

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО"**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Акустичних та мультимедійних електронних систем

(повна назва кафедри)

"До захисту допущено"

Завідувач кафедри

С.А. Найда

(ініціали, прізвище)

"07" червня 2021 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра**

зі спеціальності

171 Електроніка

(код і назва)

на тему:

Безпроводові технології з низьким енергоспоживанням для систем Інтернету речей

Виконав

студент IV курсу, групи ДВ-72

(шифр групи)

Ярошенко Роман Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

проф. каф. АМЕС, д.т.н., проф. Савченко Ю. Г

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

Консультант

(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рецензент

доц. каф. ЗТФ, к.ф.-м.н., доц.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

Ярошенко
(підпис)

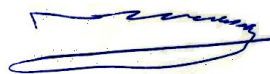
Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут” імені Ігоря Сікорського

Факультет	електроніки
Кафедра	Акустичних та мультимедійних електронних систем
Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)
Спеціальність	171 Електроніка <u>“Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей”</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



— Найда С.А.

(ініціали, прізвище)

" 07" 06 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Ярошенку Роману Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Безпроводові технології з низьким енергоспоживанням для систем Інтернету речей

керівник роботи д. т. н. професор Савченко Юлій Григорович

затверджені наказом по університету від «24» травня 2021 р. №1316-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 05 червня 2021р.

3. Вихідні дані до роботи Безпроводові технологій з низьким енергоспоживанням для систем Інтернету речей. систему з наднизьким енергоспоживанням WuR

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити). Основні складові IoT. Технології побудови IoT . Існуючі технології та рішення, що забезпечують мінімальне споживання пристроїв

(LoRaWAN, NB – IoT, ZigBee і т. і.). MAC протоколи з циклічним режимом роботи. Технологія WuR.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1 презентація 13 слайдів.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

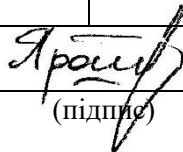
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 12.04.2021р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Написання першого розділу	15.05.2021	виконано
2	Написання другого розділу	22.05.2021	виконано
3	Написання третього розділу	29.05.2021	виконано
4	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	1.06.2021	виконано
5	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	5.06.2021	виконано


Студент


(підпис)

Р. О. Ярошенко

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Ю. Г. Савченко

(ініціали, прізвище)

УДК 004.71

РЕФЕРАТ

Ярошенко Р. О. «Безпроводові технології з низьким енергоспоживанням для систем Інтернету речей»: дипломна робота бакалавра: 171 Електроніка. - КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2021. - 73 с.

Дипломна робота: 73 с., 21 рис., 1 табл., 1 дод., 52 джерел.

Ключові слова інтернет речей, низьке енергоспоживання, циклічний режим роботи, LRWAN, LoRa, LoRaWAN, SSM, CSS, NB-IoT, ZigBee, MAC, mMTC, 3GPP, ZigBee, MAC, WuR, WuRx, WuTx.

Об'єктом дослідження є технології з низьким енергоспоживанням та технологія, що дозволяє збільшити енергоефективність систем.

Метою роботи є аналіз систем Інтернету речей з низьким енергоспоживанням, а саме LoRa, NB-IoT, ZigBee, та аналіз методу зменшення енергоспоживання даних систем, що базується на технології Wake-Up Radio.

Методом дослідження є теоретичне дослідження відомих систем Інтернет речей з низьким енергоспоживанням, покращення енергоспоживання завдяки технології Wake-Up Radio.

Результатом виконання дипломної роботи проаналізовано особливості низького енергоспоживання декількох відомих технологій Інтернету речей, проаналізовано технологію зменшення енергоспоживання Wake-Up Radio.

Галузь застосування: телекомунікації, Інтернет речей.

ABSTRACT

Yaroshenko R. O. "Wireless technologies with low power consumption for Internet of Things systems": bachelor's thesis: 171 Electronics. - KPI them. Igor Sikorsky, Kyiv, 2021. - 73 p.

Bachelor Thesis: 73 pages, 21 figures, 1 tables, 1 appendix, 52 sources.

Keywords – internet of things, low power consumption, cyclic mode, Irwan, LoRa, LoRaWAN, SSM, CSS, NB-IoT, ZigBee, MAC, mMTC, 3GPP, ZigBee, MAC, WuR, WuRx, WuTx

The object of study is low-power technologies and technologies that increase the energy efficiency of the system.

The purpose of the work is an analytical system of the Internet with low power consumption, namely LoRa, NB-IoT, ZigBee, and analysis of the method of reducing the data system based on Wake-Up Radio technologies

The research method is a theoretical study of known systems of Internet of Things with low energy consumption, improvement of energy consumption using Wake-Up Radio technology.

As a result of the thesis work, the features of low power consumption of several well-known Internet technologies are analyzed, the technology of reducing power consumption of Wake-Up Radio is analyzed.

