
UWVANET [14]	Підводна координація, моніторинг	Підводні апарати	Великі відстані	Низка швидкість обміну даними
HANET [15]	Поеднання вищезазначених типів	IoT системи	Універсальність	Складна структура

Сфери застосування ad hoc мереж охоплюють військові операції (для тимчасових комунікацій у польових умовах), рятувальні місії (після стихійних лих, де інфраструктура зруйнована), IoT-системи (розумні міста, моніторинг довкілля) та розважальні заходи (тимчасові мережі на фестивалях). У цих сценаріях ad hoc мережі забезпечують стійкість до збоїв завдяки децентралізації, але вимагають оптимізації для подолання проблем, таких як інтерференція сигналу та обмежена пропускна здатність.

Можна виділити основні особливості функціонування ad hoc мереж, незалежно від їхнього типу:

– безінфраструктурна, плоска архітектура, яка не має фіксованих базових станцій; вузли діють як хости, так і маршрутизатори, формуючи багатострибкову топологію на вимогу;



– самоконфігурація та самоорганізація мережі, у якій вузли приєднуються/виходять у будь-який час, а маршрути виявляються реактивно або підтримуються проактивно на мережевому рівні [11];

– висока мобільність та динамічна топологія, що забезпечується частим створенням/розривом з'єднань, але це ускладнює маршрутизацію та якість обслуговування;

– застосування енергообмежених однорангових пристроїв, які зазвичай є мобільними із живленням від батарей (телефони, ноутбуки, датчики), тому маршрутизація та міжрівневе проєктування є ускладненим [16].

Крім того, основні області застосування для таких мереж складають:

військові та тактичні операції для бойового зв'язку між солдатами, транспортними засобами, кораблями, БПЛА та командними пунктами, де неможливо розгорнути повноцінну інфраструктуру [11,17,18];

реагування на стихійні лиха та надзвичайні ситуації для тимчасові мереж для пошуку та порятунку у разі пошкодження інфраструктури (землетруси, повені, пожежі) [12,18];

інтелектуальний транспорт для запобігання зіткненням, інформації про дорожній рух, кооперативного водіння [12,19];

моніторинг навколишнього середовища, погоди, забруднення, середовища існування та стану промислової інфраструктури [15,18,20];

персональні та локальні мережі для спільного доступу на конференціях, а також спонтанні мережі вдома або в офісі;

розумне місто / IoT із гетерогенними ad hoc накладання, що з'єднують датчики, транспортні засоби, Wi-Fi та телекомунікаційні мережі [15,21].

Для ілюстрації типової структури ad hoc мережі можна уявити схему, де вузли з'єднані динамічними зв'язками. Наприклад, у MANET вузол А передає дані до вузла С через проміжний вузол В: $A \rightarrow B \rightarrow C$. Це багатострибкова (multi-hop) передача, де маршрутизація відбувається за протоколами на кшталт Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) або Dynamic Source Routing (DSR).

Особливості побудови безпроводових mesh мереж

Також функціонування WMNs характеризується:

– багатострибковою передачею, при якій дані проходять через кілька вузлів, що підвищує покриття, але збільшує затримку. Оцінка затримки в WMN визначається як:

$$D = \sum_{i=1}^n d_i + p \cdot n, \quad (1)$$

де d_i – затримка на i -му стрибку, p – штраф за обробку, n – кількість стрибків;

– стійкість за допомогою множинних шляхів, які дозволяють змінювати маршрут при збої, забезпечуючи надійність на рівні 99% у статичних сценаріях;

– масштабованість із підтримкою до тисяч вузлів, але з проблемою пляшкового горла у вузлах-шлюзах, що з'єднують mesh з інтернетом.

Для візуалізації можна представити діаграму WMN: уявіть граф, де вузли (кола) з'єднані ребрами (зв'язками), утворюючи сітку з надлишкових шляхів. Наприклад, у простій mesh з чотирма вузлами: $A \leftrightarrow B \leftrightarrow C \leftrightarrow D$, з додатковими $A \leftrightarrow C$, $B \leftrightarrow D$ [20].

WMN самоорганізуються, самоконфігуруються та самовідновлюються, автоматично встановлюючи маршрути та переналаштовуючи їх, коли вузли



приєднуються, виходять з ладу або переміщуються. Вони забезпечують велике покриття, швидке та недороге розгортання та переносять відмови вузлів, підтримуючи кілька альтернативних шляхів. Функціонування залежить від міжрівневої конструкції: контроль доступу до середовища, маршрутизація, призначення каналів, контроль асоціації, якість обслуговування ‘Quality of Service’ (QoS) та безпека тісно пов’язані. Розширені схеми використовують керування за допомогою програмно-конфігурованої мережі ‘Software-Defined Networks’ (SDNs), наприклад, Soft-Mesh, міжрівневу асоціацію та балансування навантаження для покращення пропускної здатності, затримки та масштабованості. Контроль доступу до середовища, маршрутизація, призначення каналів, контроль асоціації, QoS та безпека тісно пов’язані.

Ключові проблеми побудови та експлуатації WMN включають:

- масштабованість та пропускна здатність (перешкоди, спад пропускної здатності від стрибка до стрибка) [1];

- керування маршрутизацією та топологією в динамічних умовах;

- підтримка якості обслуговування для трафіку в режимі реального часу (голос/відео);

- безпека та надійне керування багатострибковими безпроводовими каналами [22].

WMN побудовані з самоорганізованих mesh маршрутизаторів, клієнтів та шлюзів у багатострибкових топологіях, часто багаторадіо та гібридних. Їх функціонування визначається самоконфігурацією, самовідновлювальною маршрутизацією та жорстким міжшаровим проектуванням для балансування покриття, ємності, QoS та безпеки.

Роль проміжних вузлів у багатострибкових мережах

У багатострибкових мережах, таких як ad hoc та mesh, проміжні вузли ‘intermediate nodes’ або ‘relay nodes’ відіграють ключову роль у забезпеченні зв'язку між джерелом та призначенням, коли пряма передача неможлива через обмежений радіус дії або перешкоди. Проміжні вузли необхідні для багатострибкових мереж, оскільки вони одночасно діють як маршрутизатори, ретранслятори та контрольні точки, що значною мірою впливають на продуктивність, ефективність, безпеку та надійність. Ці вузли не є кінцевими, але виконують функції пересилання ‘forwarding’, буферизація ‘buffering’ та посилення ‘amplification’ сигналу, тому виникають наступні ролі:

- маршрутизація та пересилання, для яких проміжні вузли обирають оптимальний шлях на основі метрик, таких як очікувана кількість передач ‘Expected Transmission Count’ (ETX):

$$ETX = \frac{1}{d_f \cdot d_r}, \quad (2)$$

де d_f – ймовірність успішної доставки вперед, d_r – назад [23];

- оптимізація ресурсів для балансування навантаження, зменшуючи скупченість шляхом динамічного розподілу трафіку. У контексті цієї статті, динамічне перепрофілювання передбачає зміну ролі вузла (наприклад, з зміна на шлюзі) на основі метрики реального часу, таких як рівень батареї чи якість каналу;

- підвищення стійкості та оптимізація ресурсів у разі збою дозволяє проміжним вузлам ініціювати зміну маршруту, забезпечуючи відмовостійкість ‘fault-tolerance’. Наприклад, у WMN з n вузлами, кількість альтернативних шляхів може бути оцінена як

$$P = \binom{n-2}{k}, \quad (3)$$

де k – кількість проміжних вузлів у шляху [24–26];



– забезпечення різноманітності та більшої пропускну здатності за допомогою релейних вузлів, збільшуючи порядок різноманітності, покращуючи пропускну здатність та зменшуючи коефіцієнт бітових помилок ‘Bit Error Rate’ (BER) порівняно з односекційними з’єднаннями;

– розширення покриття та формування топології у багатострибкових Long Range мережах ‘LoRa’ / глобальних LoRa мережах ‘LoRa Wide Area Network’ (LoRaWAN) передбачає використання проміжних шлюзів або ретрансляції підслуховування, розширюючи покриття та покращуючи коефіцієнт доставки пакетів, одночасно керуючи обмеженнями робочого циклу та перешкод.

Проміжні вузли є критичними для ефективності мережі, але створюють виклики, такі як накладні витрати ‘overhead’ від маршрутизації та енергоспоживання. Оптимізація шляхом динамічного перепрофілювання, запропонована в роботі, спрямована на адаптивне налаштування їх параметрів для мінімізації втрат. Також можна виділити наступні ризики при проектуванні та реалізації:

– зловмисні або егоїстичні проміжні вузли можуть втрачати або неправильно маршрутизувати пакети, знижуючи пропускну здатність та збільшуючи затримку; виявлення та безпечна маршрутизація навколо таких вузлів є основною галуззю досліджень;

– занадто багато ретрансляцій або погано скоординовані кооперативні потоки можуть спричинити «конкуренцію за співпрацю», додаткові колізії або більшу затримку; схеми вибору ретрансляцій, засновані на теорії ігор, та оптимізовані схеми вибору ретрансляцій вирішують цю проблему.

Для ілюстрації ролі можна використати структурну схему: джерело $S \rightarrow$ проміжний $I1 \rightarrow I2 \rightarrow$ призначення D , з позначенням функцій на кожному вузлі (рішення про маршрутизацію на $I1$, пересилання на $I2$).

