

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.3.019.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.3-11)

В.В. Смірнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна
e-mail: swckntu@gmail.com

Мобільна mesh-мережа для управління роєм об'єктів

Наведено опис архітектури адаптивної бездротової локальної mesh-мережі, яка розроблена для управління робототехнічними пристроями, коптерами та роями об'єктів. Бездротова mesh-мережа є адаптивною, що самоорганізується і здатна працювати автономно. Подано протокол конфігурування вузла мережі та протокол керування мережею. Процедура реконфігурації мережі та передача даних розподіляє службовий трафік та трафік даних різними каналами. Наведено результати вимірювань параметрів мережі в різних режимах роботи. Показано, що вузли мережі адаптивно змінюють потужність трансмітера з метою мінімізації рівня випромінювання сигналу та з метою економного використання автономного джерела живлення.

mesh-мережа, рій, архітектура, протокол, контролер, вузол мережі, кластер

Постановка проблеми. Існують бездротові локальні мережі різної архітектури, які застосовуються для автоматизації та керування різними технічними об'єктами. Архітектурні та технічні реалізації малих бездротових мереж не завжди є оптимальними. Наприклад, при зміні топології мережі окремі об'єкти (вузли) мережі можуть втратити зв'язок з іншими об'єктами мережі, а при відмові мережевого сервера мережа перестає працювати.

Таким чином, мережа повинна адаптуватися до зміни своєї топології, шляхом відновлення втрачених та встановлення нових зв'язків та маршрутів обміну даними між об'єктами мережі.

У бездротовій мережі кількість об'єктів може досягати кількох десятків. Всі об'єкти бездротової мережі взаємодіють із сервером та між собою за допомогою трансіверів різних типів. При цьому потужність передавачів трансіверів може досягати +27 dB. Для об'єктів мережі з автономним живленням велике значення має потужність споживання енергії трансівером. Чим більша потужність передавача трансівера, тим швидше розряджаються елементи живлення об'єкта. Тому потужність передавача має бути мінімально необхідною та адаптивно змінюватися при зміні топології мережі.

Аналіз досліджень та публікацій. Для бездротових мереж існує низка стандартів на мережеві протоколи. На базі цих стандартів розробляються архітектури та топології сетей.

Технологія мереж Wi-Fi описана стандартом IEEE 802.11 [1, 2]. Мережа стандарту IEEE 802.11 займає діапазон частот 2,4 та 5 ГГц. Перевагою мережі є велика пропускна здатність. Недоліком є невелика кількість одночасних підключень. Час встановлення з'єднання відносно великий (до 10 секунд). Недоліком, який перешкоджає створенню бездротових автономних мереж, також є великий струм, що споживається від джерела живлення.

Технологія ZigBee описана стандартом IEEE 802.15.4 для бездротових мереж з маршрутизацією [3-6]. Відповідно до стандарту, в мережі знаходяться два типи вузлів:

Full-Function Device (FFD) та Reduced-Function Device (RFD). Вузол FFD реалізує повний набір мережевих функцій, а вузол RFD є полегшеним варіантом. Обидва типи вузлів можуть бути координаторами підмереж. Технологія ZigBee дозволяє будувати різні топології, наприклад топологію «зірка» або peer-to-peer (P2P). Якщо топологія мережі динамічно змінюється, мережа неспроможна стійко працювати. Це є обмеженням для побудови мереж із змінною топологією.

Документ ITU-T G.9959 описує мережу Z-Wave, яка дозволяє створювати осередки, що самоорганізуються, і є хорошим рішенням для управління об'єктами. Однак для створення контролерів мережі необхідно бути членом спілки Z-Wave Alliance та мати сертифікат [7-8].

Технологія WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) описується стандартом IEEE 802.16. Стандарт визначає технологію множинного доступу з розподілом часу (TDMA) [9-10]. Технологія вимагає використання базових станцій, абонентських станцій та іншого мережевого обладнання. Це перешкоджає створенню недорогої бездротової мережі для керування роєм об'єктів.

Набула поширення технологія LoRaWAN, яка має як переваги, так і недоліки [11-13]. До переваг можна віднести такі параметри, як дальність передачі радіосигналу на відкритій місцевості до 15 км, низьке енергоспоживання та можливість масштабування мережі.