Field of application: telecommunications, Internet of Things

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	10
1 ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ. ПОНЯТТЯ. ПРИЗНАЧЕННЯ. СКЛАДОВІ	11
1.1 Основні поняття та вимоги до Інтернету речей.....	11
1.2 Призначення та сфери використання Інтернету речей	13
1.3 Архітектура Інтернету речей	14
1.4 Основні напрямки комунікаційних технологій Інтернету речей.....	16
1.4.1 Технологія 5G.....	17
1.4.2 Технологія Low-Power Wide Area Networking	17
Висновки до розділу	21
2 ІСНУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РІШЕННЯ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ МІНІМАЛЬНЕ СПОЖИВАННЯ ПРИСТРОЇВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	22
2.1 Технологія LoRa	22
2.1.1 Архітектура LoRaWAN	23
2.1.2 Принцип прийому інформації.....	26
2.2 Технологія Narrow Band Internet of Things	28
2.2.1 Особливості радіосигналу NB-IoT	28
2.2.2 Механізми енергозбереження PSM і eDRX	29
2.3 Технологія ZigBee	32
2.3.1 Типи пристроїв ZigBee	35
2.4 Порівняльна таблиця наведених технологій	37
Висновки до розділу	41
3. ОСОБЛИВІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ WAKE-UP RADIO.....	42

3.1 MAC протоколи з циклічним режимом роботи	42
3.2 Технологія пробудження системи Інтернету речей	43
3.3 Радіомодуль для пробудження. Особливості роботи	44
3.4 Визначення характеристик і вимог	45
3.5 Архітектура WuRs	49
3.6 Ключові застосування	53
3.7 Конструкція та специфікація AS3933	59
Висновки до розділу	62
ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	65
Додаток А	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

AS	— Application Server (сервер застосунків)
ASK	— Амплітудна маніпуляція
CSS	— Chirp spread spectrum (лінійної частотна модуляція)
IIoT	— Industrial internet of things (Індустріальний Інтернет речей)
IoT	— Internet of Things (Інтернет речей)
LoRa	— Long Range
LP-WAN	— Low-Power Wide Area Networking
MAC	— Medium access control (Середній рівень контролю)
M2M	— Machine-to-Machine
MME	— Mobility Management Entity (вузол керування мобільністю)
mMTC	— Масштабні комунікації машинного типу
NB-IoT	— Narrow Band Internet of Things (Вузькосмуговий Інтернет речей)
sMTC	— Критичні комунікації машинного типу
PTW	— Paging Time Window (Пейджингове часове вікно)
PKI	— Public Key Infrastructure (Інфраструктура відкритого ключа)
PHY	— Physical layer (Фізичний рівень)
SGW	— Serving Gateway (шлюз обслуговування);

SRB	— Signaling Radio Bearer
SSM	— Spread spectrum modulation (модуляція розширення спектра)
UID	— Unique Identifiers (Унікальні ідентифікатори)
URLLC	— Ultra-Reliable Low Latency Communication (ультранадійний зв'язок із низькою затримкою)
WBAN	— Wireless Body Area Networks (Бездротова мережа для вимірювання характеристик тіла)
WSN	— Wireless Sensor Network
WuC	— Wake-up Call
WuR	— Wake-up Radio (Радіомодуль для пробудження, вторинний малопотужний модуль)
WuRx	— Приймач сигналу пробудження
WuS	— Сигнал пробудження, повідомлення надіслано від WuTx
WuTx	— Передавач сигналу пробудження
ZigBee	— бездротовий стандарт передачі даних

ВСТУП

Інтернет речей з кожним днем впроваджується у повсякденне життя. Кожний «розумний» пристрій має власний набір технічних характеристик яких мають притримуватись жорстких вимог стосовно енергоспоживання, продовження терміну роботи обладнання та швидкості передачі даних. На даний час існують додаткові технології, котрі в разі зменшують споживання енергії. Це окремий додатковий радіомодуль, що пробуджує основні кінцеві пристрої, й цим зменшують основні затрати електроенергії.

Актуальність роботи полягає в необхідності технічного рішення задля зменшення енергоспоживання технологій Інтернету речей.

Об'єктом дослідження є технології Інтернету речей з низьким енергоспоживанням та технологія, що дозволяє збільшити енергоефективність систем.

Предмет дослідження: Технічні рішення покращення енергоспоживання існуючих систем.

Метою роботи є аналіз систем Інтернету речей з низьким енергоспоживанням, а саме LoRa, NB-IoT, ZigBee, та аналіз методу зменшення енергоспоживання даних систем, що базується на технології Wake-Up Radio.

Методом дослідження є теоретичне дослідження відомих систем Інтернет речей з низьким енергоспоживанням, покращення енергоспоживання завдяки технології Wake-Up Radio.

Новизна роботи полягає у пошуку технічного рішення задля зменшення енергоспоживання технологій Інтернету речей.

Практична цінність полягає у наданні нових технічних рішень, що забезпечують низьке енергоспоживання із можливістю постійного «прослуховуванню» каналу зв'язку.

1 ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ. ПОНЯТТЯ. ПРИЗНАЧЕННЯ. СКЛАДОВІ

1.1 Основні поняття та вимоги до Інтернету речей

Інтернет речей (англ. “Internet of Things”, скорочено – IoT) – система взаємопов'язаних між собою фізичних пристроїв, які мають вбудовані датчики, мікрочипи, спеціальне програмне забезпечення, унікальні ідентифікатори (Unique Identifiers, UID) і здатність передавати чи обмінюватися даними між фізичним світом і комп'ютерними системами вперше було сформульовано в кінці XX-го століття, у 1999 році.

Це концепція комунікації об'єктів (“речей”), які використовують технології для взаємодії між собою та з навколишнім середовищем. Також ця концепція передбачає виконання пристроями певних дій без втручання людини. Таким чином, всі пристрої в будинках, в автомобілях, на користувачеві виконують обробку інформації, її аналіз та обмін між собою та, залежно від результатів, приймають рішення і виконують певні дії [3].

Вимоги до систем Інтернету речей:

- Низька вартість,
- Низька потужність,
- Тривалий час автономної роботи,
- Велика кількість з'єднань,
- Різні вимоги до бітрейту,
- Далекобійність,
- Низька обробна потужність,
- Низька ємність,
- Малі за розміром пристрої,
- Проста архітектура мережі та протоколи

Існують безліч систем та підсистем інтернет речей, які пов'язані між собою та потребують різного ступеня безпеки. Інтернет речей вимагає

багаторівневий підхід до забезпечення безпеки, який буде постійно змінюватися в міру виникнення нових проблем. Інфраструктура відкритого ключа (Public Key Infrastructure, PKI) – одна з технологій безпеки, заснована на стандартах і перевірена сьогодні на пристроях, забезпечує безпеку підключених до мережі пристроїв.