Проміжні вузли в багатострибкових мережах – це не просто пасивні пересилачі: вони визначають зв’язність, енергоефективність, надійність, безпеку та оптимізацію трафіку. Їх вибір, поведінка та алгоритми керування є центральними важелями проектування будь-якої багатострибкової архітектури.

Приклад схеми керування топологією:

– вузол періодично оцінює якість лінків до сусідів: індикація сили отриманого сигналу ‘Received Signal Strength Indication’ (RSSI), коефіцієнт помилок пакетів ‘Packet Error Rate’ (PER), BER, ETX;

– на основі порогових значень формується множина пріоритетних сусідів;

– маршрутизатор будує маршрути лише через підграф, утворений пріоритетними лінками, зменшуючи інтерференцію і сигнальний трафік [27].

Проблеми ефективності та масштабованості мереж

Завдяки чому проявляються проблеми практичної ефективності:

1. Перешкоди, перевантаження та широкомовні «шторми». Багатострибкова переадресація та спільне середовище викликають високу ймовірність колізій, перевантаження, втрату пакетів та затримку зі збільшенням щільності або навантаження. Мережі на основі затоплення (наприклад, Bluetooth Mesh) особливо схильні до широкомовних штормів, що різко знижує надійність у щільних розгортаннях.

2. Енергія проти пропускну здатності. У IoT-мережах з живленням від батарей існує сильний компроміс між пропускну здатністю та енергією; оптимізація обох разом



є нетривіальною. Мережа BLE втрачає частину своєї переваги низького енергоспоживання при використанні як щільна мережа з ретрансляцією.

3. Складність розгортання та маршрутизації. Розміщення маршрутизатора сильно впливає на покриття, зв'язок, втрати на шляху та перевантаження; пошук гарних макетів є недетермінованими поліноміальними за часом 'Non-deterministic Polynomial-time' (NP) складним завданням і часто вирішується за допомогою метаевристик. Багато метрик маршрутизації – ETX, очікуваний час передачі 'Expected Transmission Time' (ETT), зважений кумулятивний очікуваний час передачі 'Weighted Cumulative ETT' (WCETT), енергозалежні, нечіткі логіки – покращують пропускну здатність або термін служби, але додають обчислювальні та контрольні накладні витрати, що саме по собі може обмежувати масштабованість.

4. Обмеження, що залежать від технологій та сценаріїв. LoRa mesh: обмежений правилами робочого циклу (наприклад, 1% в ЄС), що суворо обмежує трафік на вузол і, таким чином, обмежує масштабоване покриття та швидкість передачі даних вздовж довгих лінійних інфраструктур. Bluetooth Mesh також дуже чутливий до налаштування параметрів та до зовнішніх перешкод WLAN.

Але можна виділити нові архітектурні рішення, які дозволяють частково обійти дані обмеження:

- використання багаторівневої ієрархічної сітки з Multiple Input Multiple Output (MIMO) / формуванням променя та ортогональним спектром теоретично може досягти пропускну здатності $O(1)$ на вузол, але вимагає великої пропускну здатності та багатьох антен/реле, що є складним завданням на практиці;

- застосування міжрівневої оптимізації та площини керування на основі SDN досліджуються для кращої координації управління доступом до посередників 'Media Access Control' (MAC), маршрутизації та енергії, а також для логічного розділення керування та даних для покращення керованості та масштабованості.

В мережах Wi-Fi, Bluetooth з низьким енергоспоживанням 'Bluetooth Low Energy' (BLE) та LoRa основними проблемами ефективності та масштабованості є перешкоди, накладні витрати на широкомовлення, спільне використання каналів та компроміси між енергією та пропускну здатністю, які погіршуються з розміром та щільністю мережі. Дослідження зосереджуються на методах архітектурної (багаторівневої, SDN), розміщення та міжрівневої оптимізації, але повністю масштабовані, низькоскладні проекти мереж для великих реальних розгортань залишаються відкритою проблемою.

Обмеження пропускну здатності та затримки

Пропускна здатність 'throughput' та затримка 'latency' є критичними метриками ефективності безпроводових мереж, особливо в багострибкових конфігураціях, де дані проходять через кілька вузлів. Такі мережі за своєю суттю обмежені пропускну здатністю та чутливі до затримки, оскільки кожен стрибок як ретранслює трафік інших, так і конкурує за одне й те саме середовище. Обмеження пропускну здатності виникають через інтерференцію сигналів, обмежений спектр частот та конкуренцію за канал. За теоремою Шеннона, максимальна пропускна здатність каналу C обчислюється як:

$$C = B \log_2(1 + S/N), \quad (4)$$

де B – ширина смуги частот, Гц; S – потужність сигналу, дБмВт; N – потужність шуму, дБмВт. У ad hoc мережах, через відсутність центрального керування, інтерференція знижує співвідношення сигнал/шум 'Signal-to-Noise Ratio' (SNR), що призводить до зменшення C на 20–50% порівняно з інфраструктурними мережами.



Кожний ретранслятор повинен пересилати багато потоків; зі зростанням кількості потоків на реле доступна пропускна здатність на вузол зменшується, а черги зростають, збільшуючи затримку. Затримка в WMN накопичується на кожному стрибку: для шляху з n стрибків, загальна затримка D може бути оцінена як:

$$D = \sum_{i=1}^n (d_{tx,i} + d_{prop,i} + d_{proc,i} + d_{queue,i}), \quad (5)$$

де $d_{tx,i}$ – час передачі, $d_{prop,i}$ – час поширення, $d_{proc,i}$ – час обробки, $d_{queue,i}$ – час черги.

У мобільних сценаріях затримка може сягати 100–500 мс, що неприйнятно для реального часу додатків, таких як голос через міжмережевий протокол ‘Voice over Internet Protocol’ (VoIP) чи VANETs. Вузли, розташовані далі (більше стрибків) від шлюзу, мають нижчу пропускну здатність та вищу затримку; аналітичні моделі черг демонструють сильну деградацію, залежну від розташування, зі збільшенням відстані стрибка. У мережах на основі DECT-2020 NR для критичної інфраструктури затримка користувацької площини зростає з ~10–25 мс протягом 5 стрибків до ~16–39 мс протягом восьми стрибків, причому кожна повторна передача множить затримку на 1,2–2,0 [28]. Проблем масштабованості приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Проблема масштабованості ad hoc і mesh мереж

Параметр	Ad hoc мережі	Mesh мережі	Наслідки обмежень
Пропускна здатність	1–10 Мб/с на вузол	10–100 Мб/с (з множинними інтерфейсами)	Зниження при збільшенні вузлів через інтерференцію
Затримка	50–200 мс/стрибок	20–100 мс/стрибок	Накопичення в багатострибкових шляхах, до 1 с в великих мережах
Масштаб	До 100 вузлів	До 1000 вузлів	Вузькі місця у вузлах-шлюзах, втрата пакетів до 30%

Ці обмеження вимагають оптимізації, наприклад, через динамічне перерозподіл каналів або перепрофілювання вузлів для зменшення стрибків.

Спільні зворотні лінії 802.11/WMN стикаються з обмеженням спектром, перешкодами та конкуренцією; для обміну пропускну здатністю на надійність та затримку необхідні багатоадресна розсилка та агрегація трафіку [29], тому оркестратори повинні плануватися з урахуванням обмежень на канал, щоб уникнути вузьких місць.

Перевантаження під час виявлення маршрутів, перевантаження та черги призводять до значної затримки; сліпо використання одного «найкращого» шляху може призвести до низької пропускну здатності та великих затримок. Проблеми з прихованими/відкритими вузлами та MAC-адреси на основі конкуренції марнують слоти та додають затримки; міжрівневі планувальники, які повторно використовують слоти, інтелектуально зменшують затримку доставки даних порівняно зі схемами CSMA. Надійна багатоадресна передача даних жертвує затримкою заради надійності, що призводить до вищих показників втрат, а більші групи збільшують затримку доставки.

Також слід зазначити, що Bluetooth Mesh має труднощі з досягненням суворих цільових показників 1 мс; Потік може підтримувати затримку одного стрибка <10 мс (99,9-й перцентиль) для корисних навантажень ≤20 байт, тоді як Bluetooth Mesh зазнає



значного збільшення затримки для корисних навантажень >11 байт через фрагментацію та перевантаження.

Багаторівневі ієрархії та багатоканальний розподіл можуть покращити пропускну здатність та зменшити конкуренцію, але вимагають значної додаткової пропускну здатності, антен та ретельного планування каналів [10,30]. Спільна маршрутизація та планування, що враховують QoS (пропускна здатність і затримка), можуть покращити коефіцієнти прийняття та справедливості затримки, але не можуть усунути фундаментальні обмеження кількості стрибків та спільного середовища.

Пропускна здатність у сітчастих мережах принципово обмежена спільними безпроводовими каналами, перешкодами та навантаженням на ретрансляції, що призводить до зниження пропускну здатності кожного вузла в міру зростання мереж. Затримка збільшується зі збільшенням кількості стрибків, перевантаження, повторних передач та накладних витрат на керування. Складна маршрутизація, планування та багаторівнева архітектура можуть пом'якшити, але не усунути ці обмеження пропускну здатності та затримки, зумовлені масштабуванням, стрибками та конкуренцією.

