

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БЕЗДРОВОЮ MESH-МЕРЕЖЕЮ З АДАПТИВНОЮ МАРШРУТИЗАЦІЄЮ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розроблено програмну систему керування бездротовою mesh-мережею з підтримкою динамічного виявлення вузлів, адаптивної маршрутизації та моніторингу стану мережі в реальному часі. Реалізовано модульну архітектуру на базі мікроконтролера TI CC1312 та стеку Wi-SUN з графічним інтерфейсом на PyQt6.

Ключові слова: mesh-мережа, адаптивна маршрутизація, Wi-SUN, IoT, TI CC1312, алгоритм Дейкстри, моніторинг вузлів, PyQt6.

Abstract

The paper presents a software system for managing a wireless mesh network with support for dynamic node discovery, adaptive routing, and real-time network state monitoring. A modular architecture was implemented based on the TI CC1312 microcontroller and Wi-SUN stack with a PyQt6 graphical interface.

Keywords: mesh network, adaptive routing, Wi-SUN, IoT, TI CC1312, Dijkstra algorithm, node monitoring, PyQt6.

Актуальність. Бездротові mesh-мережі набувають широкого застосування в IoT-інфраструктурах, автономних сенсорних мережах та smart-середовищах завдяки децентралізованій архітектурі, самоорганізації та високій відмовостійкості. Кожен вузол одночасно виконує функції кінцевого пристрою та маршрутизатора, що забезпечує багатошляхову передачу даних. Водночас динамічна зміна топології та нестабільність радіоканалів створюють суттєві труднощі для ефективного керування мережею. Аналіз існуючих рішень засвідчив, що відкриті системи (OpenWrt + BATMAN-adv) мають складність конфігурації та відсутній зручний інтерфейс, тоді як комерційні рішення (Ubiquiti UniFi Mesh, Cisco Wireless Mesh) характеризуються закритою архітектурою та обмеженою гнучкістю. Це обумовлює необхідність розробки спеціалізованого програмного інструменту, що поєднає переваги обох підходів.

Мета роботи - підвищення ефективності функціонування бездротових mesh-мереж шляхом розробки програмної системи з адаптивним управлінням динамічною топологією та розширеними можливостями моніторингу стану вузлів і каналів зв'язку.

Архітектура системи побудована за модульним принципом та включає чотири основні компоненти: CoreManager - центральний диспетчер подій, що реалізує глобальний цикл Event Loop та ініціалізує підсистеми; NetworkInterface - модуль низькорівневої взаємодії з бездротовим інтерфейсом із буферизацією пакетів та асинхронною обробкою подій; NodeManager - підсистема обліку вузлів та безперервного збору телеметричних даних (RSSI, затримка, втрати пакетів); TopologyManager - модуль формування та динамічного оновлення графової моделі мережі на основі списку суміжності. Взаємодія між компонентами реалізована через подієво-орієнтовану модель: зміна стану вузла або каналу зв'язку ініціює оновлення відповідних компонентів без необхідності постійного опитування всіх елементів мережі.

Алгоритми маршрутизації та моніторингу. Реалізовано адаптивний алгоритм маршрутизації на основі модифікованого підходу distance-vector. Для обчислення оптимального маршруту застосовується багатокритеріальна метрика вартості, що враховує рівень сигналу RSSI, затримку передачі та кількість транзитних переходів. Математична обробка графа виконується за допомогою модифікованого алгоритму Дейкстри, що дозволяє в реальному часі розраховувати оптимальні таблиці маршрутизації.

Для запобігання зацикленню маршрутів застосовуються: обмеження максимальної кількості переходів, таймери актуальності маршрутів та принцип split horizon. Реалізовано multipath routing —

для кожного вузла формується декілька альтернативних маршрутів, що забезпечує миттєве перемикання при деградації основного каналу без повного перерахунку топології.