До недоліків можна віднести низьку пропускну здатність (0,3-50 кб/с), затримку передачі даних до кількох десятків секунд та відсутність підтримки mesh-архітектури.

Постановка задачі. Бездротова mesh-мережа повинна забезпечити:

- управління як окремими об'єктами, так і роєм об'єктів, наприклад, коптерами, роботами та іншими механізмами, призначеними для пошуку та виявлення предметів, доставки вантажів, прихованого спостереження та відеозйомки;
- мобільний, захищений від виявлення, прихований зв'язок між об'єктами невеликого рою (взвод, рота) з метою організації ефективного управління та взаємодії невеликих груп в умовах воєнних дій або рятувальних операцій;
- моніторинг та збір інформації з віддалених датчиків у локальних та розподілених приладах і системах;
- мінімальний рівень випромінювання трансмітерів трансіверів, можливість встановлення, налаштування та експлуатації мережі силами некваліфікованого користувача.
- стабільну взаємодію об'єктів мережі за зміни її топології;

Виклад основного матеріалу. Для створення прототипу mesh-мережі були розроблені, виготовлені і впроваджені у навчальний процес ЦНТУ спеціальні апаратно-програмні комплекси «Internet of Things development board» [14]. Кожен комплекс укомплектований трансіверами різної потужності, які дозволяють забезпечити пряму взаємодію вузлів мережі на відстані від 100 м до 5 км. (рис.1).



Рисунок 1 – Апаратно-програмний комплекс «Internet Of Things development board»
Джерело: розроблено автором

На базі створеного прототипу було розроблено програмне забезпечення для тестування трансіверів, проведено випробування трансіверів та проведені необхідні вимірювання.

Було розроблено архітектуру контролера вузла адаптивної бездротової mesh-мережі (рис. 2)

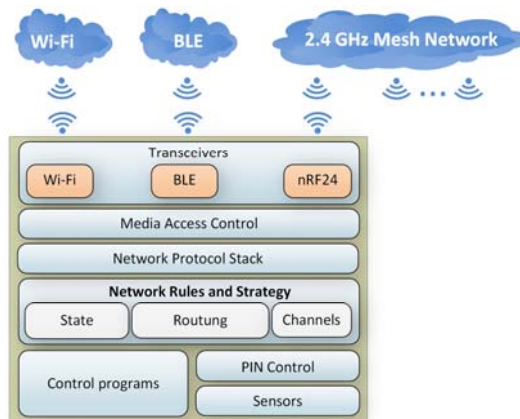


Рисунок 2 – Архітектура контролера вузла mesh-мережі

Джерело: розроблено автором

Через трансівери управління (Wi-Fi, BLE) здійснюється зв'язок вузла мережі з оператором з метою отримання команд та надсилання інформації телеметрії та поточного стану об'єктів мережі.

Через трансівер nRF24 здійснюється обмін даними між вузлами мережі. Інформація про поточний стан мережі, така як топологія мережі, таблиці маршрутизації та ієрархія кластерів об'єктів або роїв оновлюється з періодом 5 сек.

Інтерфейси з трансіверами (Transceivers Interfaces) забезпечують взаємодію трансіверів з блоком Media Access Control, що реалізує стек мережевих протоколів (Network Protocol Stack).

Стек мережних протоколів містить декілька протоколів, кожен з яких реалізує функції управління, конфігурації та обміну даними у мережі.

Блок правил та стратегії поведінки мережі (Network Rules and Strategy) визначає функціональність контролера вузла мережі. До блоку правил та стратегії входять програмні модулі управління маршрутизацією, перемиканням каналів трансіверів, адаптивного зміни конфігурації мережі за зміни її топології.

Взаємодія контролера вузла мережі з об'єктом управління реалізується інтерфейсом Network Object Interface.

Реалізація вузла mesh-мережі представлена на рис. 3.