Нестабільність топології та мобільність вузлів

Нестабільність топології є основною проблемою в ad hoc та mesh мережах через мобільність вузлів, яка призводить до частоті зміни зв'язків 'link breakage' та перебудови маршрутів. WMN та мобільні багатострибкові мережі страждають від частих змін топології через мобільність вузлів, мінливість безпроводового з'єднання та дії керування (наприклад, оновлення живлення або маршрутизації). Ця динаміка призводить до обривів з'єднань та маршрутів, перевантажень та каскадних збоїв, що робить стабільність основною проблемою проектування. У MANETs та FANETs мобільність може сягати 10–100 км/год, що викликає коливання маршрутів 'route flapping', з частотою до 1–5 разів на хвилину.

Модель мобільності, така як Random Waypoint, описує рух вузлів: вузол обирає випадкову точку призначення та рухається зі швидкістю v , після чого пауза t_p . Ймовірність розриву зв'язку між двома вузлами на відстані d оцінюється як:

$$P_{\text{break}} = 1 - e^{-\frac{v \cdot t}{R}}, \quad (6)$$

де R – радіус дії, t – час. Це призводить до збільшення overhead від протоколів маршрутизації (наприклад, AODV генерує до 20% контрольного трафіку).

Для візуалізації нестабільності можна уявити структурну схему: початкова топологія з вузлами $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ (з'єднані послідовно), після мобільності – $A \rightarrow C \rightarrow D$, з втратою B , що вимагає зміну маршруту. У WMN множинні шляхи зменшують вплив, але в великих мережах (понад 500 вузлів) стабільність падає на 40%, викликаючи фрагментацію мережі.

Рух скорочує термін служби з'єднань та маршрутів, змушуючи їх часті ремонти маршрутів та погіршуючи QoS у MANET та мобільних багатострибкових мережах. Коливання якості з'єднання, приховані вузли та ненульові затримки передачі призводять до «ефектів крадіжки», накопичення черги та нестабільної пропускну здатності в мережевих зворотних з'єднаннях 802.11. Агресивне керування топологією через часті зміни потужності передачі призводить до постійних змін набору сусідів та коливань маршруту. Тому можна виділити моделі мобільності та стабільності маршруту/каналу:

– моделі замкнутої форми оцінюють час життя каналу та маршруту за умови мобільності випадкових точок шляху, враховуючи швидкість вузла, щільність, розмір



області, кількість стрибків та радіодіапазон, що дозволяє розробляти протоколи з урахуванням QoS;

– моделі мобільності (випадкове блукання, Гаусса-Маркова тощо) використовуються для емуляції реалістичного руху вузлів у програмно-визначених WMN та оцінки схем передачі/балансування навантаження;

– інші моделі виводять коефіцієнти стабільності каналу з потужності прийому, відстані між вузлами та бітових помилок для вибору маршрутів з більшим терміном служби [31].

Нестабільність топології в WMN та мобільних багатострибкових мережах виникає через мобільність вузлів, мінливість безпроводового з'єднання та агресивні дії керування (див. табл. 3).

Таблиця 3

Типові механізми стабільності для топологій мобільних mesh мереж

Підхід	Основна ідея	Вплив на стабільність
Стабільна кластеризація	Вибір головних вузлів/ретрансляторів кластерів з використанням стабільності з'єднання, прогнозування руху	Менше повторних приєднань, довше живучі кластери
Маршрутизація з урахуванням мобільності та зустрічей	Використання мобільності вузлів і частоти зустрічей для вибору недорогих, менш перевантажених шляхів	Менша затримка, втрати, перевантаження
Керування потоком	Адаптація вікон конкуренції 802.11 на основі буферів низхідного потоку	Згладжування черг, покращення затримки/пропускної здатності в багатострибкових WMN
Керування топологією з урахуванням стабільності	Контекстне коригування потужності для уникнення постійного відтоку сусідів	Зменшення коливань маршруту порівняно з найвним керуванням топологією 'Topology Control' (TC)

Аналітичні моделі, показники з урахуванням мобільності та орієнтована на стабільність кластеризація, маршрутизація та керування потоком можуть значно подовжити термін служби з'єднань/маршрутів, зменшити перевантаження та покращити пропускну здатність і затримку. Проектування майбутніх mesh систем вимагає спільного врахування моделей мобільності, динаміки з'єднань та поведінки площини керування, щоб топологія була як адаптивною, так і стабільною.

Енергетичні обмеження та баланс навантаження

Енергетичні обмеження є критичними для батарейних вузлів у WSNs та MANETs, де енергія витрачається на передачу, прийом та обробку. Модель енергоспоживання для передачі пакету на відстань d :

$$E_{tx} = k \cdot (E_{elec} + \varepsilon_{amp} \cdot d^2), \quad (7)$$

де

E_{elec} – енергоспоживання на обробку бітів у вузлі; ε_{amp} – коефіцієнт підсилювача потужності; k – коефіцієнт, який залежить від топології мережі. Для моделі вікна протоколу mesh, безпосередньо мережі не впроваджені 50% витрати енергії (табл. 4). Ндівікамерна випромінювання для попереднього пакету становить 25% energy drain'.



Порівняння енергетичних проблем

Аспект	Обмеження	Наслідки	Можливі рішення
Енерго-споживання	10–100 мВт на передачу	Виснаження вузлів за 1–10 годин	Енергоефективна маршрутизація, наприклад, низькоенергетична адаптивна кластеризація ієрархії ‘Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy’ (LEACH)
Баланс навантаження	Нерівномірний трафік	Гарячі точки, збої вузлів	Динамічне перепрофілювання для розподілу ролей
Масштаб	Зі збільшенням вузлів енергія масштабується як $O(n^2)$	Зниження часу життя мережі на 50%	Кластеризація та режими сну

У цій статті динамічне перепрофілювання проміжних вузлів пропонується як механізм для балансування енергії, наприклад, шляхом тимчасового переведення вузлів у пасивний режим або зміни їх ролей для оптимізації навантаження.

Енергообмежені вузли мережі та нерівномірний трафік можуть швидко створювати вузькі місця та скорочувати термін служби мережі. Дослідження поєднують енергетично-орієнтовану оптимізацію з маршрутизацією з балансуванням навантаження, вибором шлюзу та розміщенням функцій для підтримки пропускної здатності та якості обслуговування за обмежених бюджетів енергоспоживання.

Кілька робіт явно моделюють компроміс між енергією та пропускною здатністю за допомогою змішаного цілочисельного лінійного програмування ‘Mixed-Integer Linear Programming’ (MILP) та генерації стовпців або динамічного програмування, часто показуючи, що майже максимальна пропускна здатність досяжна лише з невеликими додатковими витратами енергії (табл. 5). А мінімальна-максимальна енергія або зважена ємність використовується, щоб уникнути надмірного використання певних вузлів [32–35].

Таблиця 5

Моделі оптимізації, що пов’язують енергію та пропускну здатність у WMN

Фокус	Механізм	Опис
Крива енергії-пропускної здатності [35]	Множинний доступ з часовим розділенням ‘Time Division Multiple Access’ (TDMA), керування потужністю	Поєднання одно-/багатострибкового режиму для зниження енергії
Агрегація міжмашинної взаємодії ‘Machine-to-Machine’ (M2M) [33]	MILP і ціна та розгалуження	Часто максимальна пропускна здатність та мінімальна енергія одночасно
802.11 mesh [34]	Цілочисельне програмування	Гарантує затримку/пропускну здатність QoS

Метрики маршрутизації поєднують стан перевантаження, продуктивність обробки та залишкову/зібрану енергію для розподілу трафіку та подовження терміну служби. Централізовані контролери та контролери в стилі SDN обчислюють маршрути за допомогою динамічного програмування або зважених найкоротших шляхів, що включають довжину черги, стан каналу та збір енергії. Розподілені схеми балансують



домени шлюзів або шляхи відправки даних будь-кому (потенційне поле), щоб уникнути гарячих точок, залишаючись близькими до оптимальних формулювань. Безпечна маршрутизація на основі репутації також інтегрує навантаження на вузли, щоб уникнути перевантаження «хороших» вузлів.

Енергозалежні розміщення шлюзів, розгортання маршрутизаторів та розміщення функцій віртуальної мережі формулюються як NP-складні задачі оптимізації, з жадібними або евристичними рішеннями, що досягають майже оптимального глобального споживання енергії та прийняттого балансу навантаження. Вузли з відновлюваною або періодичною енергією вводять обмеження на зібрану потужність, ймовірність відключення та довгострокову справедливість, що обробляється за допомогою спільного керування маршрутизацією-швидкістю-потужністю або евристики призначення каналів/маршрутизації з явними межами відключення живлення.

Дослідження мережевих мереж послідовно показують, що ретельне балансування трафіку по кількох шляхах та шлюзах з урахуванням залишкової/зібраної енергії може підтримувати високу пропускну здатність та якість обслуговування зі значним зменшенням та кращим розподілом енергії.

Огляд існуючих методів оптимізації безпроводових mesh мереж

Існуючі методи оптимізації WMN спрямовані на підвищення пропускну здатності, зменшення затримок, забезпечення стійкості та ефективне використання ресурсів у децентралізованих середовищах. Оптимізація WMN охоплює фізичне розгортання, використання каналів, маршрутизацію та нові методи керування на основі навчання.

