

ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ZIGBEE

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Стаття присвячена дослідженню протоколу зв'язку ZigBee та його застосуванням в розумних домівках та промислому автоматизованому управлінні. Визначається, що ZigBee належить до ефективних рішень завдяки низькому рівню споживання енергії, надійності та можливості масштабування. Представлено приклади практичного використання ZigBee для реалізації розумних домівок та оптимізації процесів в промислових установках. Крім того, розглянуто різноманітні топології мережі ZigBee, такі як "дерево", "зірка" та "комірчаста мережа", і проаналізовано їх переваги та недоліки. У роботі також детально обговорюється пропускна здатність та наскрізна затримка на рівні Medium Access Control (MAC) в контексті мережі ZigBee. Висновки дослідження допоможуть впоратися з викликами, пов'язаними з застосуванням ZigBee в різних системах Інтернету речей.

Ключові слова: ZigBee, розумні домівки, промислова автоматизація, енергоефективність, надійність передачі даних, масштабованість, топології мереж ZigBee, дерево-подібна топологія, зіркова топологія, комірчаста топологія, пропускна здатність, наскрізна затримка, системи Інтернету речей, IoT.

Abstract

The article is devoted to the study of the ZigBee communication protocol and its application in smart homes and industrial automated control. It is determined that ZigBee is an effective solution due to its low energy consumption, reliability and scalability. Examples of the practical use of ZigBee for the implementation of smart homes and process optimisation in industrial plants are presented. In addition, various ZigBee network topologies, such as tree, star and mesh, are discussed and their advantages and disadvantages analysed. The paper also discusses in detail the throughput and end-to-end delay at the Medium Access Control (MAC) layer in the context of a ZigBee network. The conclusions of the study will help to cope with the challenges associated with the use of ZigBee in various IoT systems.

Keywords: ZigBee, smart homes, industrial automation, energy efficiency, data reliability, scalability, ZigBee network topologies, tree topology, star topology, mesh topology, throughput, end-to-end latency, Internet of Things systems, IoT.

Вступ

Інтернет речей (IoT) та технологія ZigBee становлять важливий фронт технологічного розвитку, пронизуючи сучасні сфери життя та індустрії. Завдяки непинному розширенню можливостей обчислювальної техніки та зростанню питомої ваги бездротових мереж, ці концепції виявляють великий потенціал у вирішенні сучасних завдань забезпечення зв'язності та ефективного обміну даними між пристроями.

Технологія ZigBee, в свою чергу, виступає ключовим інструментом у реалізації цих ідей. Її специфікації, зосереджені на низькому споживанні енергії, великій масштабованості та надійності, роблять її оптимальним вибором для великої кількості пристроїв, які потребують стабільної та довгострокової роботи у мережі.

В контексті швидкого розвитку Інтернету речей (IoT), технологія ZigBee визначається як ключовий фактор у створенні ефективних та стійких мереж для взаємодії фізичних об'єктів. За останні кілька років ZigBee завоював популярність завдяки своїм унікальним характеристикам, таким як низька споживана потужність, надійність та можливість великої масштабованості. Це відкриває широкі перспективи для застосування ZigBee в різноманітних галузях.

Однією з ключових областей використання ZigBee є розумний дім. Завдяки своїй низькій споживаній

потужності, ZigBee дозволяє створити безперервний обмін даними між різними пристроями у домашньому середовищі. Від автоматизації освітлення до віддаленого керування системами опалення, ZigBee впроваджується як технологічне ядро для створення інтелектуального житла, забезпечуючи комфорт та енергоефективність.

У промисловості та автоматизації процесів ZigBee використовується для створення розподілених систем моніторингу та керування. Забезпечуючи стабільний зв'язок між пристроями, вона дозволяє оптимізувати виробничі процеси, ефективно розподіляти ресурси та зменшувати витрати.