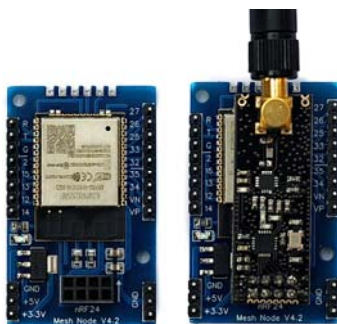


Рисунок 3 – Реалізація вузла mesh-мережі

Джерело: розроблено автором

За результатами вимірювань параметрів вузлів мережі та натурних експериментів на місцевості було розроблено архітектуру адаптивної mesh-мережі (рис. 4), а також інтерфейси та протоколи мережевого обміну командами та даними.

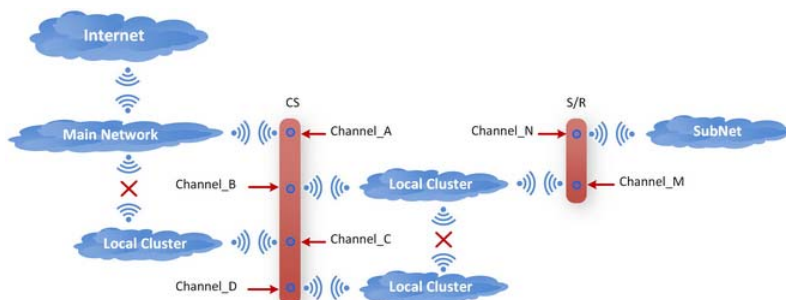


Рисунок 4 – Архітектура адаптивної mesh-мережі

Джерело: розроблено автором

Було встановлено, що застосування малопотужних трансівєрів з радіусом дії від 100 м до 1 км (рис. 5), дозволяє організувати mesh-мережу довільної конфігурації.

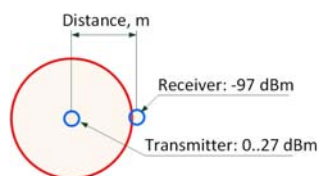


Рисунок 5 – Зона покриття трансівєра

Джерело: розроблено автором.

Наприклад лінійна мережа (ланцюг), в якій кожен вузол (об'єкт рою) взаємодіє тільки з двома сусідніми, має низький рівень випромінювання сигналу, а отже, меншу ймовірність виявлення і можливості прослуховування трафіку і злому протоколу обміну (рис. 6).

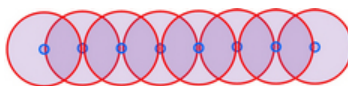


Рисунок 6 – Лінійна мережа (ланцюг)

Джерело: розроблено автором.

Кожен вузол (об'єкт рою) взаємодіє лише з найближчими вузлами і лише їм передає транзитні пакети. Тому для забезпечення скритності вузла мережі потужність трансівєра в кожному конкретному випадку повинна бути адаптивною і мінімально необхідною.

Зрозуміло, що при малій потужності трансівєра зменшується радіус зони покриття мережі (розмір рою), що може бути не завжди прийнятним. У цьому випадку легко змінюються трансівєри або задіюються ретранслятори.

З іншого боку, зменшення радіусу зони покриття мережі дозволяє використовувати кілька каналів зв'язку одночасно, при цьому не впливаючи на інші мережі (рої). Потужність трансівєра встановлюється кожним вузлом за встановленим критерієм кількості повторних передач пакетів.

Такий підхід дозволяє створювати кластери мережевих об'єктів а також дочірні рої, розподілені за територіальною чи функціональною ознакою.

Всі вузли мережі мають кілька зв'язків з іншими об'єктами мережі. В цьому випадку обмін даними між вузлами мережі здійснюється за допомогою прямих зв'язків.

Якщо прямі зв'язки між вузлами мережі не встановлені, здійснюється маршрутизація пакетів від вузла-відправника до вузла-отримувача (рис. 7).

Приймачем та ретранслятором пакетів може бути будь-який вузол мережі. Ретрансляція здійснюється на основі даних таблиць маршрутизації, які має кожен вузол мережі.