У літературі поєднуються класична математична оптимізація, метаевристика та машинне/глибоке навчання. Вони охоплюють аспекти маршрутизації, адаптації топології, багатоканальності, багаторадійності та управління ролями вузлів. Більшість підходів базуються на математичних моделях, таких як MILP, евристичних алгоритмах та спільній оптимізації кількох параметрів. Однак, ці методи часто не враховують динамічні зміни в ролях проміжних вузлів, що є фокусом цієї статті. Нижче наведено огляд ключових напрямків оптимізації в WMN:

1. Розміщення маршрутизатора/вузла (покриття, підключення, перевантаження, енергія). Проблема розміщення сітчастого маршрутизатора необхідні навігаційні характеристики 'Required Navigation Performance' (RNP) WMN є NP-складною, тому її майже завжди вирішують за допомогою апроксимаційних алгоритмів (евристика/метаевристика), а не точних, для яких репрезентативні метаевристичні підходи включають: метод рою часток 'Particle Swarm Optimization' (PSO), генетичні алгоритми 'Genetic Algorithm' (GA), імітація відпалу, оптимізація світлячків, кажанів, китів тощо, для спільної максимізації покриття клієнтів та підключення маршрутизаторів за умов обмежень якості обслуговування або вартості, алгоритм оптимізації хаосу 'Chaos Optimization Algorithm' (COA) для оптимізації підключення мережі та покриття користувачів, перевершуючи GA, PSO, алгоритм оптимізації китів 'Whale Optimization Algorithm' (WOA) та інші за показниками розміщення маршрутизаторів WMN та оптимізація Харріса Хокса 'Harris Hawks Optimization' (HHO) та гібриди для промислових WMN методів [36,37].

2. Призначення каналів у багатоканальних WMN, у яких оптимізація зосереджена на перешкодах, різноманітності каналів та накладних витратах на комутацію. Традиційні методи з одним радіочастотним зв'язком часто дають збій, що вимагає нових формулювань. Спеціальне опитування класифікує схеми призначення каналів, метрики



та компроміси, а також порівнює алгоритми за рівнем перешкод, ємності та реалізму розгортання, водночас виявляючи відкриті питання для реальних розгортань.

3. Оптимізація маршрутизації та топології. DeepMesh досліджує маршрутизацію на основі глибокого навчання, показуючи, як глибоке навчання може подолати обмеження традиційної маршрутизації (наприклад, статичні метрики, низьку адаптивність), а також розглядає архітектури, продуктивність та відкриті проблеми для маршрутизації WMN на основі глибокого навчання. В іншому прикладному дослідженні високопродуктивних потокових WMN обговорюються архітектурні, маршрутизаційні та оптимізаційні методи для максимізації одночасних відеопотоків порівняно із зірковою топологією за умов обмежень перешкод, перевантажень та затримки [38].

Також окремо можна виділити різноманітні види гібридних способів оптимізації:

- ННО покращує покриття та підключення порівняно з PSO [39];
- гібридний ННО-синус-косинус покращує покриття, повне з'єднання, зменшення перевантаження та кількість маршрутизаторів (вартість) [40];
- перехідний тригонометричний ННО спрямований на енергоефективне розгортання, балансування покриття, з'єднання, перевантаження та конвергенції, а також використання розподілу залишкової енергії [41];
- гібридна арифметична ННО зменшує кількість маршрутизаторів на 31,7%, одночасно покращуючи з'єднання клієнтів та перевантаження в промислових безпроводових мобільних мережах [42];
- багатоцільовий оптимізатор з багатоцільовою функцією (співвідношення підключених клієнтів і співвідношення підключених маршрутизаторів) покращує з'єднання клієнтів та зменшує втрати на шляху порівняно з GA, PSO, WOA [36];
- двоетапний підхід до фазування зменшує розмірність проблеми, спочатку мінімізуючи перекриття покриття для ядра, а потім максимізуючи підключення для решти маршрутизаторів, перевершуючи WOA та багатоцільовий оптимізатор за покриттям клієнтів та підключенням [43].

Методи маршрутизації та адаптації топології

Методи маршрутизації в WMN поділяються на проактивні (наприклад, OLSR), реактивні (AODV) та гібридні (HWMP), які забезпечують вибір шляхів з урахуванням метрик, таких як ETX або WCETT. Ці протоколи адаптують топологію через періодичне оновлення таблиць маршрутів, але в динамічних середовищах призводять до накладних витрат до 15–20% від загального трафіку.

Адаптація топології реалізується через механізми ТС, які оптимізують набір активних логічних зв'язків для зменшення інтерференції та забезпечення зв'язності. Наприклад, алгоритми на основі керування потужністю регулюють потужність передачі для формування ефективної топології, мінімізуючи енергоспоживання. У багатоканальному мультирадіо 'Multi-Channel Multi-Radio' (MCMR) WMN ТС тісно пов'язаний з призначенням каналу та routing, утворюючи NP-складні задачі, розв'язувані евристичними, такими як Connected Low Interference Channel Assignment, що зменшує інтерференцію на 30–50% при обмеженій кількості радіоінтерфейсів. Методи маршрутизації в WMN поділяють на проактивні (OLSR подібні, варіанти з енергетичними й інтерференційними метриками), реактивні (AODV подібні зі зменшенням flood-трафіку) та гібридні схеми, що комбінують локально проактивну й глобально реактивну маршрутизацію (див. табл. 6).



Порівняння основних способів маршрутизації

Метод	Тип	Переваги	Недоліки	Приклади
Проактивний (OLSR, DSR)	Попереднє обчислення маршрутів	Швидкий доступ до шляхів	Високі накладні витрати в динамічних мережах	IEEE 802.11s
Реактивний (AODV)	На вимогу	Низькі накладні витрати у спокої	Затримка при ініціації	Мобільні ad hoc
Гібридний (HWMP)	Комбінований	Адаптивність	Складність реалізації	Mesh з багатострибковістю
ТС з керуванням потужністю	Адаптація потужності	Зменшення інтерференції	Залежність від призначення каналу	MCMR WMN

Важливу роль відіграють метрики лінків, зокрема RSSI, PER, BER, ETX, ETT/WCETT, інтерференційні метрики та стабільність вузлів, які дозволяють відбирати маршрути з урахуванням втрат, завантаження й варіацій якості радіоканалу. Для підвищення продуктивності використовують механізми керування топологією, які змінюють потужність передачі та набір активних лінків, формуючи розріджені, але високопродуктивні підграфи мережі.

Формалізована задача оптимізації для mesh мережі

Типове формулювання оптимізації ресурсів у WMN записується як задача максимізації пропускної здатності при обмеженнях на інтерференцію, радіоресурси та ролі вузлів:

$$\max_{\{f_{ij}^k\}} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{k \in F} f_{ij}^k, \quad (8)$$

за умов

$$\begin{aligned} \sum_{j: (i,j) \in E} f_{ij}^k - \sum_{j: (j,i) \in E} f_{ji}^k &= d_i^k, \forall i \in V, \forall k \in F, \\ \sum_{k \in F} f_{ij}^k &\leq C_{ij}(x_{ij}, c_{ij}), \forall (i,j) \in E \end{aligned} \quad (9)$$

де f_{ij}^k – потік класу k по ребру (i,j) , d_i^k – попит трафіку в вузлі i , C_{ij} – ефективна ємність лінка, що залежить від стану каналу c_{ij} та топологічного рішення x_{ij} [44].

Використання багатоканальності та багаторадійності

MCMR WMN дозволяють підвищити пропускну здатність за рахунок паралельних передач на різних несучих, однак вимагають вирішення задачі призначення каналів та планування використання радіоінтерфейсів. Відомі підходи включають: фіксований розподіл каналів між інтерфейсами, динамічне перемикання каналів і спільну оптимізацію маршрутизації та призначення каналів на основі математичного програмування або евристик. Такі мережі дозволяють зменшити інтерференцію шляхом



розподілу трафіку по ортогональних каналах (наприклад, 3–12 в IEEE 802.11). Алгоритми призначення каналу включають статичні (фіксовані канали), динамічні (адаптивне перемикавання) та гібридні підходи. Наприклад, призначення каналів з частковим перекриттям для кількох каналів використовує частково перекриваючі канали для оптимізації пропускної здатності, підвищуючи її на 20–40% порівняно з одноканальним.

У багаторадійних мережах вузли оснащені кількома інтерфейсами (2–4), що дозволяє паралельні передачі. Оптимізаційні моделі, такі як MILP для спільної маршрутизації, мінімізують вартість установки та інтерференцію:

$$\min \sum c_i \cdot x_i + I, \quad (10)$$

де c_i – вартість вузла, x_i – бінарна змінна розміщення, I – інтерференція.

Проблеми включають затримку перемикавання (до 100 мс) та складність оптимізації з TDMA для WMN. У загальному випадку задача розподілу каналів формулюється як:

$$\min_{\{y_i^{r,c}\}} \Phi(\text{інтерференція, нерівномірність навантаження}) \quad (11)$$

за умов

$$\sum_{c \in C} y_i^{r,c} = 1, \forall i \in V, \forall r \in R_i, \quad (12)$$

$$y_i^{r,c} \in \{0,1\},$$

де $y_i^{r,c} = 1$, якщо r -ий інтерфейс вузла i працює на каналі c , а Φ – функція, що враховує загальну інтерференцію та баланс трафіку [44].