Пропонуючи кожній «речі» унікальну ідентифікацію, PKI повинен стати основою будь-якої стратегії безпеки Інтернету речей. Завдяки унікальній ідентифікації пристрою речі можуть автентифікуватись, тобто під час підключення до мережі створюється безпечний та зашифрований зв'язок між іншими пристроями, службами і користувачами. Оскільки PKI – це встановлена технологія, вона впроваджена в екосистему Інтернету речей і легко інтегрується з іншими компонентами ваших рішень безпеки в міру їх впровадження.

Ідентифікація пристроїв є основною вимогою безпеки Інтернету речей:

- Конфіденційність

У міру підключення більша кількість даних генеруються, збираються і спільно використовуються. Ці дані можуть включати особисту, конфіденційну та фінансову інформацію, яка повинна зберігатися в захищеній і безпечній формі - часто відповідно до державних нормативних вимог. Ідентифікація пристроїв забезпечує шифрування і захист повідомлень та збереження переданих даних.

- Безпека

Безпека користувача або користувачів надзвичайно важлива. Це може бути в промисловому середовищі, де шкідлива атака на один датчик може завдати шкоди співробітникам.

- Цілісність

Це стосується як самих пристроїв, так і даних, що передаються в екосистемі IoT. Цілісність пристрою починається з доведення того, що це так. Завдяки унікальній ідентифікації пристрою гарантується, що код програмного забезпечення пристрою та прошивка є законними – скорочення контрафактної продукції і захист бренду компанії. Цілісність даних часто ігнорується [11].

1.2 Призначення та сфери використання Інтернету речей

Інтернет речей існує в багатьох сферах нашого життя. наведено декілька прикладів, де застосовують інтернет речей нижче.

1. Розумний будинок

Можливостей IoT-пристроїв в будинку доволі багато. Наприклад, розумні термостати, кондиціонери, колонки, годівниці для тварин та інші повсякденні пристрої, які виконують звичайні домашні функції. Це одна з найпопулярніших та перспективних сфер використання інтернету речей.

2. Інтернет речей у сфері охорони здоров'я

В переліку сфер застосування технологій IoT сфера охорони здоров'я займає одну з найважливіших ланок. Інтернет речей впливає безпосередньо на життя людей та показує важливість медицини, як сфери діяльності в сучасному суспільстві.

Саме завдяки Інтернету речей лікарі можуть допомагати людям через інтернет. Інтернет речей дозволяє знайти підхід до кожного пацієнта окремо, проаналізувати стан його здоров'я та прорахувати індивідуальний метод лікування. Розробка інтернет-застосунків на цей час все ще має деякі труднощі, але Інтернет речей у цій сфері розвивається дуже швидко.

3. Розумні автомобілі

Авто – найкращий варіант використання інтернету речей на практиці. Безпілотні машини готові замінити звичайні авто. І найголовніше – такі

автомобілі ретельно прораховують маршрут та забезпечують пасажирів комфортом і безпекою.

На даний час існують машини зі штучним інтелектом, які автоматично під'єднані до інтернету. Також до прикладів використання Інтернету речей в автопромисловості відносять і віддалене керування дверми або температурою в гаражі.

4. Розумне місто

До IoT-технологій міста відносять розумне паркування, карти шуму, розумне освітлення та дороги. Хоча зараз ця сукупність пристроїв перебуває на стадії планування та розробки, але мають доволі далекоглядні перспективи. Завдяки IoT-технологій збільшення безпеки на міських дорогах, кращий контроль руху міського транспорту і забруднення великих індустріальних населених пунктів [4].

1.3 Архітектура Інтернету речей

Варто зазначити, що не існує єдиної узгодженої архітектури IoT. Вона різниться за складністю та кількістю архітектурних шарів залежно від конкретного бізнес-завдання.

Наприклад, довідкова модель, представлена в 2014 році компаніями Cisco, IBM та Intel на Всесвітньому форумі IoT 2014, має цілих сім рівнів. Згідно з офіційним прес-релізом організатора форуму Cisco, мета цієї архітектури – "допомогти розробникам щодо розгортання проєктів Інтернету речей та пришвидшити прийняття Інтернету речей.

Але незалежно від варіанту використання та кількості шарів, ключові будівельні блоки будь-якої структури Інтернету речей завжди однакові (рис. 1.1), а саме:

- розумні речі ;

- мережі та шлюзи, що дозволяють пристроям з низьким енергоспоживанням (що часто трапляється в IoT) входити у мережу Інтернет;
- платформи проміжного програмного забезпечення або Інтернет речей, що забезпечують місця для зберігання даних, вдосконалені обчислювальні машини, а також аналітичні можливості;
- додатки, що дозволяють кінцевим користувачам отримувати вигоди від Інтернету речей та керувати фізичним світом.

