

Огляд технологій безпроводного зв'язку для моніторингу речей

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Сучасні технології безпроводного зв'язку відіграють важливу роль у моніторингу речей у різних сферах. У дослідженні розглянуто основні стандарти, зокрема Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, NB-IoT та й інші, їхні характеристики, переваги й обмеження. Особливу увагу приділено критеріям вибору технології, таким як дальність зв'язку, енергоефективність, швидкість передачі даних і можливості масштабування.

Ключові слова: IoT, мережа взаємопов'язаних пристроїв, моніторинг речей, IEEE, WPAN, Bluetooth, BR/EDR, BLE, ZigBee, UWB, WLAN, Wi-Fi, OFDMA, MIMO, багатовхідний, багатовихідний, WMAN, WiMAX, WWAN, GSM, 2G, 3G, 4G, 5G, LTE, LPWAN, LoraWAN, NB-IoT

Abstract

Modern wireless communication technologies play an important role in monitoring things in various fields. The study examines the main standards, including Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, NB-IoT, and others, their characteristics, advantages, and limitations. Particular attention is paid to technology selection criteria, such as communication range, energy efficiency, data transfer speed, and scalability.

Keywords: IoT, network of interconnected devices, things monitoring, IEEE, WPAN, Bluetooth, BR/EDR, BLE, ZigBee, UWB, WLAN, Wi-Fi, OFDMA, MIMO, multiple-input, multiple-output, WMAN, WiMAX, WWAN, GSM, 2G, 3G, 4G, 5G, LTE, LPWAN, LoraWAN, NB-IoT

Вступ

Сучасні системи моніторингу об'єктів широко використовують безпроводні технології, що забезпечують ефективний збір, передачу та аналіз даних у реальному часі. Вони знаходять застосування у різних сферах – від логістики та транспорту до екологічного моніторингу, промисловості та «розумних» міст.

Основною перевагою безпроводних мереж є їхня гнучкість, масштабованість та можливість інтеграції з Інтернетом речей (IoT, далі можуть застосовуватись фрази мережа взаємопов'язаних пристроїв, система моніторингу речей). Це дозволяє автоматизувати процеси, зменшити витрати на кабельні комунікації та забезпечити безперебійну роботу систем у важкодоступних місцях.

У цьому дослідженні розглянуто ключові технології безпроводного зв'язку, їхню архітектуру, принципи управління трафіком, а також перспективи розвитку у сфері IoT.

Технології та архітектура мереж безпроводного зв'язку

Архітектура безпроводних мереж включає кілька рівнів:

1. Фізичний рівень – передача радіосигналів, використання різних частотних діапазонів (ISM, LTE, 5G).

2. Канальний рівень – забезпечує мультиплексування, контроль доступу до середовища передачі (MAC-адресація).
3. Мережевий рівень – маршрутизація даних, використання IP-протоколів.
4. Транспортний рівень – управління потоками даних (TCP, UDP).
5. Прикладний рівень – реалізація сервісів моніторингу, управління IoT-пристроями.

У сучасних рішеннях архітектура безпроводних мереж будується на моделі "хмара – шлюз – сенсори", що забезпечує ефективний збір та аналіз даних у розподілених системах.[1]

Різноманітність стандартів безпроводного зв'язку дає можливість вибору оптимального рішення залежно від вимог. Основними з цих умов експлуатації є дальність передачі даних, швидкість роботи мережі та стабільність з'єднання, а також важливо для невеликих пристроїв, та й великих загалом, енергоспоживання. У сучасних системах моніторингу об'єктів використовуються як локальні, так і глобальні бездротові мережі. Також, розділяють технології по стандарту IEEE 802, де IEEE - це Інститут інженерів з електротехніки та електроніки, міжнародна професійна організація, яка фокусується на розвитку технологій у різних галузях, включаючи світлотехніку. З пропонованих вимог, безпроводні мережі (також можна почути безпроводні технології) в основному класифікувати можна за дальністю дії:

- Персональні безпроводні мережі (WPAN – *Wireless Personal Area Network*)

