

ІНТЕГРАЦІЯ FANET З ПРОМИСЛОВИМИ ІОТ-МЕРЕЖАМИ

Старший викладач Галкін П.В., студент Скребцов В.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
проектування та експлуатації електронних апаратів

e-mail: galkinletter@ukr.net, vadym.skrebtsov@nure.ua

Abstract. The object of the research is the process of integrating flying ad-hoc sensor networks with industrial IoT networks for monitoring tasks and the creation of a digital twin of the production environment. The subject of the research includes data collection, routing, and processing methods in hybrid FANET–IoT networks, as well as their impact on digital twin accuracy and quality of service indicators. The aim of the work is to improve the efficiency of industrial environment monitoring by developing and investigating models for integrating FANET with industrial IoT networks, as well as reducing the digital twin error through the selection and optimization of routing and data collection algorithms.

Ключові слова: FANET, IoT, IIoT, , бездротова сенсорна мережа, маршрутизація, кластеризація, цифровий двійник

Вступ. Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкриває нові можливості для побудови інтелектуальних систем моніторингу у промисловості. Традиційні стаціонарні сенсорні мережі, що широко застосовуються на підприємствах, мають низку обмежень, пов'язаних із необхідністю фізичної інфраструктури, складністю обслуговування та недостатнім охопленням важкодоступних або небезпечних зон. У свою чергу, використання групи кооперативних БПЛА як мобільних сенсорних вузлів формує нову парадигму збору даних — літаючі сенсорні мережі (FANET), здатні забезпечити гнучкість, адаптивність та високу просторову роздільну здатність моніторингу.

FANET – це основна мережева парадигма для підключення кількох БПЛА в повітрі. Протокол маршрутизації для FANET [1] повинен бути стійким до збільшення динаміки вузлів, щоб він міг досягати хорошої продуктивності навіть у високошвидкісних середовищах.

У технічній документації Nordic Semiconductor на трансивер nRF24L01+ [2] наведено основні параметри радіомодуля, зокрема режими енергоспоживання, швидкості передавання та особливості роботи у діапазоні 2,4 ГГц, що дозволяє обґрунтувати вибір апаратної платформи сенсорного вузла та коректно оцінювати енергетичні витрати при моделюванні бездротового каналу.

У статті [3] досліджено швидкісні характеристики промислових мереж RS-485 і PROFIBUS, що дозволяє враховувати обмеження каналу зв'язку при розробці протоколу передачі в енергообмежених умовах. Публікація [4] присвячена методам обробки інформаційних потоків у системах ППО, що виявляє паралелі з багатопоточним збором даних у

сенсорних мережах з кластерною структурою. У роботі [5] розглянуто програмну реалізацію систем керування в авіоніці, де важливе місце займають питання обмеженого ресурсу енергії, аналогічно задачам у WSN.

Дослідження [6] висвітлює підходи до побудови вбудованих систем управління авіоніки, що формує базу для розробки енергоефективних вузлів сенсорних мереж. У роботі наведено моделі систем управління, які можуть бути адаптовані для задач керування інформаційними потоками та маршрутизації у розподілених бездротових мережах з обмеженим енергоресурсом.

У публікації запропоновано багатокритеріальний підхід до вибору проектних рішень, що може бути використаний для кластерного вибору головного вузла або маршруту передавання з урахуванням залишкової енергії, якості каналу та навантаження. Робота присвячена математичним методам відновлення даних, які можуть застосовуватись у бездротових мережах при передачі інформації в умовах завад з метою зменшення кількості повторних передач і відповідного зниження енергоспоживання.

В останні роки, зі зростанням популярності безпілотних літальних апаратів (БПЛА), системи на базі БПЛА стали популярними як у військових, так і в цивільних застосуваннях.

Інтеграція FANET з промисловими IoT-мережами створює можливість формування єдиного інформаційного середовища підприємства, де дані від мобільних і стаціонарних сенсорів об'єднуються для підтримки процесів автоматизації, діагностики та прогнозного обслуговування.

Основна частина. Наукова новизна полягає у формуванні узагальненої архітектури інтеграції FANET з промисловими IoT-мережами, що забезпечує зниження затримок, підвищення надійності передачі даних та узгодження інформаційних потоків для цифрових двійників. Запропонований метод маршрутизації враховує мобільність UAV, обмежені енергетичні ресурси та вимоги до QoS у промислових застосуваннях.

Практичне значення результатів роботи визначається можливістю застосування отриманих рішень для побудови гнучких систем моніторингу на промислових підприємствах, у сфері енергетики, логістики, охорони критичної інфраструктури та автоматизації виробничих процесів. Реалізація інтеграції FANET та IIoT дає змогу значно розширити функціональні можливості цифрових двійників та підвищити рівень безпеки та ефективності роботи підприємства.

Модель даних FANET-вузла

Модель даних FANET-вузла (рис. 1.1) являє собою багаторівневу структуру, побудовану таким чином, щоб відобразити усі аспекти функціонування мобільного сенсорного елемента у динамічній промисловій мережі. Вона повинна поєднувати кількісні вимірювання з

бортових датчиків, інформацію про положення та рух безпілотного апарата, характеристики стану мережевих інтерфейсів, семантичний опис отриманих даних та енергетичні параметри, що визначають можливість подальшого використання вузла у складі FANET. Такий підхід дозволяє забезпечити повноцінну взаємодію між мобільними сенсорними платформами та промисловими IoT-системами, зокрема цифровими двійниками виробничих процесів.

