

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ БЕЗДРОТОВІ MESH-МЕРЕЖІ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено принципи побудови та вдосконалення алгоритмів маршрутизації в бездротових сіткових мережах (Wireless Mesh Networks, WMN), які розглядаються як перспективна основа телекомунікаційних систем нового покоління. Проаналізовано сучасні підходи до організації маршрутизації, зокрема адаптацію алгоритмів, розроблених для мобільних мереж ad hoc (MANET), до особливостей архітектури WMN. Показано, що традиційні протоколи, орієнтовані на мінімізацію кількості переходів, не забезпечують оптимального використання ресурсів, тому необхідним є впровадження мультифакторних метрик, які враховують якість каналу, пропускну здатність, затримки, рівень завад та енергоефективність.

Обґрунтовано доцільність використання міжрівневого (cross-layer) підходу до побудови інтелектуальних алгоритмів маршрутизації, які забезпечують адаптацію мережі до динамічних змін топології та навантаження. Запропоновано концепцію децентралізованого оновлення топології з використанням комбінованих механізмів передачі службових даних, що дозволяє підвищити точність маршрутизації та зменшити накладні витрати.

Розглянута узагальнена модель маршрутизації для інтелектуальних WMN передбачає використання адаптивних, розподілених ієрархічних алгоритмів, інтеграцію елементів штучного інтелекту для самоорганізації, прогнозування стану каналів і вибору оптимальних маршрутів. Отримані результати підтверджують, що підвищення ефективності маршрутизації в сіткових мережах можливе шляхом комплексного урахування міжрівневих параметрів, оптимізації ресурсів і впровадження інтелектуальних механізмів керування трафіком.

Ключові слова: бездротова сіткова мережа, маршрутизація, інтелектуальний алгоритм, міжрівнева взаємодія, якість обслуговування (QoS), оптимізація ресурсів.

Abstract

The paper explores the principles of designing and improving routing algorithms in Wireless Mesh Networks (WMN), which are considered a promising foundation for next-generation telecommunication systems. Modern approaches to routing organization are analyzed, including the adaptation of algorithms developed for mobile ad hoc networks (MANET) to the architectural features of WMN. It is shown that traditional protocols focused on minimizing the number of hops do not ensure optimal resource utilization; therefore, the implementation of multifactor metrics that consider channel quality, throughput, delay, interference level, and energy efficiency is necessary.

The feasibility of using a cross-layer approach to develop intelligent routing algorithms is substantiated. Such algorithms enable network adaptation to dynamic changes in topology and traffic load. A concept of decentralized topology updating is proposed, utilizing combined mechanisms for control data exchange, which improves routing accuracy and reduces overhead.

The proposed generalized routing model for intelligent WMNs involves the use of adaptive, distributed, and hierarchical algorithms, as well as the integration of artificial intelligence elements for self-organization, channel state prediction, and optimal route selection. The obtained results confirm that improving routing efficiency in mesh networks is achievable through comprehensive consideration of cross-layer parameters, resource optimization, and the implementation of intelligent traffic management mechanisms.

Keywords: wireless mesh network, routing, intelligent algorithm, cross-layer interaction, quality of service (QoS), resource optimization.

Вступ

Сучасний розвиток телекомунікаційних систем і зростання попиту на високошвидкісний бездротовий доступ до мережевих ресурсів зумовили інтенсивний розвиток багатоперехідних бездротових мереж (Wireless Mesh Networks, WMN). Такі мережі розглядаються як перспективна технологічна основа для побудови інфраструктури наступного покоління, здатної забезпечити гнучкість, надійність і масштабованість передавання даних у різноманітних середовищах [1].

На відміну від традиційних однохопових систем, WMN функціонують за принципом багатохопової маршрутизації, що дозволяє підвищити ефективність використання спектра, розширити зону покриття та підвищити стійкість до відмов окремих вузлів. Однак реалізація цих переваг супроводжується низкою складних технічних викликів, серед яких ключове місце посідає побудова оптимальних алгоритмів маршрутизації [2].

Алгоритми маршрутизації в бездротових сіткових мережах є центральним елементом їхньої архітектури, адже саме вони визначають шляхи передавання даних і забезпечують баланс між пропускну здатністю, затримкою, енергоспоживанням та надійністю. Процес маршрутизації у WMN ускладнюється динамічною зміною топології, впливом завад, взаємними перешкодами між вузлами, а також необхідністю урахування параметрів фізичного та канального рівнів [3].