Важливим аспектом використання ZigBee в сучасних застосуваннях IoT є його відкритий стандарт, що сприяє інтеграції та взаємодії різних пристроїв в єдиній мережі. Такий підхід робить ZigBee привабливим для розробників та інженерів, які прагнуть створити універсальні та сумісні рішення для IoT.

ZigBee визначає три види пристроїв :

- Мережевий координатор. У кожній мережі може бути тільки один, знаходиться в корені мережевого дерева.

- FFD (Full Function Devices). Повнофункціональні пристрої, які можуть виконувати функції маршрутизаторів.

- RFD (Reduced Function Devices).

Розглянемо архітектуру стека.

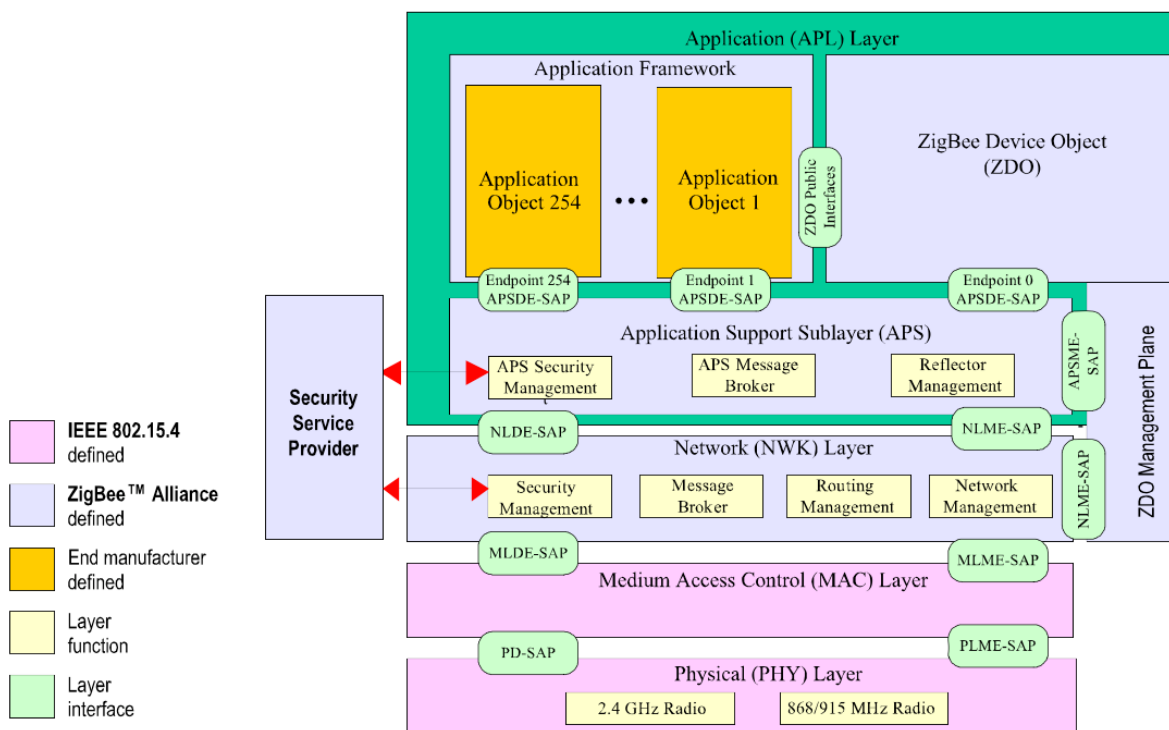


Рис 1. Архітектура стека ZigBee

NWK рівень ZigBee повинен забезпечувати механізми:

- Приєднання до мережі і від'єднання від неї
- Додавання шифрування до фреймів
- Маршрутизації фреймів
- Відкриття і підтримка маршрутів між пристроями
- Забезпечення інформації про найближчих сусідів
- Зберігання інформації про сусідні облаштування.