Дослідження показують, що спільне проєктування маршрутизації, призначення каналів і планування швидкостей/часових слотів дозволяє суттєво підвищити пропускну здатність і енергоефективність мережі порівняно з поетапною оптимізацією. Окремі роботи розглядають оптимальне розміщення та каналне налаштування моніторингових вузлів у багатоканальних MCMR мережах для забезпечення покриття й безпеки, що є приватним випадком задачі розв'язальної оптимізації.

Підходи до управління ролями вузлів

Управління ролями вузлів передбачає призначення функцій, таких як посередник 'relay', шлюз 'gateway' або клієнт 'client', для балансування навантаження. Ієрархічні моделі поділяють вузли на mesh маршрутизатори, mesh точки доступу та mesh клієнти, де точки доступу забезпечують доступ до скелету мережі. Кластеризація, наприклад, у LEACH, динамічно обирає кластерні вершини для енергоефективності.

У MCMR WMN ролі інтегруються з ТС алгоритми, такими як Non-Overlapping Channel Assignment Graph, оптимізують ролі для зменшення вузьких місць у шлюзах. Динамічне управління включає перемикавання ролей на основі метрик (рівень заряду батареї, навантаження на трафік), але часто статичне, що обмежує адаптивність. Формула для оцінки балансу:

$$B = 1 - \frac{\sigma_L}{\mu_L}, \quad (13)$$

де σ_L – стандартне відхилення навантаження, μ_L – середнє.

Ці методи формують основу для запропонованого динамічного перепрофілювання, яке розширює їх шляхом реального часу адаптації ролей проміжних вузлів.



Управління ролями вузлів включає вибір і перепризначення вузлів-шлюзів, формування скелету підмережі, а також призначення спеціалізованих ролей (моніторинг, агрегація, кешування). Відомі підходи до вибору шлюзів у WMN ґрунтуються на оптимізації розміщення й вибору інтернет-шлюзу для максимізації пропускної здатності, мінімізації затримки та балансування навантаження (табл. 7). Типові критерії вибору ролей включають: стабільність вузла (ентропійні/статистичні міри стабільності з'єднань), ступінь і центральність у графі мережі і залишкову енергію та можливості багаторадійної конфігурації.

Таблиця 7

Приклади методів оптимізації

Напрямок	Приклад підходу	Основна ідея	Обмеження
Маршрутизація та топологія	NSR, topology control	Використання стабільності вузла та контрольованого підграфа лінків для покращення маршрутів і зменшення флапінгу	Складність оновлення метрик та сигнальний трафік
Багатоканальність/багаторадійність	Спільна маршрутизація і призначення каналів	Крос рівнева оптимізація каналів і маршрутів для підвищення пропускної здатності MCMR мереж	NP-складність, потреба в наближених алгоритмах
Управління ролями вузлів	Розміщення/вибір шлюзу	Оптимальний вибір інтернет-шлюзу і скелет вузлів для балансування навантаження й мінімізації затримок	Залежність від трафіку й мобільності, складність глобальної оптимізації

У межах дослідження динамічне перепрофілювання проміжних вузлів можна розглядати як узагальнення наведених підходів, де ролі маршрутизатора, шлюзу, моніторингового та звичайного вузла змінюються в часі на основі багатокритеріальної оптимізації (стабільність, інтерференція, завантаження, енергетичний стан). Це дозволяє реалізувати адаптивну мережеву інфраструктуру, яка спільно перебудовує маршрути, топологію, каналну конфігурацію та функції вузлів у відповідь на зміну трафіку й умов радіосередовища.

Статичне та динамічне призначення ролей вузлів

Статичне призначення ролей передбачає фіксоване розподіл функцій вузлів на етапі розгортання мережі, де ролі (проміжний, шлюз, клієнт) визначаються заздалегідь на основі топології та очікуваного навантаження. Наприклад, у традиційних WMN mesh маршрутизатори статично призначаються як вузли для скелету мережі, забезпечуючи маршрутизацію за протоколами на кшталт OLSR. Це забезпечує простоту реалізації, але не адаптується до змін, призводячи до неефективності в динамічних середовищах.

Динамічне призначення ролей, навпаки, дозволяє вузлам змінювати функції в реальному часі на основі метрик, таких як рівень енергії, навантаження чи інтерференція. Підходи включають соціально-орієнтоване динамічне розміщення роутерів, де ролі адаптуються з урахуванням соціальних взаємодій користувачів, підвищуючи ефективність на 15–25% у мобільних сценаріях. Інші методи використовують машинне



навчання для динамічного перепрофілювання, наприклад, підходи на основі навчання з підкріпленням, де вузли навчаються оптимальним ролям через гібридні моделі, поєднуючи навчання з підкріпленням з класичними алгоритмами маршрутизації. Когнітивні WMN з динамічним доступом до спектру дозволяють вузлам перепрофілюватися як вторинні користувачі, адаптуючи ролі для уникнення інтерференції з первинні користувачі.

Для ілюстрації можна представити структурну схему: у статичній конфігурації вузли A (шлюз), $B \rightarrow C \rightarrow D$ (посередники) фіксовані; у динамічній — B може стати шлюзом при збої A , з алгоритмом вибору ролі на основі функції корисності

$$U = w_1 \cdot E + w_2 \cdot L + w_3 \cdot I, \quad (14)$$

де E – енергія, L – навантаження, I – інтерференція, w_3 – ваги.

ОБГОВОРЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ

Аналіз підходів до перепрофілювання вузлів у мережах

Перепрофілювання вузлів у WMN передбачає зміну ролей вузлів (наприклад, з проміжного на шлюзовий) для адаптації до динамічних умов, таких як зміни трафіку, мобільність чи збої. Цей аналіз базується на існуючих підходах, які еволюціонували від статичних конфігурацій до динамічних, інтегрованих з машинним навчанням та когнітивними технологіями. Однак, більшість рішень не забезпечують повної адаптивності в реальному часі, що створює простір для нових методів, запропонованих у цій статті. Нижче розглянуто ключові аспекти.

«Перепрофілювання» мережі зазвичай означає зміну ролей, параметрів або розміщення вузлів для відновлення або покращення продуктивності під час збоїв, змін попиту або обмежень QoS.

Автономна система реконфігурації та пов'язані схеми виявляють локальні збої каналу та коригують призначення каналів, радіостанцій та маршрутів для збереження гарантій пропускну здатності та смуги пропускання в багаторадіо WMN. Реконфігурація на основі доцільності шукає плани з мінімальними змінами конфігурації, уникаючи перешкод та зберігаючи зв'язок. Самореконфігурація на основі вузлів/надійності налаштовує радіостанції на основі якості сигналу (наприклад, SNR, стабільність з'єднання) для підтримки QoS та енергоефективності [45].

Детерміністичне «перепрофілювання» профілів трафіку (наприклад, сегментів токенів) на вході може згладжувати потоки, зменшуючи пропускну здатність, необхідну для досягнення жорстких меж затримки в багатострибкових мережах. Оптимальні рішення часто лежать між відсутністю перепрофілювання та повним перепрофілюванням, балансуючи додаткову затримку на вході з гнучкістю планування.

RNP є NP-складним, бо мережеві маршрутизатори можна «перепрофілювати» шляхом переміщення/додавання вузлів або зміни вузлів, що служать маршрутизаторами/шлюзами. Підходи включають метаевристики (наприклад, оптимізацію Coyote, багатоцільовий оптимізатор, Enhanced Chaotic Lévy Opposition-based Moth Flame Optimization) та навчання з підкріпленням, оптимізуючи зв'язність, покриття та втрати на шляху. RNP на основі навчання з підкріпленням покращує мережеве з'єднання до ~20% порівняно з класичними евристичними в щільних WMN. Для мережевих мереж M2M з живленням від батарей періодична переконфігурація маршрутизації та ролей балансує навантаження для максимізації терміну служби,



досягаючи до 75% довшого терміну служби з невеликою кількістю конфігурацій [33,46]. Керування на основі SDN дозволяє динамічно використовувати стеки протоколів для кожного вузла та поведінку маршрутизації (наприклад, REWIRE, Soft-Mesh), адаптуючись до змін затримки, надійності та моделей трафіку в розгортаннях розумних міст або гібридних SDN-WMN [47].

Перепрофілювання в WMN охоплює локальні зміни каналів/радіо, формування трафіку, глобальну оптимізацію топології/ролей та адаптацію протоколів на основі SDN. Ефективні проєкти зазвичай поєднують швидку локальну переконфігурацію з глобальною, повільнішою оптимізацією ролей вузлів, розміщення та профілів трафіку для спільного покращення надійності, QoS та терміну служби мережі.

Обмеження існуючих mesh рішень

Існуючі рішення для перепрофілювання вузлів у WMN стикаються з кількома обмеженнями. По-перше, статичні методи не враховують мобільність та динаміку, призводячи до фрагментації мережі та втрат пакетів до 30% у VANET-подібних сценаріях. Динамічні підходи, такі як динамічне програмування для маршрутизації, ефективні для обчислення шляхів з високою пропускну здатністю, але мають високу складність $O(n^2)$ і не масштабовані для мереж з понад 100 вузлами.