Класичні алгоритми, розроблені для мобільних мереж типу ad hoc (MANET), не завжди ефективні у WMN через відмінності у структурі та призначенні мереж. Тому актуальним завданням є розроблення інтелектуальних алгоритмів маршрутизації, здатних адаптуватися до змінного середовища, забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування (QoS) та оптимальний розподіл ресурсів між вузлами мережі [4].

Подальше підвищення ефективності маршрутизації у WMN пов'язане з упровадженням міжрівневої взаємодії (cross-layer interaction) та використанням методів штучного інтелекту для самоорганізації, прогнозування стану каналів і вибору оптимальних маршрутів. Це дозволяє створювати інтелектуальні бездротові Mesh-мережі, здатні до самонавчання, адаптації та оптимізації роботи в реальному часі [5].

Таким чином, дослідження принципів побудови та вдосконалення інтелектуальних алгоритмів маршрутизації у бездротових сіткових мережах є важливим напрямом розвитку телекомунікаційних систем нового покоління, що сприятиме підвищенню ефективності використання мережевих ресурсів і якості надання послуг зв'язку.

Результати дослідження

У ході дослідження встановлено, що бездротові сіткові мережі (Wireless Mesh Networks, WMN) поєднують властивості ad hoc-мереж і стаціонарних інфраструктурних систем, що зумовлює специфічні вимоги до організації маршрутизації на мережевому рівні. Проведений аналіз показав, що існуючі алгоритми маршрутизації, запозичені з MANET, не можуть бути безпосередньо застосовані в WMN через відмінності у структурі, мобільності вузлів і вимогах до енергоспоживання [6].

Розглянуті сучасні протоколи маршрутизації, такі як AODV, DSR, TBRPF, продемонстрували різні підходи до формування маршрутів і підтримання топології. У стандарті IEEE 802.11s протокол AODV використовується як базовий механізм маршрутизації, що підтверджує його ефективність у багатоперехідних бездротових системах. Проте виявлено, що традиційні метрики маршрутизації, орієнтовані на мінімізацію кількості переходів (hop count), не забезпечують оптимального використання ресурсів у WMN [1, 2].

Обґрунтовано, що для досягнення високої ефективності функціонування сіткових мереж необхідно застосовувати мультифакторні метрики, які враховують якість з'єднання, пропускну здатність, затримки, рівень завад та енергоефективність. Такий підхід дозволяє мінімізувати перевантаження окремих вузлів, забезпечити балансування трафіку та підвищити загальну стабільність мережі [3].

Дослідження підтвердило доцільність використання міжрівневого (cross-layer) підходу до проєктування алгоритмів маршрутизації, який передбачає взаємодію між мережевим, канальним і фізичним рівнями. Це дозволяє реалізувати адаптивні рішення, що враховують зміни топології, навантаження та параметри каналу в реальному часі.

Розроблена концепція виявлення та оновлення топології на основі децентралізованих меха-

нізмів забезпечує точне відображення структури мережі без суттєвого збільшення службового трафіку. Оптимізація процесів обміну топологічною інформацією досягається за рахунок комбінованого використання широкомовних і унікастних передач, а також залучення географічних координат для підвищення точності маршрутизації [4].

Результати оцінювання ефективності алгоритмів маршрутизації вказують, що головними критеріями оптимізації для WMN є QoS, пропускна здатність, стабільність маршрутів і справедливність розподілу ресурсів між потоками трафіку. Побудовано класифікацію параметрів ефективності за рівнями впливу — від одиничного потоку до всієї мережі, що дозволило систематизувати підходи до комплексного оцінювання продуктивності [5].

Удосконалена модель маршрутизації для інтелектуальних WMN передбачає: використання розподілених адаптивних алгоритмів замість централізованих рішень; впровадження гнучких топологічних механізмів, що реагують на зміни структури мережі; застосування ієрархічної маршрутизації для підвищення масштабованості системи; урахування інформації про якість каналу та завантаження вузлів під час вибору маршруту; інтеграцію елементів інтелектуального керування трафіком, які забезпечують самооптимізацію мережі [6].

Загалом, результати дослідження підтверджують, що ефективність маршрутизації в інтелектуальних бездротових mesh-мережах визначається узгодженістю топологічного аналізу, гнучким управлінням ресурсами та здатністю алгоритмів до адаптації в динамічному середовищі. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення інтелектуальних, навчальних алгоритмів маршрутизації, які поєднують методи штучного інтелекту, машинного навчання та багаторівневої оптимізації для підвищення автономності та продуктивності мереж нового покоління.