NWK рівень координатора ZigBee несе відповідальність за створення нових мереж і привласнення адрес пристроїв, які приєднались. Рівень додатків ZigBee складається з підрівня підтримки додатків

(application support sub - layer (APS)), Application Framework (AF), ZDO, і об'єкти додатки, визначені виробником.

Функції підрівня APS включають:

- Підтримку таблиць для зв'язування пристроїв залежно від їх вимог.
- Передачу повідомлень між сусідніми облаштуваннями.

ZDO несе відповідальність за:

- Визначення ролі пристрою усередині мережі (наприклад, ZigBee координатор або крайовий пристрій).
- Ініціація і/або відповідь на запит про зв'язування .
- Встановлення безпечного зв'язку між мережевими пристроями.

ZDO також приєднує нові пристрої до мережі і визначає які функції вони виконують.

Топологія бездротових мереж ZigBee

Протоколи ZigBee підтримують декілька мережних топологій, таких як централізована зірка, кластерне дерево і комірчаста мережа. Кількість ZC, ZR та ZED встановлюється відповідно до дизайну застосування.

Централізована зірка.

Топологія «зірка» використовує багатоточкове з'єднання між вузлами, де в центрі знаходиться центр з'єднання (ZC – ZigBee Coordinator). Для всіх з'єднань існує єдиний канал, і всі повідомлення передаються через ZC. На рисунку 2 показано структуру тестової мережі для топології «зірка», яка має ZC в центрі та ZED (ZigBee End Device) на кінцях. Топологія «зірка» є привабливою через її просту конфігурацію. Однак, у неї є деякі недоліки. Коли ZC виходить з ладу, весь мережевий трафік переривається, оскільки весь трафік проходить через ZC. Інший недолік цієї топології полягає в тому, що ZC може легко стати вузьким місцем, особливо у великій мережі з великою кількістю вузлів.

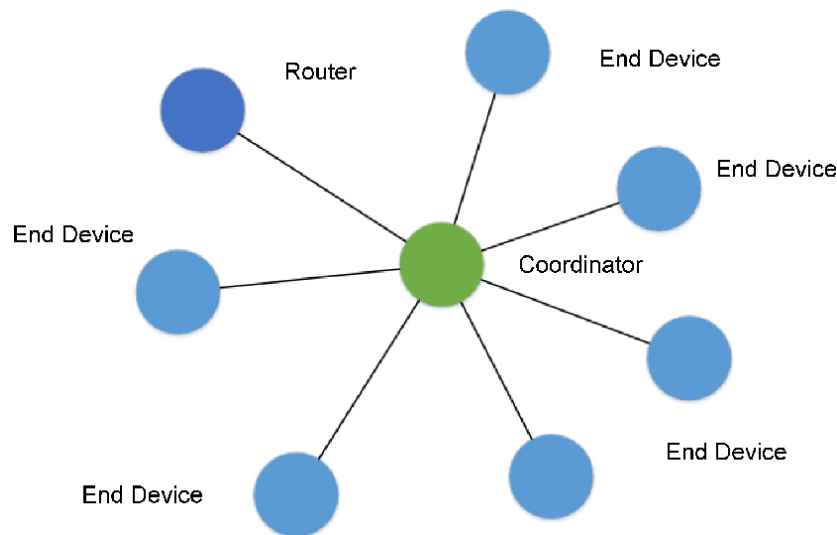


Рис. 2 – Топологія «зірка» для ZigBee

Топологія дерева

У деревоподібній топології пристрої взаємодіють один з одним на ієрархічному рівні. На вершині деревовидної структури знаходиться ZC, який з'єднаний з ZR (ZigBee router) на нижчих рівнях. ZED і ZR знаходяться на найнижчих рівнях. На рисунку 3 показано структуру тестової мережі з деревовидною топологією. Для того, щоб відправити пакети даних до вузлів призначення в деревовидній топології, вузол-джерело повинен передати ці пакети своєму батьківському вузлу. Батьківський вузол знаходиться на один рівень вище вузла-джерела в топології, і пакети безперервно передаються батьківським вузлам, поки не будуть досягнуті вузла-джерела. Недоліком цієї топології є те, що кількість потенційних маршрутів для повідомлення лише один. Якщо ZR виходить з ладу, всі дочірні вузли цього ZR відключаються від решти мережі.