Включають в себе технології, призначені для короткострокового зв'язку між пристроями (смартфони, смарт-годинники, сенсори). Дальність зв'язку — 10 - 100м. Приклади:

Bluetooth — стандарт IEEE 802.15.1, широко розповсюджена, має велику історію оновлень версій стандарту, саму технологію підтримують два типи пристроїв, і з чого специфікація ділить технологію на *Bluetooth Classic (BR/EDR)* – використовується в бездротових гучномовцях, автомобільних інформаційно-розважальних системах та навушниках, та *Bluetooth Low Energy (BLE)* - Bluetooth з низьким споживанням енергії, який з'явився у версії стандарту Bluetooth 4.0. Оскільки в багатьох пристроях IoT використовуються невеликі пристрої та датчики, BLE став найчастіше використовуваним протоколом зв'язку (порівняно з Bluetooth Classic) в мережах взаємопов'язаних пристроїв. Працюють в тому самому частотному діапазоні – 2.4 ГГц, до 7 пристроїв у класичному режимі, у BLE – до кількох сотень. Bluetooth можуть використовувати для передачі файлів, аудіо, зв'язку з периферією - гарнітури, миші, клавіатури, швидкість передачі до 3 Мбіт/с (BLE – 1 Мбіт/с), може досягати 50 метрів лише за оптимальних умов (без перешкод, на відкритих просторах) у приміщенні дальність часто обмежується 10-30 метрами;

ZigBee — стандарт IEEE 802.15.4 спектр частот - 868 МГц (в Європі), 915 МГц (США, Австралія) і 2,4 ГГц, на дуже низькій швидкості передачі даних (від 20 Кбіт/с до 250 Кбіт/с), використовується для підключення великої кількості пристроїв, а саме – максимум до 240, реальна дальність у приміщеннях зазвичай обмежується 10-20 метрами через стіни та інші перешкоди;

UWB — відносно нова технологія, стандарт IEEE 802.15.3a, *Ultra-Wideband*, технологія, використовуючи надшироку смугу частот, діапазон частот (у США - 3,1-10,6 ГГц, в Європі - 6-8 ГГц, щонайменше 500 МГц) дозволяє UWB досягти швидкості передачі до 480 Мбіт/с з відривом до 3 м. На відстанях до 10 м технологія дозволяє досягти лише 110 Мбіт/с, що є одним із недостатків цієї технології - зі збільшенням відстані швидкість передачі даних падає стрімко.[4]

- Локальні безпроводні мережі (WLAN – *Wireless Local Area Network*)

Використовуються у межах будівель, кампусів, офісів для забезпечення швидкісного доступу до Інтернету. В основному, це найкращий варіант для реалізації високошвидкісного доступу до Інтернету та передавання великих обсягів даних.

Приклад — *Wi-Fi* (IEEE 802.11) є стандартом локальної безпроводної мережі, що забезпечує швидкісний доступ до Інтернету та передавання даних між пристроями. Технологія працює в кількох частотних діапазонах (2,4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц), що забезпечує баланс між швидкістю, дальністю та стабільністю з'єднання. Дальність зв'язку — 20-50 метрів у приміщенні, до 300 метрів на відкритих територіях. Швидкість передавання даних залежно від стандарту (до 600 Мбіт/с у Wi-Fi 4, до 9,6 Гбіт/с у Wi-Fi 6). Розвиток стандарту Wi-Fi:

Wi-Fi 4 (802.11n) – підтримка MIMO (багатовхідний, багатовихідний) - функція, представлена в стандарті IEEE 802.11ac Wave 2, яка була розроблена для того, щоб допомогти в ситуаціях, коли кілька

користувачів намагаються отримати доступ до бездротової мережі одночасно, без переривання з'єднання. Таким чином, кілька пристроїв WiFi можуть одночасно приймати кілька потоків даних. Швидкість до 600 Мбіт/с. [6]

Wi-Fi 5 (802.11ac) – робота у діапазоні 5 ГГц, швидкість до 3,5 Гбіт/с.