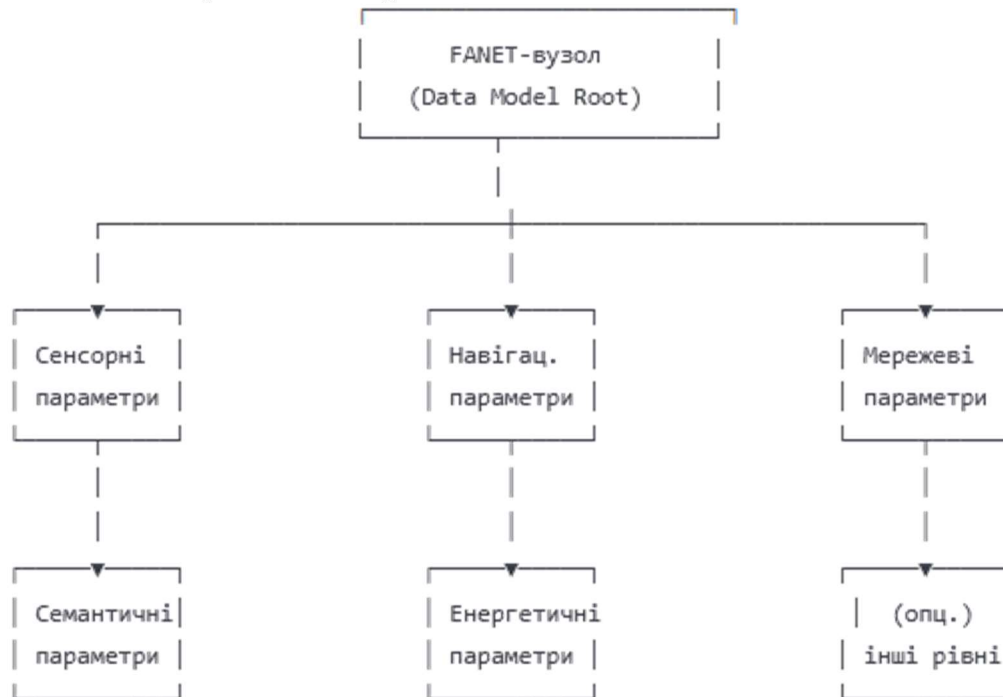


Рисунок 1.1 – Модель даних FANET-вузла

Модифікований алгоритм енергоефективної маршрутизації для FANET

Енергоефективність є одним із ключових критеріїв побудови маршрутів у FANET. Традиційні алгоритми маршрутизації, такі як AODV, DSR чи GPSR, не враховують критичний вплив запасу енергії UAV та динамічні зміни топології, що може призводити до створення маршрутів через вузли, які мають низький заряд акумулятора або швидко змінюють позицію. Це знижує загальну живучість FANET та збільшує кількість переналаштувань маршрутів. Тому виникає потреба у модифікованому алгоритмі, здатному одночасно враховувати енергетичні параметри, якість каналу та прогноз мобільності вузлів.

Запропонований алгоритм ґрунтується на поєднанні ідей позиційної маршрутизації та енергоадаптивної метрики:

$$LEP = w_1 \cdot \frac{E}{E_{\max}} + w_2 \cdot \frac{Q}{Q_{\max}} + w_3 \cdot (1 - M_r) \quad (1.1)$$

У рамках алгоритму використовується адаптивна метрика LEP (Link Energy Probability) (1.1), що оцінює ймовірність збереження працездатності каналу впродовж часу маршруту. Метрика включає в себе нормалізоване

значення енергії вузла, швидкість його переміщення відносно попереднього хопу та якість сигналу. Якщо хоча б один із параметрів виходить за межі порогу, лінк вважається нестабільним і виключається з набору кандидатів. Таким чином, FANET уникає використання «енергетично слабких» вузлів.

Висновки. У цілому результати роботи підтверджують, що інтеграція літаючих сенсорних мереж з промисловими IoT-інфраструктурами є перспективним напрямом розвитку систем моніторингу та цифрових двійників. Запропоновані моделі та алгоритми можуть бути використані при проєктуванні інтелектуальних виробничих систем, а також слугувати основою для подальших наукових досліджень у галузі FANET, IoT та кіберфізичних систем

Список використаних джерел.

1. W. J. Lau, J. M. -Y. Lim, C. Y. Chong, H. N. Shen and T. W. Min Ooi, "AQR-FANET: An Anticipatory Q-Learning-based Routing Protocol for FANETs," 2023 IEEE 16th Malaysia International Conference on Communication (MICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 6-11, doi: 10.1109/MICC59384.2023.10419483.
2. Datasheet: nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver // Nordic Semiconductor. Rev. 1.0. 2022. [Electronic resource]. Available: <https://www.nordicsemi.com>
3. Galkin P. V., Gavrilenko V. V., Monko A. I. Issledovanie dalnosti i skorosti peredachi dannyih po vitoy pare v promyshlennyyih setyah RS-485 i PROFIBUS [Investigation of the range and speed of data transmission over twisted pair in industrial networks RS-485 and PROFIBUS] // Problemyi telekommunikatsiy [Problems of telecommunications]. – 2016. – №. 2. – С. 94-110.
4. Галкін П. В., Коваленко С. П., Леушин С. Г. Метод автоматизованої обробки інформації на пунктах управління ппо св при паралельних і послідовних потоках інформації //-Збірник наук. - Товариство з обмеженою відповідальністю "Науковий світ", 2007. - Т. 4. - №. 4. - С. 71-72.
5. Галкін П. В. Розробка прогнаного забезпечення систем управління авіоніки / П. В. Галкін // Радіoeлектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 24 Міжнар. молодіж. форуму, 7-9 кв. 2020р. - Харків: ХНУРЕ, 2020. - Т. 2. - С. 132-133.
6. Галкін П. В. Вбудовані системи управління авіоніки / П. В. Галкін // Радіoeлектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 23 Міжнар. молодіж. форуму, 16–18 квітня 2019р. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – Т. 2. – С. 78–79.