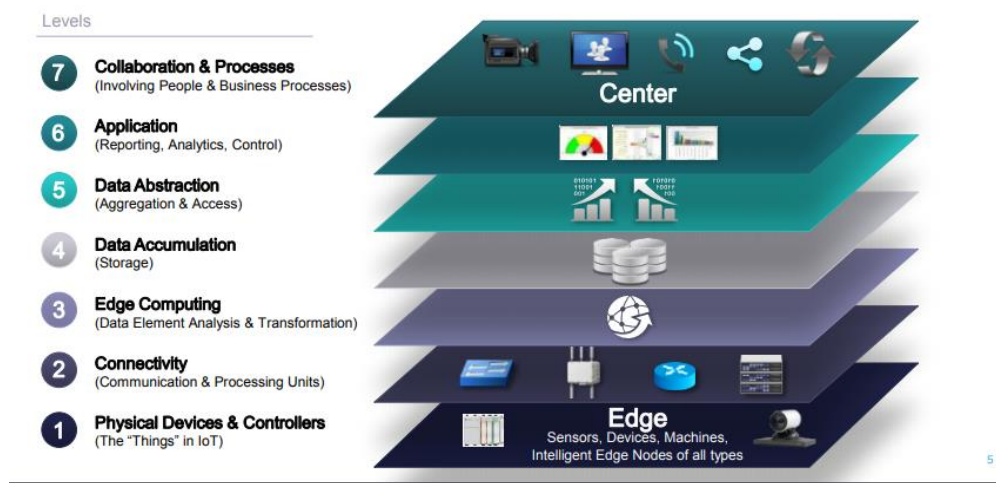


Рисунок 1.1 – Стандартизована архітектурна модель, запропонована лідерами галузі Інтернету речей

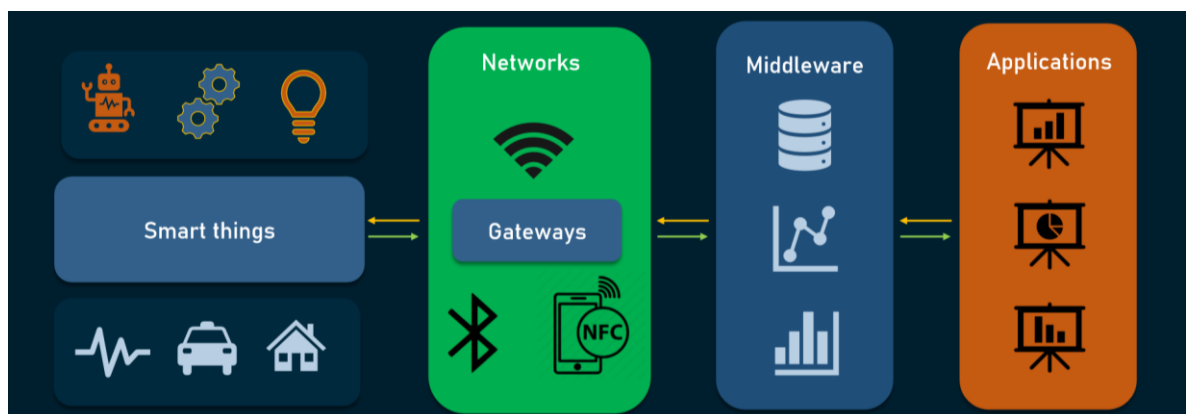


Рисунок 1.2 – Каркас системи Інтернету речей

Елементи, що вказані на рисунку 1.2 складають основу будь-якої системи Інтернету речей, на основі якої може бути розроблена ефективна багаторівнева архітектура. Найчастіше це:

- шар сприйняття, що містить розумні речі;
- рівень підключення або транспортний рівень, що передає дані з фізичного рівня в хмару і навпаки через мережі і шлюзи;
- рівень обробки, що використовує платформи Інтернету речей для накопичення і управління всіма потоками даних;
- рівень додатків, що надає кінцевим користувачам такі рішення, як аналітика, звітність і управління пристроями.

Крім найбільш важливих компонентів, в статті також описані три додаткових рівня:

- граничний обчислювальний рівень, що виконує попередню обробку даних близько до кордону, де об'єкти Інтернету речей збирають нову інформацію. Зазвичай складні обчислення відбуваються на шлюзах;
- бізнес-рівень, на якому підприємства приймають рішення на основі даних; а також
- рівень безпеки, що охоплює всі інші рівні.

Ці додаткові компоненти, які часто розглядаються як необов'язкові, проте роблять проект Інтернету речей точним, щоб задовольнити потреби сучасного бізнесу [5, 6].

1.4 Основні напрямки комунікаційних технологій Інтернету речей

На сьогодні існує великий вибір технологій комунікації між пристроями, що утворюють Інтернет речей. Нижче наведено декілька видів мереж, що використовуються у Інтернеті речей, які у свою чергу класифікуються діапазон дальності роботи.

1.4.1 Технологія 5G

5G – остання інновація в технологіях комунікаційних мереж, яка зараз в активній розробці.

Очікується, що це передова як для комунікаційних систем, так і для систем IoT [32]. Однак наразі мало досліджень стосовно інтегрування високошвидкісної технології 5G із низьким енергоспоживанням, необхідним для додатків IoT.

Дійсно, 5G призначений для забезпечення надшвидкісного зв'язку, використовуючи високу частоту (наприклад, 60 ГГц) й широку пропускну здатність [34]. Потрібно забезпечити дуже високу швидкість передачі даних (1–10 Гбіт / с), але потрібно зважати на об'єкти з обмеженою енергією Інтернет речей.

На даний момент 5G націлений на дві речі: масштабні комунікації машинного типу (mMTC) та критичні комунікації машинного типу (cMTC), що використовують надмірно надійні та низькозатримані комунікації (URLLC). Вимоги до cMTC занадто жорсткі для IoT, тоді як mMTC був розроблений для IoT. LTE-M та NB-IoT вже відповідають вимогам mMTC 5G, тому немає спеціального рішення, крім eMTC та NB-IoT, яке планується вказати для 5G IoT [35, 36].