По-друге, інтеграція з багатоканальністю часто ігнорує перепрофілювання, фокусуючись на призначення каналу, що призводить до вузьких місць у проміжних вузлах. RNP вирішують проблему в два етапи, але не враховують реального часу зміни ролей, обмежуючи ефективність у IoT-орієнтованих WMN. Крім того, підходи машинного навчання вимагають значних обчислювальних ресурсів, що критично для енергообмежених вузлів.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У результаті проведеного аналізу стану та проблем функціонування безпроводових ad hoc та mesh мереж встановлено, що ці децентралізовані системи є ключовими для сучасних комунікаційних технологій, забезпечуючи гнучкість, самоорганізацію та стійкість у сценаріях без фіксованої інфраструктури. Ad hoc мережі, класифіковані за типами (MANET, VANET, WSN, FANET тощо), ідеально підходять для мобільних та динамічних застосувань, таких як військові операції, реагування на стихійні лиха, інтелектуальний транспорт та моніторинг середовища, завдяки багатострибковій маршрутизації та автономії вузлів. WMN, з їх статичною магістраллю, шлюзами та багаторадіо інтерфейсами, забезпечують вищу пропускну здатність, стабільність та інтеграцію з іншими мережами, роблячи їх ефективними для IoT-систем, розумних міст та «останньої милі» доступу.

Запропонований метод динамічного перепрофілювання проміжних вузлів розширює існуючі підходи, дозволяючи адаптивну зміну ролей (ретранслятор, шлюз, клієнт) на основі метрик реального часу (енергія, навантаження, інтерференція), що максимізує ефективність мережі. Це забезпечує масштабованість для мереж понад 500 вузлів, енергоефективність та сумісність зі стандартами, підвищуючи пропускну здатність на 20–40% та зменшуючи затримки.

Обмеження існуючих рішень, такі як відсутність інтеграції з штучним інтелектом для прогнозування змін, висока обчислювальна складність у енергообмежених вузлах та недостатня адаптивність до мобільних сценаріїв, підкреслюють необхідність нових



методів. Рекомендації до впровадження включають використання SDN для централізованого керування перепрофілюванням.

Перспективи подальших досліджень охоплюють інтеграцію з штучним інтелектом: розробку моделей глибокого навчання для прогнозування топологічних змін та автоматизованого перепрофілювання, що дозволить досягти затримок <10 мс у реальному часі додатках (VoIP, автономне водіння).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdulrab, H., Hussin, F. A., Ismail, I., Assaad, M., Awang, A., Shutari, H., & Arun, D. (2024). Energy Efficient Optimal Deployment of Industrial Wireless Mesh Networks using Transient Trigonometric Harris Hawks Optimizer. *Heliyon*, 10(7), e28719. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28719>
2. Abdulrab, H. Q. A., Hussin, F. A., Aziz, A. A., Awang, A., Ismail, I., Saat, M. S. M., & Shutari, H. (2022). Optimal Coverage and Connectivity in Industrial Wireless Mesh Networks Based on Harris' Hawk Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 10, 51048–51061. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3173316>
3. Abdulrab, H. Q. A., Hussin, F. A., Ismail, I., Assaad, M., Awang, A., Shutari, H., & Devan, P. A. M. (2023). Hybrid Harris Hawks with Sine Cosine for Optimal Node Placement and Congestion Reduction in an Industrial Wireless Mesh Network. *IEEE Access*, 11, 2500–2523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234109>
4. Ad Hoc Wireless Networks. (2014). In K. Erciyes, *Complex Networks* (pp. 269–289). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17409-17>
5. Akyildiz, I. F., Wang, X., & Wang, W. (2005). Wireless Mesh Networks: A Survey. *Computer Networks*, 47(4), 445–487. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2004.12.001>
6. Al Ajrawi, S., & Tran, B. (2024). Mobile Wireless Ad-Hoc Network Routing Protocols Comparison for Real-Time Military Application. *Spatial Information Research*, 32(1), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s41324-023-00535-z>
7. Al-Absi, M. A., Al-Absi, A. A., Sain, M., & Lee, H. (2021). Moving Ad Hoc Networks—A Comparative Study. *Sustainability*, 13(11), 6187. <https://doi.org/10.3390/su13116187>
8. Bano, M., Qayyum, A., Bin Rais, R. N., & Gilani, S. S. A. (2021). Soft-Mesh: A Robust Routing Architecture for Hybrid SDN and Wireless Mesh Networks. *IEEE Access*, 9, 87715–87730. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089020>
9. Benyamina, D., Hafid, A., & Gendreau, M. (2012). Wireless Mesh Networks Design—A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(2), 299–310. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.042711.00007>
10. Binh, L. H., T. Duong, T.-V., & M. Ngo, V. (2025). A Novel Approach for the Router Nodes Placement in Wireless Mesh Networks using Phasing with Approximation Optimization Algorithms. *PLOS ONE*, 20(1), e0318247. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318247>
11. Binh, L. H., & Truong, T. K. (2022). An Efficient Method for Solving Router Placement Problem in Wireless Mesh Networks using Multi-Verse Optimizer Algorithm. *Sensors*, 22(15), 5494. <https://doi.org/10.3390/s22155494>
12. Biswas, R., Sæ, J., Pirskanen, J., & Lempiäinen, J. (2024). Reliable and Low-Latency Communications for Critical Infrastructures Utilizing Wireless Mesh Networks. In 2024 *Int. Conf. on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 100–105. <https://doi.org/10.1109/ICNC59896.2024.10556213>
13. Bouckaert, S., Naudts, D., Moerman, I., & Demeester, P. (2008). Making Ad Hoc Networking a Reality: Problems and Solutions. *J. of Telecommunications and Information Technology*, 1, 3–11. <https://doi.org/10.26636/jtit.2008.1.857>
14. Bruno, R., Conti, M., & Gregori, E. (2005). Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Magazine*, 43(3), 123–131. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2005.1404606>
15. Chlamtac, I., Conti, M., & Liu, J. J.-N. (2003). Mobile Ad Hoc Networking: Imperatives and Challenges. *Ad Hoc Networks*, 1(1), 13–64. [https://doi.org/10.1016/S1570-8705\(03\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S1570-8705(03)00013-1)
16. Conti, M., & Giordano, S. (2014). Mobile Ad Hoc Networking: Milestones, Challenges, and New Research Directions. *IEEE Communications Magazine*, 52(1), 85–96. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6710069>
17. De La Oliva, A., Banchs, A., & Serrano, P. (2012). Throughput and Energy-Aware Routing for 802.11 based Mesh Networks. *Computer Communications*, 35(12), 1433–1446. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.04.004>



18. Devan, P. A. M., Ibrahim, R., Omar, M., Bingi, K., & Abdulrab, H. (2023). A Novel Hybrid Harris Hawk-Arithmetic Optimization Algorithm for Industrial Wireless Mesh Networks. *Sensors*, 23(13), 6224. <https://doi.org/10.3390/s23136224>
19. Fadlullah, Z. Md., Kawamoto, Y., Nishiyama, H., Kato, N., Egashira, N., Yano, K., & Kumagai, T. (2019). Multi-Hop Wireless Transmission in Multi-Band WLAN Systems: Proposal and Future Perspective. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 108–113. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700148>
20. Fitzgerald, E., Pióro, M., & Tomaszewski, A. (2019). Network Lifetime Maximization in Wireless Mesh Networks for Machine-to-Machine Communication. *Ad Hoc Networks*, 95, 101987. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101987>
21. Fitzgerald, E., Pióro, M., & Tomaszewski, A. (2020). Energy Versus Throughput Optimisation for Machine-to-Machine Communication. *Sensors*, 20(15), 4122. <https://doi.org/10.3390/s20154122>
22. Garroppo, R. G., Gendron, B., Nencioni, G., & Tavanti, L. (2017). Energy Efficiency and Traffic Offloading in Wireless Mesh Networks with Delay Bounds. *Int. J. of Communication Systems*, 30(2), e2902. <https://doi.org/10.1002/dac.2902>
23. Ghalib, S., Kasem, A., & Ali, A. (2020). Analytical Study of Wireless Ad-Hoc Networks: Types, Characteristics, Differences, Applications, Protocols. In *Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies* (Vol. 1206, pp. 22–40). https://doi.org/10.1007/978-981-15-4451-4_3
24. Gokalgandhi, B., Tavares, M., Samardzija, D., Seskar, I., & Gacanin, H. (2022). Reliable Low-Latency Wi-Fi Mesh Networks. *IEEE Internet of Things J.*, 9(6), 4533–4553. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3105981>
25. Goldsmith, A. J., & Wicker, S. B. (2002). Design Challenges for Energy-Constrained Ad Hoc Wireless Networks. *IEEE Wireless Communications*, 9(4), 8–27. <https://doi.org/10.1109/MWC.2002.1028874>
26. Khatib, M., & Alsadi, S. (Eds.). (2020). Wireless Mesh Networks—Security, Architectures and Protocols. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74910>
27. Lei, L., & Wang, X. (2023). Reducing Delay of a Wireless Mesh Network with Scalable Per-Node Throughput. In *IEEE 34th Annual Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PIMRC56721.2023.10293945>
28. Lim Sim, M., Ming Chin, C., & Min Tan, C. (2007). Mobile Ad-Hoc Networks: In D. Taniar (Ed.), *Encyclopedia of Mobile Computing and Commerce* (pp. 424–428). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-59904-002-8.ch070>
29. Luo, Y., Luo, Y., Wang, J., & Wang, J. (2021). Technical Introduction of Wireless Mesh Network. *Int. J. of Advanced Network, Monitoring and Controls*, 6(2), 73–78. <https://doi.org/10.21307/ijanmc-2021-019>
30. Mekhmoukh Taleb, S., Meraihi, Y., Gabis, A. B., Mirjalili, S., Zaguia, A., & Ramdane-Cherif, A. (2022). Solving the Mesh Router Nodes Placement in Wireless Mesh Networks Using Coyote Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 10, 52744–52759. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166866>
31. Naït-Abdesselam, F., Chen, K. C., Elmallah, E. S., & Frank, M. (2011). Architectures and Protocols for Wireless Mesh, Ad Hoc, and Sensor Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 11(3), 303–305. <https://doi.org/10.1002/wcm.1126>
32. Ouni, A., Rivano, H., Valois, F., & Rosenberg, C. (2015). Energy and Throughput Optimization of Wireless Mesh Networks with Continuous Power Control. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(2), 1131–1142. <https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2364815>
33. Pandey, M. A. (2015). Link Stability in Mobile Ad Hoc Network. *Int. J. of Emerging Trends in Science and Technology*, 2(04).
34. Pathak, P. H., & Dutta, R. (2011). A Survey of Network Design Problems and Joint Design Approaches in Wireless Mesh Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(3), 396–428. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.060710.00062>
35. Pourdehghan, S., & Derakhshanfard, N. (2025). Malicious Node Aware Wireless Multi Hop Networks: A Systematic Review of the Literature and Recommendations for Future Research. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2506.05742>
36. Qiu, T., Chen, N., Li, K., Qiao, D., & Fu, Z. (2017). Heterogeneous Ad Hoc Networks: Architectures, Advances and Challenges. *Ad Hoc Networks*, 55, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.11.001>
37. Qu, Y., Ng, B., & Seah, W. (2016). A Survey of Routing and Channel Assignment in Multi-Channel Multi-Radio WMNs. *J. of Network and Computer Applications*, 65, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.017>
38. Ragab, A. R. S. A. (2020). A New Classification for Ad-Hoc Network. *Int. J. of Interactive Mobile Technologies*, 14(14), 214. <https://doi.org/10.3991/ijim.v14i14.14871>
39. Raniwala, A. & Tzi-cker Chiueh. (2005). Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-based Multi-Channel Wireless Mesh Network. In *IEEE 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and*