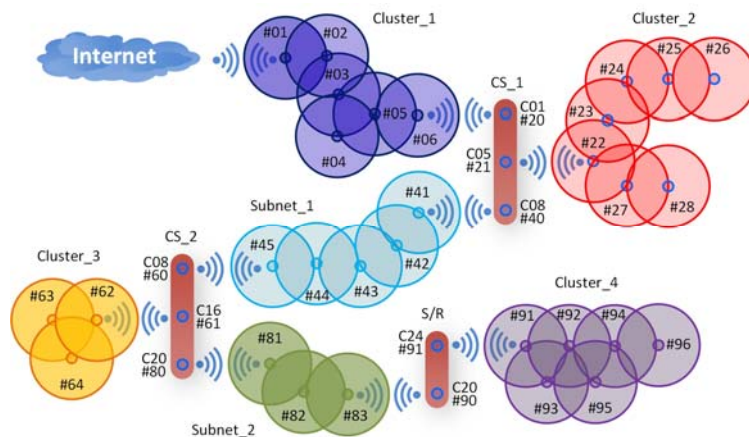


Рисунок 7 – Топологія мережі для проведення тестових випробувань

Джерело: розроблено автором

Безперебійна робота мережі забезпечується програмним забезпеченням на рівні контролера вузла мережі. Усі контролери вузлів мережі за промовчанням рівнозначні, проте їх функції можуть змінюватися внаслідок адаптації до фізичної та логічної топології мережі, яка може динамічно змінюватися.

Налаштування параметрів вузла мережі здійснюється за допомогою AT-команд відповідно до протоколу налаштування та керування вузлом. (рис. 8).

Node Control AT Commands			
3 bytes	1 byte	1 byte	1 byte
AT+	Param_1	Param_2	Param_3

Рисунок 8 – Протокол налаштування та управління вузла

Джерело: розроблено автором

Передача мережевих команд вузлам мережі здійснюється за допомогою протоколу управління (рис. 9).

Net Control Commands			
1 byte	1 byte	1 byte	1 ... 29 bytes
Prefix	Command	Postfix	Params

Рисунок 9 – Протокол мережевого управління вузлами

Джерело: розроблено автором

Для контролю параметрів мережі було створено спеціальну програму «Wireless Net Monitor». Структура mesh-мережі, представлена на рис.7, у програмі представлена в такий спосіб:



Рисунок 10 – Відображення структури mesh-мережі

Джерело: розроблено автором

Період запуску режиму реконфігурації mesh-мережі встановлюється користувачем та залежить від динаміки зміни топології мережі.

Якщо топологія мережі статична, або змінюється повільно, період запуску режиму реконфігурації може бути збільшено,

Якщо вузли мережі переміщуються у просторі, тим самим змінюючи топологію мережі, період запуску режиму реконфігурації зменшується.

У процесі реконфігурації мережі потужність трансмітерів трансіверів вузлів мережі може змінюватися від максимального значення до мінімально необхідного (рис. 11).

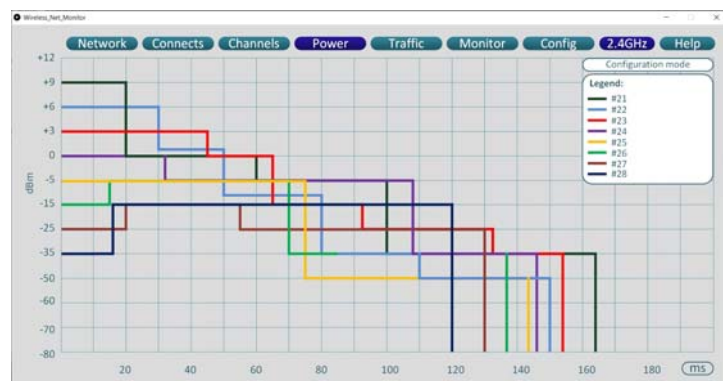


Рисунок 11 – Зміна потужності трансіверів у процесі реконфігурації

Джерело: розроблено автором

Для зменшення кількості колізій в мережі при інтенсивному трафіку, вузли в мережі організуються в кластери або підмережі (рої) за функціональною або територіальною ознакою. Кожен кластер (рій) працює на своєму каналі (рис.12).