1.4.2 Технологія Low-Power Wide Area Networking

Малопотужні широкосмугові мережі (Low-Power Wide Area Networking, LP-WAN), спрямовані на заповнення існуючої прогалини в розгортанні переповнених мереж M2M (Machine-to-Machine) [37, 38]. Головною основою цих систем є розгортання масштабованих систем які, як правило, в експлуатації використовують недорогі сучасні пристрої з низьким споживанням батареї. На рисунку 1.3 представлена типова архітектура системи LP-WAN.

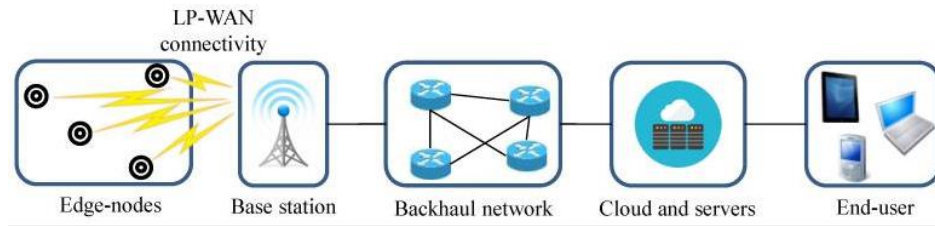


Рисунок 1.3 – Типова архітектура LP-WAN

Мережева архітектура подібна до архітектури стільникових мереж, де одна або низка базових станцій забезпечує пряме підключення від крайніх пристроїв до мережі зворотного зв'язку, а потім до серверу, де дані зберігаються та готуються для доступу. Що стосується архітектури крайової мережі, вона помітно відрізняється від тієї, що застосовується традиційною WSN. В основному, замість того, щоб складати локальну мережу та використовувати шлюз для надсилання поза зібраними даними, кінцеві вузли безпосередньо підключаються до базової станції. Дана конфігурація спрощує складність управління мережею, а також зменшує споживання енергії, оскільки уникає маршрутизації.

1. Зв'язок на короткій відстані (Short-Range Connectivity)

Системи з підключенням на коротку відстань це перші системи, які використовували для управління Wireless Sensor Network (WSN). Залежно від прийнятої бездротової технології, яка суттєво визначає фізичний (PHY) і середній рівні контролю доступу (MAC), мережа представляє більш придатні характеристики для підтримки тієї чи іншої програми.

Найбільш використовувані технології для експлуатації мереж WSN, тобто протоколи на базі IEEE 802.15.4, ZigBee та 6LoWPAN, представляють надзвичайно цікаві особливості з точки зору енергоефективності та низької вартості кінцевих пристроїв. Однак зростання цього типу мережі обмежений, оскільки складність управління та проблеми з перешкодами можуть зазнати помітного збільшення розміру мережі [39, 40]. Хоча існують декілька алгоритмів маршрутизації, заснованих на різних парадигмах, таких як

багатоланкова маршрутизація, гнучкі мережі або стійкі до затримок мережі, у відносно великих мережах все ще може знадобитися значна кількість концентраторів (або збирачів інформації), що вплине на загальне енергоспоживання [41].

Окрім можливого ефекту зі збільшенням споживання енергії мережею в більш щільних сценаріях із згаданими раніше протоколами ZigBee або 6LoWPAN, використання інших технологій, таких як WiFi та Bluetooth (не заснованих на WSN, але доволі поширені для цієї мети) може негативно позначитися на енергоефективності. Основна проблема, яку представляють ці рішення, полягає в тому, що вони розроблені для підтримки додатків, що вимагають високої пропускної здатності, і, отже, передача чи прийом даних вимагає багато енергії. Крім того, управління мережею, що складається із значної кількості вузлів, багатоланкова задача, оскільки ці мережі часто базуються на Інтернет-протоколі (IP), тому потрібні різні методи організації топології, наприклад, кластеризація [42,43].

Іншим важливим питанням, загальним для згаданих технологій короткого діапазону (протоколи ZigBee та 6LoWPAN на базі IEEE 802.15.4, WiFi та Bluetooth), є необхідність підключення до Інтернету для завантаження всіх зібраних даних до хмара. У той час, як у міських або приміських районах це не повинно бути проблемою, у сільській місцевості це проблематично або, принаймні, дорогим, оскільки в цих районах зазвичай бракує існуючої інфраструктури, яка могла б забезпечити доступ до Інтернету [44]. Крім того, з різних причин потрібно спеціальне обладнання, наприклад мости. По-перше, ці вузли використовуються як проміжні точки між мережею зворотного зв'язку та крайовими вузлами через обмежений діапазон охоплення останніх. Крім того, всі зібрані дані потрібно зібрати та відформатувати перед надсиланням їх на сервери зберігання. Якщо говорити про великі дані, точне визначення пропускної здатності та тимчасових потреб цих пристроїв у зберіганні не є тривіальним завданням. З усіх цих причин для розгортання служб Інтернету

речей також використовуються інші підходи, засновані на LR (Long-Range) технологіях.