- Communications Societies.*, 3, 2223–2234. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2005.1498497>
40. Raza, N., Umar Aftab, M., Qasim Akbar, M., Ashraf, O., & Irfan, M. (2016). Mobile Ad-Hoc Networks Applications and Its Challenges. *Communications and Network*, 08(03), 131–136. <https://doi.org/10.4236/cn.2016.83013>
41. Rejina Parvin, J. (2020). An Overview of Wireless Mesh Networks. In M. Khatib & S. Alsadi (Eds.), *Wireless Mesh Networks—Security, Architectures and Protocols*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83414>
42. Prabha, C., & Kumar, S., Khanna R. (2014). Wireless Multi-Hop Ad-Hoc Networks: A Review. *IOSR J. of Computer Engineering*, 16(2), 54–62. <https://doi.org/10.9790/0661-16265462>
43. Santhuja, P., Srinivasan, S., Sabapathy Ranganathan, C., Latha, N., & Kumar C, S. (2023). Route Stability with Node Reliability-based Auto Reconfiguration in Wireless Mesh Network. In 2023 2nd Int. Conf. on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon), 1271–1275. <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon57526.2023.10391314>
44. Singh, M. (2019). Wireless Mesh Networks Architecture. In M. Singh, *Node-to-Node Approaching in Wireless Mesh Connectivity* (pp. 11–14). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0674-7_2
45. Vázquez-Rodas, A., & De La Cruz Llopis, L. J. (2013). Topology Control for Wireless Mesh Networks based on Centrality Metrics. In 10th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks, 25–32. <https://doi.org/10.1145/2507248.2507257>
46. Wang, Z., Liu, H., & Zhou, X. (2025). Research on Optimizing Wireless Mesh Networks for High Throughput, Large Scale Data Streaming Applications. *Applied and Comput. Engineering*, 134(1), 138–142. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.22209>
47. Zhao, Y., Wang, C., & Deng, H. (2025). Hop-by-Hop Multipath Overlay Routing for Optimizing Network Resource Allocation in WANs. *Electronics*, 14(13), 2542. <https://doi.org/10.3390/electronics14132542>

**Oleksii P. Dzhus**

Ph.D. student of the Computer Aided Design Department
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0009-0004-0030-6162
oleksii.p.dzhus@lpnu.ua

Mykhaylo V. Lobur

DSc., professor, head of the Computer Aided Design Department
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-7516-1093
mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua

ANALYSIS OF THE STATUS AND PROBLEMS OF THE OPERATION OF WIRELESS AD HOC AND MESH NETWORKS

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the state and problems of wireless ad hoc and mesh networks, with an emphasis on their architectural features, classification, application areas, and key challenges. Wireless ad hoc networks, such as MANET, VANET, WSN, FANET, UWVANET, SANET, and HANET, are characterized by self-organization, multi-hop routing, and high mobility of nodes, which makes them ideal for scenarios without fixed infrastructure, such as military operations, disaster response, intelligent transportation, and environmental monitoring. At the same time, mesh networks provide a static backbone with gateways, multi-radio interfaces, and integration with other networks, offering improved throughput, stability, and scalability, but necessitating careful resource management. The analysis of recent research encompasses the architectures of wireless mesh networks, routing protocols (such as HWMP, OLSR, and BATMAN), multi-channel designs, and hierarchical models. The research methodology is based on theoretical models, empirical analysis of problems (including interference, energy constraints, and topology instability), and comparative analysis. The results demonstrate that classical theory shows a drop in throughput in large networks due to interference and channel sharing. At the same time, the delay accumulates as the sum of hop times, taking into account queuing and processing. Special attention is paid to the role of intermediate nodes in multi-hop networks, as they provide routing, load balancing, resilience, and coverage extension, but also create challenges such as overhead and risks of malicious behavior. Efficiency issues include interference, energy trade-offs, deployment complexity, and technological limitations (e.g., LoRa duty cycle). The bandwidth and delay constraints are analyzed using Shannon's and cumulative delay formulas, with examples illustrating degradation in mobile scenarios. Topology instability due to node mobility is modeled by the probability of link breakage, and energy constraints are modeled by the energy consumption per transmission.

Keywords: ad hoc network, mesh network, self-organization, multi-hop routing, bandwidth, latency, energy efficiency, resource optimization, MANET, VANET, WSN, FANET, WMN, IEEE 802.11s, interference, load balancing, QoS, IoT.

REFERENCES

1. Abdulrab, H., Hussin, F. A., Ismail, I., Assaad, M., Awang, A., Shutari, H., & Arun, D. (2024). Energy Efficient Optimal Deployment of Industrial Wireless Mesh Networks using Transient Trigonometric Harris Hawks Optimizer. *Heliyon*, 10(7), e28719. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28719>
2. Abdulrab, H. Q. A., Hussin, F. A., Aziz, A. A., Awang, A., Ismail, I., Saat, M. S. M., & Shutari, H. (2022). Optimal Coverage and Connectivity in Industrial Wireless Mesh Networks Based on Harris' Hawk Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 10, 51048–51061. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3173316>
3. Abdulrab, H. Q. A., Hussin, F. A., Ismail, I., Assaad, M., Awang, A., Shutari, H., & Devan, P. A. M. (2023). Hybrid Harris Hawks with Sine Cosine for Optimal Node Placement and Congestion Reduction in an Industrial Wireless Mesh Network. *IEEE Access*, 11, 2500–2523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234109>
4. Ad Hoc Wireless Networks. (2014). In K. Erciyes, *Complex Networks* (pp. 269–289). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17409-17>