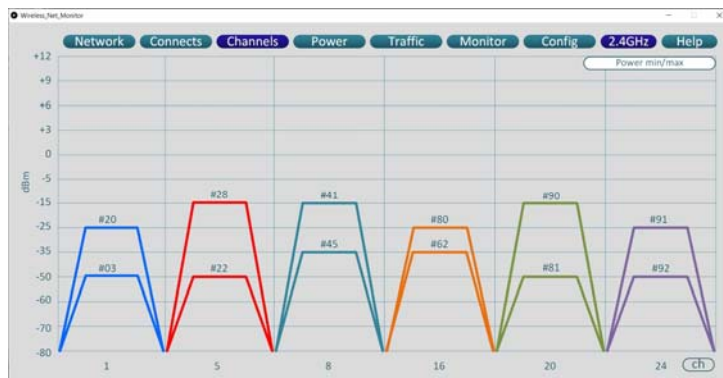


Рисунок 12 – Розподіл каналів за кластерами вузлів мережі

Джерело: розроблено автором.

На рис. 13 представлені результати вимірювань рівнів випромінювання WI-FI трансіверів та трансіверів mesh-мережі при встановленій потужності 0 dB. При тестуванні вузли мережі обмінювалися пакетами даних довжиною 150 байт із періодом 500 мс. Вимірювач встановлений на однаковій дистанції від усіх трансіверів.

З графіку результатів вимірів випливає, що різниця в рівні випромінювання WI-FI трансіверів та трансіверами mesh-мережі в одиницю часу становить понад 25 dB.

Різниця обумовлена тим, що трансівери WI-FI працюють постійно навіть за відсутності інформаційного обміну, а трансівери mesh-мережі працюють лише в режимі обміну інформацією та в режимі конфігурування мережі з певним інтервалом. Після сеансу обміну даними контролер вузла мережі та трансівер переходять у стан сну і прокидається при отриманні мережного пакета.

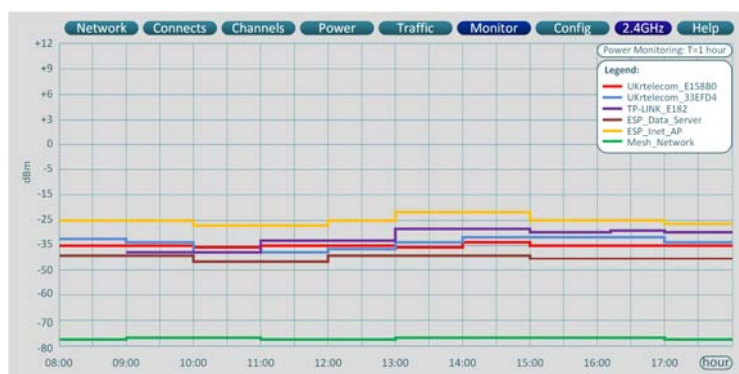


Рисунок 13 – Рівні потужності випромінювання WI-FI трансіверів та вузлів mesh-мережі
Джерело: розроблено автором.

З цього випливає, що технологія WI-FI не відповідає вимогам, які пред'являються для mesh-мережі, що розробляється. Це такі вимоги, як скритність для виявлення та економічність у витрачаннях ємності джерела живлення вузла мережі (об'єкта рою).

Висновки. Таким чином, досягнуті результати повною мірою відповідають розрахунковим, а завершення роботи по створенню mesh-мережі дозволить вирішити поставлені завдання та забезпечити:

- стабільну взаємодію вузлів мережі при зміні топології мережі з адаптивною мінімізацією потужності трансіверів індивідуально для кожного вузла мережі;
- обмін даними між вузлами мережі як безпосередньо між собою, так і через ретранслятори та шлюзи без втрат інформаційних пакетів;
- масштабування mesh-мережі із заданою топологією з охопленням площі від 0.04 км² (мінімальна потужність, відсутність ретрансляції пакетів, відсутність перешкод на місцевості) до 65 км² (максимальна потужність, 2 ретранслятори в ланцюжку, є перешкоди на місцевості);
- простоту створення прикладних додатків програмістами та користувачами для вирішення різних завдань для збору інформації та управління як окремими об'єктами, так і роєм об'єктів, а також організації прихованого зв'язку в масштабованій mesh-мережі за допомогою розробленого API;
- можливість встановлення, налаштування та експлуатації mesh-мережі силами користувача.