2. Зв'язок на великі відстані (Long-Range Connectivity)

Для вирішення описаних вище проблем підходять стільникові мережі, що засновані на загальнодоступній інфраструктурі, широко розгорнуті та охоплюють великі площі та працюють за відомими стандартами, такими як GSM, GPRS, або 3G / 4G. Дотримуючись цієї стратегії, кінцеві датчики збирають потрібні дані, а потім відправляють їх у хмару через стільниковий канал передачі даних, наприклад, GPRS, 3G тощо. Однак основною проблемою цих систем є те, що вони були розроблені для виконувати інші вимоги, ніж вимоги служб Інтернету речей. У той час як у стільникових мережах ця тенденція збільшує доступну пропускну здатність, маючи на меті задовольнити зростаючий попит мультимедійного трафіку з боку користувачів [48], у послугах Інтернету речей стратегія повинна полягати в оптимізації використання смуги пропускання та зменшенні споживання енергії [49]. Поточні стільникові базові станції здатні приймати невелику кількість підключених користувачів (у порівнянні з потребами в послугах сенсоризації) з відносно високою пропускну здатністю, гарантованою для кожного з них. У свою чергу, те, що вимагає лише машинна мережа, – це рішення для підтримки величезної кількості підключених пристроїв з низькою пропускну здатністю, які надсилають короткі повідомлення лише раз у декілька годин. Тому нинішні стільникові рішення явно неефективні з точки зору масштабованості та енергоспоживання. Щодо першої, однією з можливих стратегій організації та забезпечення зв'язку до незалежних систем є використання фемтосот [50] або пікосот [51]. Однак це рішення помітно збільшує вартість системи, оскільки потрібне додаткове обладнання та інфраструктура підключення.

Зосереджуючись на енергоефективності, стільникові мережі потребують майже постійного зв'язку між кінцевими вузлами та базовою станцією для завдань управління (накладні витрати на протокол), що досить енергозатратним для батареї. Більше того, існуючі стільникові мережі працюють на дефіцитних та дорогих (ліцензованих) діапазонах частот.

З усіх цих причин, малопотужні широкосмугові мережі виступають як альтернативне рішення для великої дальності, щоб виконувати запити послуг Інтернету речей [37].

Висновки до розділу

Інтернет речей розвивається і впливає на повсякденне життя. Сфера застосування поширюється, на сьогодні зустрічаються системи з різною складністю вирішень поставлених в програмному і апаратному рішень, але притримуючись встановлених вимог до дизайну приладів та архітектури систем. В основному популяризують системи із малим енергоспоживанням, оскільки дані системи економічно вигідніші, ніж звичайні комунікаційні мережі й зважаючи на той факт, що дані мережі надсилають лише короткі повідомлення з інтервалом в декілька годин, то пропускну здатністю нехтується.

Тому одна із важливих характеристик даних систем є низький рівень енергоспоживання, оскільки основною вимогою до систем Інтернету речей є довгий термін роботи без заміни батареї, що у свою чергу зумовлено економічними аспектами. Враховуючи вимоги до споживання енергії існують системи та технології в яких рівень енергоспоживання є однією із важливих характеристик. Дані системи більш докладно розглянуто у наступному розділі.

2 ІСНУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РІШЕННЯ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ МІНІМАЛЬНЕ СПОЖИВАННЯ ПРИСТРОЇВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

2.1 Технологія LoRa

LoRa (від англ. Long Range) – технологія і одночасно однойменний метод модуляції. Метод модуляції LoRa запатентований компанією Semtech, заснований на техніці розширення спектра (spread spectrum modulation, SSM) і варіацію лінійної частотної модуляції (chirp spread spectrum, CSS), під час якої дані кодуються широкосмуговими імпульсами з частотою, що збільшується або зменшується на деякому часовому інтервалі. Імпульс пробудження – це частота розгортки відповідної смуги пропускання (125 кГц, 250 кГц ...), визначена раніше (рис 2.1).

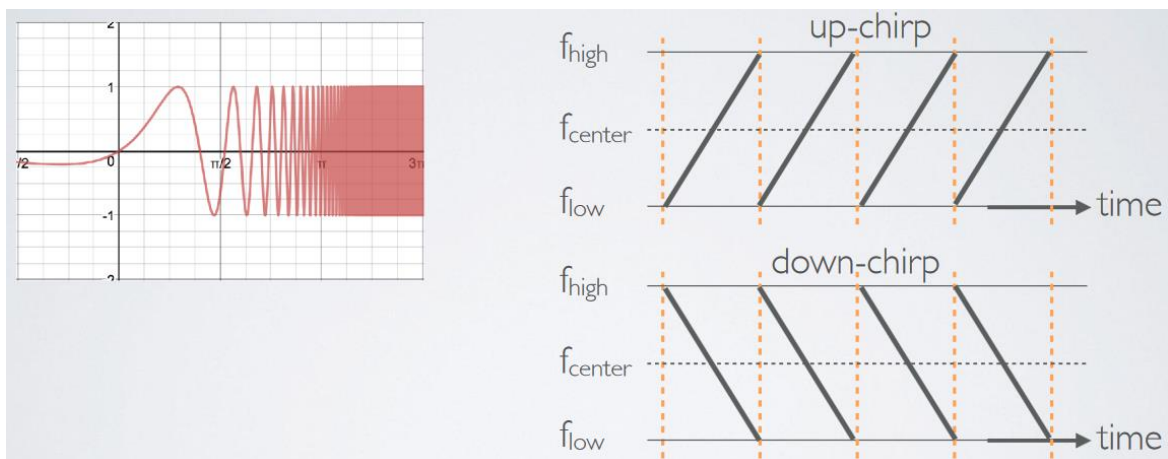


Рисунок 2.1 – Частотна модуляція LoRa

Методи розширеного спектру – це методи, за допомогою яких сигнал навмисно поширюється в частотній області. Наприклад, сигнал передається короткими серіями, "перескакуючи" між частотами в псевдовипадковій послідовності.

Щоб генерувати символи або сигнал пробудження, радіомодуль модулює фазу генератора. Кількість разів на секунду, коли радіомодуль регулює фазу, називається частотою чипів і визначає смугу пропускання модуляції. Швидкість чипу - це прямий поділ кварцової частоти (32 МГц).

Основні сигнали пробуджень – простий перехід від f_{\min} до f_{\max} (up-chirp) або f_{\max} до f_{\min} (down-chirp). Сигнал пробудження, що несе дані, - це сигнали, які циклічно зміщені, і цей циклічний зсув несе інформацію [16].