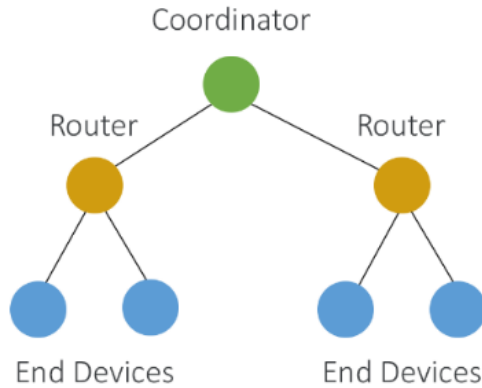


Рис. 3 – Топологія «дерево» для ZigBee
Топологія комірчаста мережа

У цій топології всі пристрої зв'язуються один з одним за допомогою алгоритму AODV (Ad-hic Ondemand Distance Vector Routing). Якщо маршрут, за яким потрібно передати дані, невідомий, пристрій-джерело транслює пакет із запитом маршруту на всю мережу за алгоритмом AODV, щоб дізнатися, де і в якому напрямку знаходиться пристрій-одержувач. Цей пакет містить порядковий номер пакета, метричну інформацію, поля адресів мережі призначення та адреси мережі-джерела. Метрика – кількісне значення, розраховане виробником і різними стандартами за допомогою параметрів, які використовуються при пошуку найбільш вигідного маршруту зв'язку між пристроями. Пристрої, які отримують пакет із запитом маршруту від пристрою-джерела, передають лише інформацію про маршрут пристрою призначення з метрикою. Якщо на пакет із запитом маршруту отримано відповідь від декількох пристроїв, то пакет даних надсилається по шляху з найменшим значенням метрики. На рисунку 4 показано структуру тестової мережі для комірчастої топології.

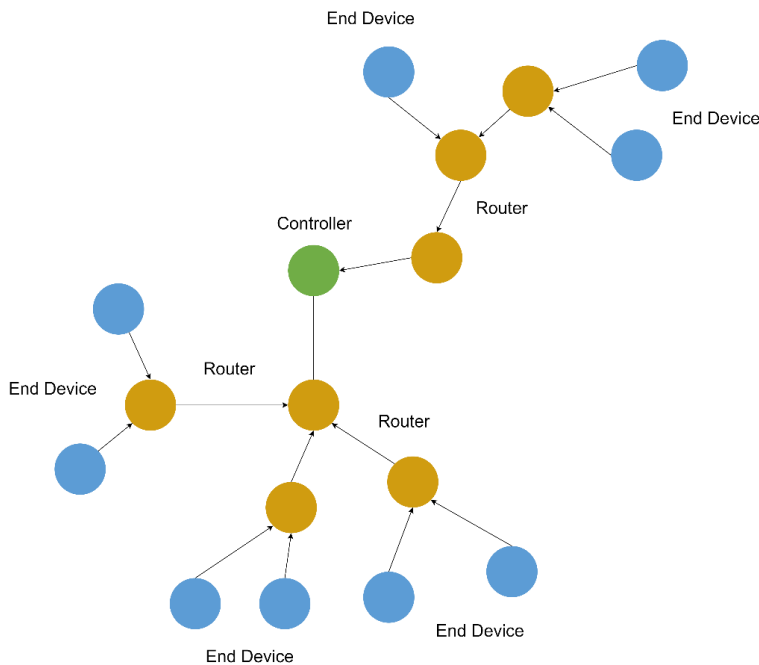


Рис. 4 – Комірчаста топологія для ZigBee

Наскрізна затримка

Наскрізна затримка – це загальний час, необхідний для передачі пакета через мережу від джерела до одержувача. Вона залежить від кількості маршрутизаторів між джерелом і пунктом призначення і є ключовим показником для оцінки продуктивності мережі. Наскрізна затримка може бути виражена рівнянням (1), якщо мережа є оптимальною.