Wi-Fi 6 (802.11ax) – підвищена ефективність у завантажених мережах, швидкість до 9,6 Гбіт/с, підтримка *OFDMA* (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) – принцип технології, який дозволяє одночасно передавати дані на декілька пристроїв, зменшуючи затримку та збільшуючи швидкість передачі даних. Кожному приладу надається окремий канал для передачі даних, що забезпечує більш ефективне використання доступного простору. [6]

Wi-Fi 6E – додано діапазон 6 ГГц для зменшення перевантаження каналів.

Wi-Fi 7 (майбутній стандарт 802.11be) – очікується швидкість понад 30 Гбіт/с, підтримка MU-MIMO 16x16.

Wi-Fi є стандартом, що поєднує високу швидкість передавання даних, зручність використання та гнучкість у налаштуванні. Однак, він поступається технологіям на основі стільникового зв'язку (5G, LTE) у стабільності з'єднання на великих відстанях і масштабованості.

– Регіональні безпроводні мережі (*WMAN – Wireless Metropolitan Area Network*)

WMAN – це безпроводні мережі, які охоплюють великі міські території, промислові зони та регіони. Вони забезпечують ширококутний доступ до Інтернету без необхідності використання проводного з'єднання. Однією з найпоширеніших технологій у цій категорії є WiMAX (IEEE 802.16).

WiMAX — це технологія бездротового ширококутного зв'язку, що розроблена для надання високошвидкісного доступу до Інтернету на великих відстанях. Вона працює в ліцензованих і неліцензованих частотних діапазонах (2,3 ГГц, 2,5 ГГц, 3,5 ГГц, 5,8 ГГц), що дозволяє гнучко налаштовувати мережу.

Основні характеристики WiMAX

Дальність зв'язку: до 50 км у сільській місцевості, до 10 км у міських умовах.

Швидкість передавання даних: до 70 Мбіт/с у WiMAX 802.16d (фіксований WiMAX), до 1 Гбіт/с у WiMAX 802.16m (розширена версія).

Методи доступу: використання ортогонального частотного мультиплексування (*OFDMA*) для підвищення ефективності передавання даних.

WiMAX поступається LTE (і іншим технологіям глобальних мереж) через нижчу ефективність спектрального використання та меншу підтримку мобільними операторами, однак залишається популярним у нішевих застосуваннях, де необхідне покриття великих територій із меншими витратами на інфраструктуру.

– Глобальні безпроводні мережі (*WWAN – Wireless Wide Area Network*)

Глобальні безпроводні мережі забезпечують зв'язок на великих територіях, охоплюючи міста, країни та навіть континенти. Глобальні безпроводні мережі є ключовими для підключення пристроїв IoT, особливо в умовах, де потрібен зв'язок на дальні відстані. До основних технологій для IoT відносяться мобільні мережі GSM (та його наступники) і низькопотужні широкозонні мережі (LPWAN), такі як LoRaWAN та NB-IoT.

1.) Мобільний зв'язок (стільниковий зв'язок) GSM, 3G, 4G, 5G

GSM (Global System for Mobile Communications) — це технологія мобільного зв'язку, яка забезпечує передачу голосу, SMS та мобільного Інтернету. З часом стандарт еволюціонував до більш швидких мереж:

2G (GSM) – перші технології, що дозволили пристроям передавати дані через мобільні мережі. Використовуються для простих IoT-пристроїв, таких як GPS-трекери та розумні лічильники. Однак *2G* поступово вимикається у багатьох країнах.

3G – забезпечує вищу швидкість передачі даних, але споживає більше енергії, тому не є оптимальним для IoT.

4G (LTE - (Long-Term Evolution) – основна технологія 4G, яка забезпечує швидкість до 100 Мбіт/с, *LTE-M -)* – підтримує енергоефективні IoT-рішення (*LTE-M*), що дозволяють пристроям працювати на батарейках роками. Використовується для транспорту, медицини, розумних міст.