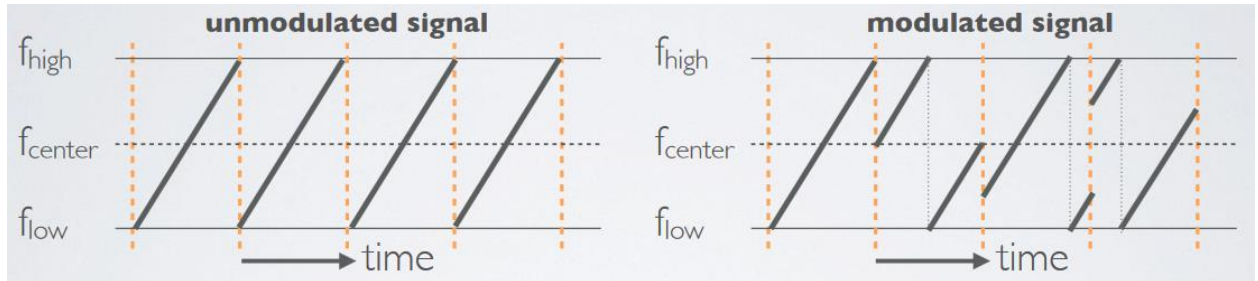


Рисунок 2.2 – Вигляд немодульованого та модульованого сигналу LoRa

Пристрої LoRa Semtech та технологія бездротових радіочастот – це бездротова платформа великого діапазону, яка стала фактичною технологією для мереж Інтернету речей (IoT) у всьому світі. [1].

LoRa демодулює сигнали на рівні 20dB нижче рівня шумів, тоді як більшість систем з частотної маніпуляцією (frequency shift keying, FSK) можуть коректно працювати з сигналами на рівні не нижче 8-10dB над рівнем шумів. Модуляція LoRa визначає фізичний рівень (physical layer, PHY, OSI level 1), який може використовуватися в мережах з різною архітектурою - mesh-мережі, зірка, точка-точка і інші [2].

Коли мова йдеться про технологію, то найчастіше мають на увазі і метод модуляції і відкритий протокол LoRaWAN, розвитком якого займається некомерційна організація LoRa Alliance, в яку входять різні компанії: як виробники устаткування і програмного забезпечення, так і оператори зв'язку. У числі членів LoRa Alliance IBM, Semtech і інші.

2.1.1 Архітектура LoRaWAN

На рисунку 2.3 наведено архітектуру LoRaWAN мереж. Типова мережа LoRaWAN складається з наступних елементів:

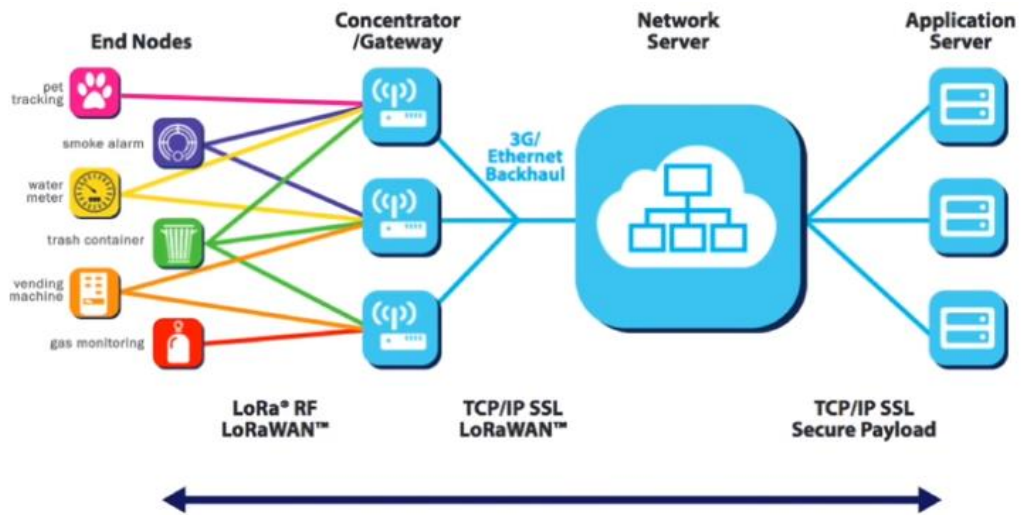


Рисунок 2.3 – Архітектура LoRaWAN мереж

- Кінцевий вузол (End Node) призначений для здійснення керуючих або вимірювальних функцій. Містить набір необхідних датчиків і керуючих елементів [52].
- Шлюз LoRa (Gateway / Concentrator) – пристрій, що приймає й передає дані від кінцевих пристроїв завдяки радіоканалу в транзитну мережу. В якості такої мережі є Ethernet, Wi-Fi, стільникові мережі та будь-які інші телекомунікаційні канали. Шлюз і кінцеві пристрої утворюють мережеву топологію типу зірка. Зазвичай містить багатоканальний приймач для обробки сигналів в декількох каналах одночасно або навіть, кількох сигналів в одному каналі. Відповідно, кілька таких пристроїв забезпечують зону покриття мережі та прозору двосторонню передачу даних між кінцевими вузлами і сервером [52].
- Мережевий сервер (Network Server) призначений для управління мережею: завданням розкладу, адаптацією швидкості, зберіганням і обробкою отриманих даних [52].
- Сервер додатків (Application Server) може віддалено контролювати роботу кінцевих вузлів і збирати необхідні дані з них [52].