$$D_{end-end} = N \times (d_{proc} + d_{trans} + d_{prop}) \quad (1)$$

де:

N – кількість маршрутизаторів + 1;

d_{proc} – затримка обробки;

d_{trans} – затримка передачі;

d_{prop} – затримка розповсюдження;

Оскільки кожен маршрутизатор має власні значення d_{proc} , d_{trans} , d_{prop} на неоднорідних ланках, формула (1) застосовується до однорідних мережевих структур.

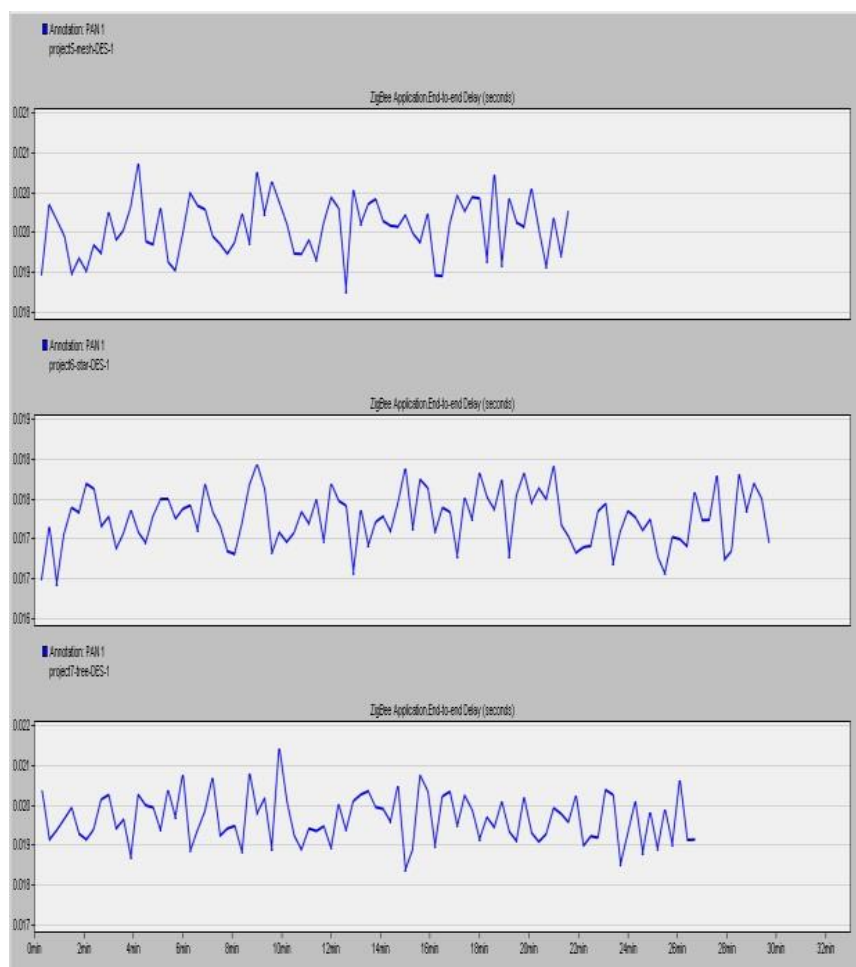


Рис. 5 – Наскрізна затримка для ZigBee Mesh, Star і Tree топологій

Оскільки в сітковій та деревоподібній топології використовується однакова кількість маршрутизаторів топології «комірчаста сітка» та «дерево», то наскрізна затримка є вищою ніж у топології «зірка». Основною причиною цього є відсутність ZR в топології «зірка», і пакети проходять лише один вузол, щоб досягти ZC.