Список литературы

1. Brian Verenkoff Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology. July 2011. 8 p. URL: https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf (дата звернення: 12.03.2023).
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6. URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> (дата звернення: 12.03.2023).
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата звернення: 12.03.2023).
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2003.06.12. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html (дата звернення: 12.03.2023).
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата звернення: 12.03.2023).
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. Jan. 2020. URL: <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> (дата звернення: 12.03.2023).
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices. Vesternet Ltd. 28.01.2020. URL: <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> (дата звернення: 12.03.2023).
8. Recommendation G.9959. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> (дата звернення: 12.03.2023).
9. WiMAX Forum. URL: <http://wimaxforum.org> (дата звернення: 12.03.2023).
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (дата звернення: 12.03.2023).
11. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January.
12. LoRaWAN Regional Parameters, RU 864-869MHz ISM Band.
13. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, Datasheet, 2015 Semtech Corporation.
14. Смірнов В.В., Смірнова Н.В., Пархоменко Ю.М. Апаратно-програмний комплекс «Internet of Things Development Board». Збірник матеріалів III форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2021. Харків, ХНУРЕ, 2021. 65 с.

Referencis

1. Brian Verenkoff. (July 2011). Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology : website. *lmi.net*. Retrieved from https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf [in English].
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6 (n.d.) : website. *wi-fi.org*. Retrieved from <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> [in English].
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks (2003.06.12). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html [in English].
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee: C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques (Jan. 2020) : website. *libris.kb.se*. Retrieved from <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> [in English].

7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices (28.01.2020). *Vesternet Ltd.* : website. *vesternet.com*. Retrieved from <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> [in English].
8. Recommendation G.9959 (n.d.) : website. *itu.int*. Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> [in English].
9. WiMAX Forum (n.d.) : website. *wimaxforum.org*. Retrieved from <http://wimaxforum.org> [in English].
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. Retrieved from <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> [in English].
11. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January [in English].
12. LoRaWAN Regional Parameters, RU 864-869MHz ISM Band [in English].
13. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, Datasheet, 2015 Semtech Corporation [in English].
14. Smirnov, V.V., Smirnova, N.V. & Parkhomenko, Y.M. (2021). Aparatno-prohramnyy kompleks "Internet of Things Development Board". Zbirnyk materialiv III forumu «Avtomatyzatsiya, elektronika ta robototekhnika. Stratehiyi rozvytku ta innovatsiyni tekhnolohiyi» AERT-2021. Kharkiv, KHNURE [in Ukrainian].

Volodymyr Smirnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Smirnova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

A Mobile Mesh-Network for Control a Swarm of Objects

The purpose of the article is to develop an adaptive wireless mesh-network architecture for managing technological processes, robotic devices and other objects. The article describes the architecture of a wireless mesh-network.

The concept of a wireless mesh-network is described. The mesh-network is self-organizing, adaptive, and to be work autonomously able. The presented wireless mesh node controller architecture is the basis for small control systems for many objects and a swarm of objects. The interaction of network nodes is carried out using several transceivers.

Multiple transceivers allow for the separation of control traffic and data traffic on different channels. The protocol stack is optimized for the functioning of the mesh network. The topology of a mesh network can change dynamically. That is, network nodes can move in space without losing communication with each other. The current state of the network is updated with a period that depends on the rate of change of the network node in the space.

The mesh network configuration strategy and algorithms allow you to effectively build a network topology and establish interaction between network nodes. There can be many objects in the network that can act as a relay. A repeater can be a network node and a special dedicated repeater node. The low cost of network nodes makes it possible to create a low-cost network for performing various functions of object control and data transmission. The network can be used to manage a swarm of objects.

Proprietary software is used to increase the efficiency of forming routing tables taking into account cluster structures in a mesh network. The mesh network can be used to control IoT objects, robotic objects, as well as a variety of objects and control systems for various technological processes.

mesh-network, swarm, architecture, protocol, controller, network node, cluster

Одержано (Received) 27.04.2023

Прорецензовано (Reviewed) 05.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023