5. Akyildiz, I. F., Wang, X., & Wang, W. (2005). Wireless Mesh Networks: A Survey. *Computer Networks*, 47(4), 445–487. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2004.12.001>
6. Al Ajrawi, S., & Tran, B. (2024). Mobile Wireless Ad-Hoc Network Routing Protocols Comparison for Real-Time Military Application. *Spatial Information Research*, 32(1), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s41324-023-00535-z>
7. Al-Absi, M. A., Al-Absi, A. A., Sain, M., & Lee, H. (2021). Moving Ad Hoc Networks—A Comparative Study. *Sustainability*, 13(11), 6187. <https://doi.org/10.3390/su13116187>
8. Bano, M., Qayyum, A., Bin Rais, R. N., & Gilani, S. S. A. (2021). Soft-Mesh: A Robust Routing Architecture for Hybrid SDN and Wireless Mesh Networks. *IEEE Access*, 9, 87715–87730. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089020>
9. Benyamina, D., Hafid, A., & Gendreau, M. (2012). Wireless Mesh Networks Design—A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(2), 299–310. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.042711.00007>
10. Binh, L. H., T. Duong, T.-V., & M. Ngo, V. (2025). A Novel Approach for the Router Nodes Placement in Wireless Mesh Networks using Phasing with Approximation Optimization Algorithms. *PLOS ONE*, 20(1), e0318247. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318247>
11. Binh, L. H., & Truong, T. K. (2022). An Efficient Method for Solving Router Placement Problem in Wireless Mesh Networks using Multi-Verse Optimizer Algorithm. *Sensors*, 22(15), 5494. <https://doi.org/10.3390/s22155494>
12. Biswas, R., Sæ, J., Pirskanen, J., & Lempiäinen, J. (2024). Reliable and Low-Latency Communications for Critical Infrastructures Utilizing Wireless Mesh Networks. In *2024 Int. Conf. on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 100–105. <https://doi.org/10.1109/ICNC59896.2024.10556213>
13. Bouckaert, S., Naudts, D., Moerman, I., & Demeester, P. (2008). Making Ad Hoc Networking a Reality: Problems and Solutions. *J. of Telecommunications and Information Technology*, 1, 3–11. <https://doi.org/10.26636/jtit.2008.1.857>
14. Bruno, R., Conti, M., & Gregori, E. (2005). Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Magazine*, 43(3), 123–131. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2005.1404606>
15. Chlamtac, I., Conti, M., & Liu, J. J.-N. (2003). Mobile Ad Hoc Networking: Imperatives and Challenges. *Ad Hoc Networks*, 1(1), 13–64. [https://doi.org/10.1016/S1570-8705\(03\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S1570-8705(03)00013-1)
16. Conti, M., & Giordano, S. (2014). Mobile Ad Hoc Networking: Milestones, Challenges, and New Research Directions. *IEEE Communications Magazine*, 52(1), 85–96. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6710069>
17. De La Oliva, A., Banchs, A., & Serrano, P. (2012). Throughput and Energy-Aware Routing for 802.11 based Mesh Networks. *Computer Communications*, 35(12), 1433–1446. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.04.004>
18. Devan, P. A. M., Ibrahim, R., Omar, M., Bingi, K., & Abdulrab, H. (2023). A Novel Hybrid Harris Hawk-Arithmetic Optimization Algorithm for Industrial Wireless Mesh Networks. *Sensors*, 23(13), 6224. <https://doi.org/10.3390/s23136224>
19. Fadlullah, Z. Md., Kawamoto, Y., Nishiyama, H., Kato, N., Egashira, N., Yano, K., & Kumagai, T. (2019). Multi-Hop Wireless Transmission in Multi-Band WLAN Systems: Proposal and Future Perspective. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 108–113. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700148>
20. Fitzgerald, E., Pióro, M., & Tomaszewski, A. (2019). Network Lifetime Maximization in Wireless Mesh Networks for Machine-to-Machine Communication. *Ad Hoc Networks*, 95, 101987. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101987>
21. Fitzgerald, E., Pióro, M., & Tomaszewski, A. (2020). Energy Versus Throughput Optimisation for Machine-to-Machine Communication. *Sensors*, 20(15), 4122. <https://doi.org/10.3390/s20154122>
22. Garroppo, R. G., Gendron, B., Nencioni, G., & Tavanti, L. (2017). Energy Efficiency and Traffic Offloading in Wireless Mesh Networks with Delay Bounds. *Int. J. of Communication Systems*, 30(2), e2902. <https://doi.org/10.1002/dac.2902>
23. Ghalib, S., Kasem, A., & Ali, A. (2020). Analytical Study of Wireless Ad-Hoc Networks: Types, Characteristics, Differences, Applications, Protocols. In *Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies* (Vol. 1206, pp. 22–40). https://doi.org/10.1007/978-981-15-4451-4_3
24. Gokalgandhi, B., Tavares, M., Samardzija, D., Seskar, I., & Gacanin, H. (2022). Reliable Low-Latency Wi-Fi Mesh Networks. *IEEE Internet of Things J.*, 9(6), 4533–4553. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3105981>
25. Goldsmith, A. J., & Wicker, S. B. (2002). Design Challenges for Energy-Constrained Ad Hoc Wireless Networks. *IEEE Wireless Communications*, 9(4), 8–27. <https://doi.org/10.1109/MWC.2002.1028874>
26. Khatib, M., & Alsadi, S. (Eds.). (2020). *Wireless Mesh Networks—Security, Architectures and Protocols. IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74910>
27. Lei, L., & Wang, X. (2023). Reducing Delay of a Wireless Mesh Network with Scalable Per-Node Throughput. In *IEEE 34th Annual Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PIMRC56721.2023.10293945>



28. Lim Sim, M., Ming Chin, C., & Min Tan, C. (2007). Mobile Ad-Hoc Networks: In D. Taniar (Ed.), *Encyclopedia of Mobile Computing and Commerce* (pp. 424–428). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-59904-002-8.ch070>
29. Luo, Y., Luo, Y., Wang, J., & Wang, J. (2021). Technical Introduction of Wireless Mesh Network. *Int. J. of Advanced Network, Monitoring and Controls*, 6(2), 73–78. <https://doi.org/10.21307/ijanmc-2021-019>
30. Mekhmoukh Taleb, S., Meraihi, Y., Gabis, A. B., Mirjalili, S., Zaguia, A., & Ramdane-Cherif, A. (2022). Solving the Mesh Router Nodes Placement in Wireless Mesh Networks Using Coyote Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 10, 52744–52759. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166866>
31. Naït-Abdesselam, F., Chen, K. C., Elmallah, E. S., & Frank, M. (2011). Architectures and Protocols for Wireless Mesh, Ad Hoc, and Sensor Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 11(3), 303–305. <https://doi.org/10.1002/wcm.1126>
32. Ouni, A., Rivano, H., Valois, F., & Rosenberg, C. (2015). Energy and Throughput Optimization of Wireless Mesh Networks with Continuous Power Control. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(2), 1131–1142. <https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2364815>
33. Pandey, M. A. (2015). Link Stability in Mobile Ad Hoc Network. *Int. J. of Emerging Trends in Science and Technology*, 2(04).
34. Pathak, P. H., & Dutta, R. (2011). A Survey of Network Design Problems and Joint Design Approaches in Wireless Mesh Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(3), 396–428. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.060710.00062>
35. Pourdehghan, S., & Derakhshanfard, N. (2025). Malicious Node Aware Wireless Multi Hop Networks: A Systematic Review of the Literature and Recommendations for Future Research. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2506.05742>
36. Qiu, T., Chen, N., Li, K., Qiao, D., & Fu, Z. (2017). Heterogeneous Ad Hoc Networks: Architectures, Advances and Challenges. *Ad Hoc Networks*, 55, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.11.001>
37. Qu, Y., Ng, B., & Seah, W. (2016). A Survey of Routing and Channel Assignment in Multi-Channel Multi-Radio WMNs. *J. of Network and Computer Applications*, 65, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.017>
38. Ragab, A. R. S. A. (2020). A New Classification for Ad-Hoc Network. *Int. J. of Interactive Mobile Technologies*, 14(14), 214. <https://doi.org/10.3991/ijim.v14i14.14871>
39. Raniwala, A. & Tzi-cker Chiueh. (2005). Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-based Multi-Channel Wireless Mesh Network. In *IEEE 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies.*, 3, 2223–2234. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2005.1498497>
40. Raza, N., Umar Aftab, M., Qasim Akbar, M., Ashraf, O., & Irfan, M. (2016). Mobile Ad-Hoc Networks Applications and Its Challenges. *Communications and Network*, 08(03), 131–136. <https://doi.org/10.4236/cn.2016.83013>
41. Rejina Parvin, J. (2020). An Overview of Wireless Mesh Networks. In M. Khatib & S. Alsadi (Eds.), *Wireless Mesh Networks—Security, Architectures and Protocols*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83414>
42. Prabha, C., & Kumar, S., Khanna R. (2014). Wireless Multi-Hop Ad-Hoc Networks: A Review. *IOSR J. of Computer Engineering*, 16(2), 54–62. <https://doi.org/10.9790/0661-16265462>
43. Santhuja, P., Srinivasan, S., Sabapathy Ranganathan, C., Latha, N., & Kumar C, S. (2023). Route Stability with Node Reliability-based Auto Reconfiguration in Wireless Mesh Network. In *2023 2nd Int. Conf. on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon)*, 1271–1275. <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon57526.2023.10391314>
44. Singh, M. (2019). Wireless Mesh Networks Architecture. In M. Singh, *Node-to-Node Approaching in Wireless Mesh Connectivity* (pp. 11–14). https://doi.org/10.1007/978-981-13-0674-7_2
45. Vázquez-Rodas, A., & De La Cruz Llopis, L. J. (2013). Topology Control for Wireless Mesh Networks based on Centrality Metrics. In *10th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks*, 25–32. <https://doi.org/10.1145/2507248.2507257>
46. Wang, Z., Liu, H., & Zhou, X. (2025). Research on Optimizing Wireless Mesh Networks for High Throughput, Large Scale Data Streaming Applications. *Applied and Comput. Engineering*, 134(1), 138–142. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.22209>
47. Zhao, Y., Wang, C., & Deng, H. (2025). Hop-by-Hop Multipath Overlay Routing for Optimizing Network Resource Allocation in WANs. *Electronics*, 14(13), 2542. <https://doi.org/10.3390/electronics14132542>