5G – надає високу швидкість і низьку затримку, що відкриває можливості для автономного транспорту, промислової автоматизації та медицини.

2.) LPWAN (Low-Power Wide-Area Network)

LPWAN – це група технологій, що дозволяють передавати невеликі обсяги даних на великі відстані з мінімальним споживанням енергії.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) — відкритий протокол каналного рівня для мереж з високою ємністю та великим радіусом дії і низьким власним використанням енергії, який LoRa Alliance стандартизувала для мереж. Дальність до 45 км за містом, до 5 у місті. Пристрої можуть працювати на батарейці до 10 років. швидкість передачі до 50 кбіт/с, що є дуже низьким для відправки даних, працює в неліцензованих діапазонах частот (наприклад, 868 МГц у Європі, 915 МГц у США).

NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) - стандарт стільникового зв'язку створений для приладів телеметрії з низьким об'ємом передачі даних, як наприклад, системи моніторингу місцезнаходження речей на відстані. Створений консорціумом 3GPP, як розвиток мобільних стільникових мереж перша версія цього стандарту була представлена в 2016 році. Для NB-IoT можуть використовуватися практично всі ті самі діапазони частот, що і для 2G/3G/4G в "низьких" діапазонах. Це 20 діапазон (800МГц), 8 діапазон (900МГц), 3 діапазон (1800МГц). Автономність пристроїв – 10 років, дальність до 2 км, швидкість – до 144 кбіт/с.

Перспективи розвитку безпроводного зв'язку та висновки

Для узагальнення технологій безпроводного зв'язку для Інтернету речей можна зробити порівняльну таблицю (табл.1) (в таблицю не ввійшли WIFI 7 — ще не досяг загальної популярності на 2024-2025рік, так як вийшов тільки у 2024 році, і ще не досяг у використанні в мережі IoT, а також застарілі версії GSM) [5]:

Таблиця 1 — Порівняльна характеристика технологій безпроводного зв'язку для IoT

Технологія	Частотний діапазон	Дальність	Швидкість передачі даних	Особливості
Bluetooth Low Energy (BLE))	2,4 ГГц	До 50 м	До 1 Мбіт/с	Оптимізований для IoT, низьке енергоспоживання
ZigBee	868 МГц, 915 МГц, 2,4 ГГц	До 20 м	До 250 Кбіт/с	Підключення великої кількості пристроїв, енергоефективність
UWB (Ultra-Wideband)	3,1–10,6 ГГц	До 10 м (але в основному до 3-5 м)	До 480 Мбіт/с	Висока точність позиціонування, ідеально підходить для внутрішнього трекінгу на малих відстанях
Wi-Fi 4 (802.11n)	2,4 ГГц, 5 ГГц	20–50 м, до 300 м без перешкод на відкритій місцевості	До 600 Мбіт/с	Підтримка MIMO, підходить для підключення IoT-пристроїв у домашніх мережах
Wi-Fi 5 (802.11ac)	5 ГГц	20–50 м, до 300 м без перешкод на відкритій місцевості	До 3,5 Гбіт/с	Висока пропускна здатність, підтримка MU-MIMO, ефективний для інтенсивного IoT-трафіку
Wi-Fi 6 (802.11ax)	2,4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц	20–50 м, до 300 м без перешкод на відкритій місцевості	До 9,6 Гбіт/с	Покращена ефективність у завантажених мережах, підтримка OFDMA для зменшення затримки IoT-пристроїв
WiMAX (802.16)	2,3–5,8 ГГц	До 50 км в ідеалі, до 10км у міських умовах	До 1 Гбіт/с	Використовується для підключення великих IoT-мереж, забезпечує стабільне покриття
3G	850/900/1800/2100 МГц	До 10 км	До 42 Мбіт/с (HSPA+)	Використовується для підключення IoT-пристроїв у мобільних мережах, енергоефективніший ніж 4G, але повільніший
4G (LTE)	700 МГц – 2,7 ГГц	До 10 км	До 100 Мбіт/с	Основний стандарт мобільного зв'язку, застосовується для мобільних IoT-рішень, але висока енергозатратність