Пропускна здатність

Пропускна здатність MAC-рівня означає загальну кількість бітів, переданих MAC-рівнем ZigBee до вищих рівнів у всіх вузлах. Пропускна здатність кожного вузла розраховується шляхом ділення загальної кількості успішно прийнятих бітів на час виконання. Це можна побачити в рівнянні (2).

$$\text{Пропускна здатність} = \frac{\text{загальна кількість бітів}}{\text{час виконання}} \quad (2)$$

На рисунку 6 показано значення пропускної здатності MAC-рівня для ЗС у топологіях «комірка», «зірка» та «дерево». Згідно з даними рисунку 6, найбільше значення пропускної здатності було отримано в прикладі комірчастої топології, в той час як найменше значення пропускної здатності у топології «зірка». Це в основному пов'язано з тим, що коміркова топологія має високу швидкість передачі даних.



Рис. 6 – Наскрізна швидкість для ZigBee Mesh, Star та Tree топологій

Висновки

У висновку, використання ZigBee в сучасних застосуваннях IoT не лише демонструє технічну передовість, але й відкриває нові можливості для оптимізації та автоматизації різних аспектів нашого життя та роботи. Знання та розвиток у цьому напрямку стають невід'ємною частиною сучасної технологічної епохи. Технології ZigBee широко застосовується для багатьох цілей в промисловості, лікарнях, будинках і т.д., оскільки батареї є основним джерелом живлення для більшості різних мереж. Інтернет речей та технологія ZigBee представляють собою інноваційні рішення, які змінюють парадигму взаємодії та обміну даними. Специфікації ZigBee зосереджені на низькому споживанні енергії, великій масштабованості та надійності, що робить її оптимальним вибором для багатьох пристроїв, особливо тих, які потребують довгострокової роботи у мережі.

Технологія ZigBee може бути реалізована за допомогою різних топологій, включаючи централізовану зірку, кластерне дерево і комірчасту мережу. Кожна з цих топологій має свої переваги та недоліки, і вибір топології залежить від конкретних потреб застосування. з врахуванням потенціалу технології ZigBee у вирішенні сучасних завдань забезпечення зв'язності та обміну даними між пристроями, вибір відповідної мережевої топології є важливим кроком у створенні ефективних та стійких мереж для взаємодії фізичних об'єктів в контексті Інтернету речей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 8 applications of the Internet of things in education. URL: <https://www.analyticssteps.com/blogs/8-applications-iot-education>
2. Смолин О., Олесюк В. Інтернет речей як технологічний феномен ХХІ століття. Інноваційні технології цифрової освіти у вищій та середній школі України та країн Євросоюзу. 2020.
3. Бортник К.Я., Ольшевський О.В., Пащук В.Ю. Інтернет речей та як він змінить наше життя у майбутньому. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, вир-во. 2018. № 30/31. С. 14–18.
4. Журавська І.М. IoT-мережа на базі Bluetooth-модулів для автоматизованого керування споживанням енергоресурсів. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, вир-во. 2018. № 30/31. С. 37–44.
5. Lee, In, Kyung-Sup Kwak, Eui-Nam Huh, and Jae-Young Kim. "An overview of the Internet of Things technology." International Journal of Information Management, vol. 47, 2019, pp. 192-201.
6. Warriach, Ejaz Ahmed, Hafiz Fahad Bashir, and Yasir Faheem. "A survey of Internet of Things (IoT) technologies." Information Systems Frontiers, vol. 21, no. 2, 2019, pp. 421-437.

Юхимчук Марія Сергіївна — д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: umc1987@vntu.edu.ua

Леценко Юлія Ярославівна — аспірант другого року навчання кафедри КСУ, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: ytaraniuk@gmail.com

Мороз Ігор Ігорович — аспірант першого року навчання кафедри КСУ, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: igor3003moroz@gmail.com

Yukhymchuk Maria S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: umc1987@vntu.edu.ua

Leshchenko Yuliia Y. — Department of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ytaraniuk@gmail.com

Moroz Ihor I. — Department of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: igor3003moroz@gmail.com