Висновки

У результаті проведеного аналізу теоретичних засад маршрутизації в бездротових сіткових мережах (Wireless Mesh Networks, WMN) можна сформулювати такі основні висновки:

Адаптація алгоритмів MANET. Алгоритми маршрутизації, розроблені для мобільних мереж типу ad hoc (MANET), можуть бути частково адаптовані для WMN завдяки схожості топологічних принципів і способів обміну даними. Проте через відмінності у мобільності вузлів, енергоспоживанні та функціональному призначенні елементів мережі пряме використання таких алгоритмів є обмеженим і потребує відповідної модифікації.

Фактори, що ускладнюють маршрутизацію. Ефективність функціонування WMN знижується через динамічність топології, взаємні перешкоди між вузлами, необхідність балансування навантаження, динаміку трафіку та міжрівневу залежність параметрів мережевої моделі. Це вимагає створення адаптивних алгоритмів маршрутизації, здатних гнучко реагувати на змінні умови середовища.

Ключові принципи побудови ефективних алгоритмів. Оптимізація процесів маршрутизації повинна ґрунтуватися на децентралізованому управлінні маршрутами, актуалізації топологічної інформації в реальному часі та використанні динамічних метрик, які враховують якість каналів, затримки, рівень завад і завантаження вузлів. При цьому важливо забезпечити масштабованість системи та мінімізацію службових накладних витрат.

Виявлення топології. Для підтримання коректності маршрутів доцільним є застосування адаптивних методів виявлення топології, що поєднують точність оновлення з мінімізацією службового трафіку. Найбільш ефективним підходом є децентралізований обмін топологічними даними між сусідніми вузлами за допомогою широкомовних або унікастних повідомлень, незалежно від частотного діапазону.

Метрики ефективності. Оцінювання якості маршрутизації повинно проводитися за комплексом параметрів, серед яких показники QoS, пропускна здатність, затримка, енергоефективність і справедливність розподілу ресурсів. Жоден окремий критерій не може відобразити повну ефективність, тому необхідне багатфакторне оцінювання.

Еволюція метрик. Традиційна метрика hop-count не відображає реальних характеристик якості з'єднання. Використання багаторівневих метрик, що враховують параметри фізичного, канального та мережевого рівнів, забезпечує підвищену стабільність і адаптивність мережі.

Перспективи розвитку. Подальше вдосконалення алгоритмів маршрутизації у WMN перед-

бачає розроблення крос-рівневих моделей взаємодії між MAC-, мережевим і транспортним рівнями, створення розподілених ієрархічних протоколів та впровадження адаптивних метрик, що інтегрують параметри QoS, енергоефективності й стабільності з'єднання.

Узагальнюючи, ефективна маршрутизація в інтелектуальних бездротових сіткових мережах нового покоління має базуватися на поєднанні точного виявлення топології, динамічної адаптації маршрутів і комплексного багатопараметричного аналізу ефективності. Такий підхід забезпечує високу продуктивність, надійність і гнучкість мережі за умов мінімальних службових витрат і підвищеного навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Azzoug, Y., & Boukra, A., (2021). Bio-inspired VANET routing optimization: An overview. *Artificial Intelligence Review*, 54(2), 1005–1062.
2. Kartal, F., & Özveren, U., (2020). A deep learning approach for prediction of syngas lower heating value from CFB gasifier in Aspen plus®. *Energy*, 209, 118457.
3. Lata, A. A., & Kang, M., (2020). A survey on the evolution of opportunistic routing with asynchronous duty-cycled MAC in wireless sensor networks. *Sensors*, 20(15), 4112.
4. Ozonoh, M., Oboirien, B. O., & Daramola, M. O., (2020). Optimization of process variables during torrefaction of coal/biomass/waste tyre blends: Application of artificial neural network & response surface methodology. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105808.
5. Васильківський М. В. Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML [Текст] / М. В. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, М. Будах // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – Вип. 1. – С. 89–100.
6. Васильківський М. В. Коригування параметрів мобільних систем МІМО із використанням штучного інтелекту [Текст] / М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, Н. Грабчак // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2023. – № 51. – С. 139-147.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Грабчак Назарій Віталійович — аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nazarihrabchak@gmail.com

Березюк Олег Федорович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: oleh.ber36@gmail.com

Vasylkivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Hrabchak Nazarii V. — graduate student of group 172-23a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nazarihrabchak@gmail.com

Bereziuk Oleh F. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: oleh.ber36@gmail.com