5G	600 МГц – 100 ГГц	До 10 км	До 10 Гбіт/с	Висока швидкість, низька затримка, підтримка масового підключення IoT, але висока енергозатратність
LoRaWAN	868 МГц (Європа), 915 МГц (США)	До 45 км (за містом)	До 50 Кбіт/с	Дуже низьке енергоспоживання, довга автономна робота, популярний у розумному сільському господарстві
NB-IoT	800-1800 МГц	До 2 км	До 144 Кбіт/с	Оптимізований для IoT, забезпечує покращене покриття у приміщеннях, використовується у промислових рішеннях

WPAN охоплює технології для зв'язку на коротких відстанях, такі як Bluetooth та Zigbee. У 2024 році Bluetooth Low Energy (BLE) залишається популярним для підключення носимих пристроїв та сенсорів завдяки низькому енергоспоживанню. Zigbee продовжує використовуватися в розумних будинках для керування освітленням, безпекою та іншими системами.

У 2024 році Wi-Fi 6 (802.11ax) та Wi-Fi 6E стали стандартом, пропонуючи підвищену швидкість передачі даних, знижену затримку та можливість роботи в діапазоні 6 ГГц. Це дозволяє підключати більшу кількість IoT-пристроїв без втрати якості зв'язку, що є критично важливим для розумних будинків та офісів.

WiMAX колись розглядалася як альтернатива 4G, але її популярність значно знизилася з появою LTE та 5G. У 2024 році WiMAX використовується обмежено.

NB-IoT є технологією вузькосмугового зв'язку, спеціально розробленою для IoT. Вона забезпечує енергоефективне підключення пристроїв з низькою швидкістю передачі даних та широким покриттям. У 2024 році NB-IoT продовжує домінувати на ринку LPWAN (Low Power Wide Area Network), особливо в Китаї, де спостерігається значне зростання підключень.

Останнє дослідження Omdia показало, що в ландшафті підключень IoT глобальної мережі низької потужності (LPWAN) переважно домінують NB-IoT і LoRa, на які разом припадало 87% від загальної кількості підключень у 2023 році. Це домінування продовжуватиметься, за прогнозами, ці дві технології підтримуватимуть 86% усіх підключень LPWAN до 2030 року.[2][3]

Існують сотні програмного забезпечення, апаратного забезпечення та технологій підключення, які актуальні для проектів типу IoT. Безпроводні технології відіграють ключову роль у сучасних системах моніторингу речей, забезпечуючи ефективну передачу даних на різних відстанях та умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технології Інтернету Речей [Електронний ресурс] / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 271 с
2. NB-IoT і LoRa домінують на ринку LPWAN [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.iot-now.com/2024/06/20/145050-nb-iot-and-lora-dominate-lpwan-market>
3. Трансформація LPWAN у LPLAN, майбутнє LPWAN в IoT [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.rcrwireless.com/2024/12/04/reader-forum/lpwan-things-industries-2025>
4. Про UWB та Zigbee. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Difference-between-UWB-and-Zigbee.html>
5. Блог. Огляд протоколів IoT і як вибрати найкращий протокол IoT. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.dusuniot.com/uk/blog/best-wireless-protocol-for-your-iot-project>
6. Про OFDMA, MIMO [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://onlink.com.ua/kliuchovi-osoblyvosti-wi-fi6/?srsltid=AfmBOoo-ZITcFNjXftx7-V_dPOv-BxIjJh90-PEVA-qHi0sm44TPFfDp

Бондаренко Дмитро Андрійович – студент групи 2KI-216, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dimoon.bond@gmail.com

Науковий керівник: Захарченко Сергій Михайлович, кандидат технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: zakharchenko.sergii@vntu.edu.ua

Bondarenko Dmytro Andriyovych – student of group 2KI-21b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dimoon.bond@gmail.com.

Supervisor: Zakharchenko Serhiy Mykhailovych, Candidate of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zakharchenko.sergii@vntu.edu.ua