Модуль моніторингу реалізує безперервний збір телеметрії з вузлів та аналіз стану радіоефіру. При виявленні стійкої деградації параметрів або перевищення таймауту система автоматично ініціює перебудову маршрутів. Механізм heartbeat-повідомлень контролює доступність вузлів та забезпечує автоматичну реінтеграцію вузла при відновленні зв'язку.

Засоби реалізації. Апаратною платформою вузлів обрано мікроконтролер TI CC1312, що підтримує роботу в Sub-GHz діапазоні (збільшена дальність зв'язку та енергоефективність). Прошивка вузлів реалізована мовою C на базі операційної системи реального часу TI-RTOS, мережевий стек побудований на стандарті Wi-SUN FAN (IEEE 802.15.4g). Для забезпечення безпеки передачі застосовується симетричне шифрування AES-128 GCM із узгодженням сеансових ключів через EC Diffie-Hellman та взаємною автентифікацією вузлів при підключенні. Графічний інтерфейс моніторингу реалізовано мовою Python з використанням фреймворку PyQt6 та бібліотеки pyqtgraph. Інтерфейс включає: панель візуалізації топології мережі у реальному часі з індикацією стану вузлів, графіки моніторингу затримки, втрат пакетів та пропускної здатності, блок конфігурації параметрів вузлів (потужність передавача, інтервал опитування) та журнал подій системи.

Результати тестування. Система пройшла комплексне тестування, що охоплювало: автоматизовану валідацію протоколів передачі даних за допомогою фреймворку Catch2 (1003 успішних assertions у 3 тест-кейсах); перевірку безпеки багатопотокової архітектури інструментом Thread Sanitizer (підтверджено відсутність data race); аналіз радіоканалу за допомогою логічного аналізатора та спектрального аналізатора Universal Radio Hacker; стрес-тестування при одночасному опитуванні понад 8 вузлів із значною кількістю ретрансляцій. Результати тестування підтвердили відповідність розробленого програмного забезпечення стандарту IEEE 802.15.4g, стабільність роботи при динамічній зміні топології та коректність алгоритмів адаптивної маршрутизації. Система успішно перерозподіляла черги запитів без втрати цілісності даних в умовах екстремального навантаження.

Висновки. Розроблена програмна система поєднує гнучкість open-source рішень із зручністю комерційних систем. Порівняльний аналіз із існуючими аналогами показав, що розроблена система є єдиним рішенням, що одночасно забезпечує: централізоване керування та візуалізацію топології в реальному часі, гнучку зміну алгоритмів маршрутизації, модульну архітектуру та незалежність від апаратної платформи. Практичне значення роботи полягає у створенні програмного рішення, придатного для дослідження, моделювання та керування бездротовими mesh-мережами в умовах змінної топології та нестабільних каналів зв'язку, зокрема в IoT-інфраструктурах та промислових системах моніторингу на базі Wi-SUN.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Golovin Y., Pastukh B. Efficiency analysis of routing protocols in wireless mesh networks // Information Technology and Security. 2022. Vol. 10, № 1. P. 39–49. DOI: 10.20535/2411-1031.2022.10.1.261121.
2. Alameri I. та ін. Systematic review on AODV routing mechanics // PeerJ Computer Science. 2022. Vol. 8. Article e1040. DOI: 10.7717/peerj-cs.1040.
3. Texas Instruments. CC1312 SimpleLink™ Wireless MCU Technical Reference Manual. Dallas : Texas Instruments, 2023. 2345 p.
4. Wi-SUN Alliance. Wi-SUN FAN Overview and Technical Profile. San Ramon : Wi-SUN Alliance, 2024. 56 p.
5. Wei W. та ін. Improved link-quality AODV in mesh networks // Energy and Buildings. 2024. Vol. 315. Article 114295. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114295.

Майданиук Володимир Павлович – к.т.н., доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: maidaniuk2000@gmail.com.

Барасій Артем Миколайович – студент групи 2ПІ-22б, Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: 10br1artem@gmail.com.

Volodymyr Maidaniuk - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Artem Barasii - student of group 2PI-22b, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.