В кінцевому підсумку, LoRaWAN мережа має топологію зірка із зірок, має кінцеві вузли, які через шлюзи, що утворюють прозорі мости, пов'язані з

центральним сервером мережі. Тому зазвичай передбачається, що шлюзами і центральним сервером володіє оператор мережі, а кінцевими вузлами - абоненти. Абоненти мають можливість прозорої двобічної і захищеної передачі даних до кінцевих вузлів [52].

Оскільки LoRaWAN утворює глобальну мережу, то розробники приділили особливу увагу безпеці і гарантують конфіденційність, які забезпечуються шифруванням AES на декількох рівнях:

- На мережевому рівні з використанням унікального ключа мережі (Unique Network key, EUI64).
- Наскрізну безпеку на рівні додатків за допомогою унікального ключа додатки (Unique Application key, EUI64).
- Спеціального ключа пристрою (Device specific key, EUI128).

Для вирішення різних завдань і застосувань в мережі LoRaWAN передбачено три класи пристроїв, кожен з яких має різний рівень енергоспоживання (рис. 2.4):

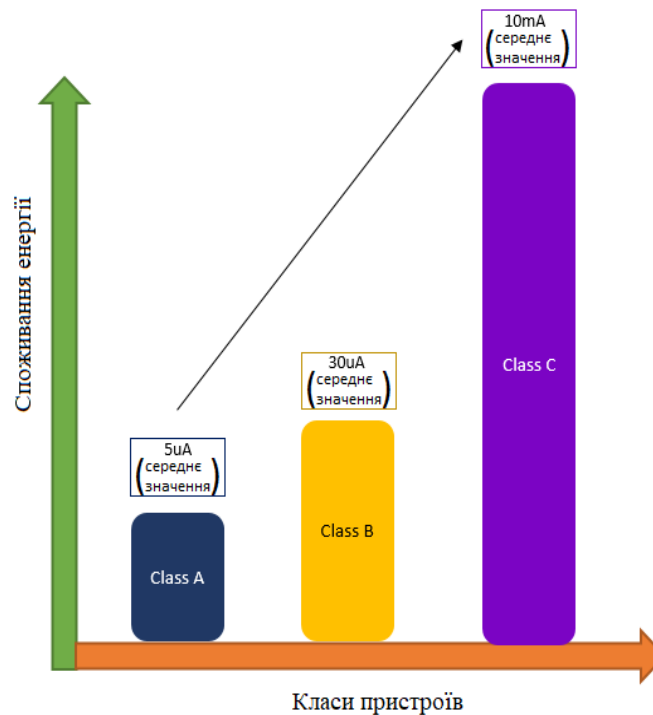


Рисунок 2.4 – Споживання енергії за класом пристрою

Двонаправлені кінцеві пристрої «класу А» (Bi-directional end-devices, Class A). Пристрої цього класу застосовують, коли необхідна мінімальна споживана потужність при переважанні передачі даних до сервера. Ініціатором сеансу зв'язку виступає кінцевий вузол, відправляючи пакет з необхідними даними, а потім виділяє два вікна, в перебігу яких чекає даних від сервера. Таким чином, передача даних від сервера можлива тільки після виходу на зв'язок кінцевого пристрою.

2.1.2 Принцип прийому інформації

Для пристроїв класу "А" після завершення кожного сеансу передачі даних кінцевим пристроєм (в лінії «вгору») відкриваються два коротких часових вікна, в перебігу яких кінцеве пристрій може прийняти дані від мережі (в лінії «вниз»). При цьому протягом тривалості вікон прийому передача даних кінцевим обладнанням заборонена.

Для передачі даних шлюзом LoRa в першому часовому вікні (RX1) використовуються ті ж параметри передачі (включаючи номер частотного каналу і швидкість передачі даних), які використовувалися для передачі даних кінцевим пристроєм.

Для передачі даних шлюзом LoRa в другому часовому вікні (RX2) використовуються встановлені параметри передачі (включаючи номер частотного каналу і швидкість передачі даних) [7].

Тривалість тимчасового вікна передвстановлюють і повинна бути достатньою для прийому преамбули. Якщо мережі потрібно передати кінцевому пристрою (End Node) більше інформації, ніж може бути передано в рамках одного вікна прийому (receive window), LoRa gateway (шлюз) запитує End Node виділення йому додаткового вікна, шляхом установки біта FPending заголовка MAC рівня. В цьому випадку End Node повинен виконати передачу up-link повідомлення (в тому числі порожнього, якщо відсутні корисні дані для

передачі) по закінченні якого і будуть відкриті додаткові вікна для отримання даних від мережі.

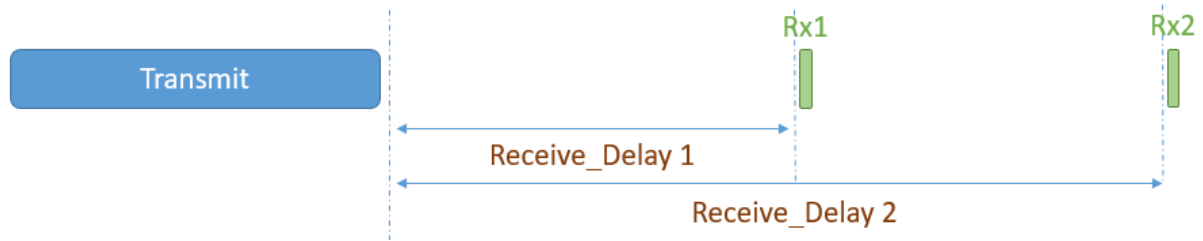


Рисунок 2.5 – Часові вікна обміну даними у режимі класу А [7]

Двонаправлені кінцеві пристрої «класу Б» (Bi-directional end-devices, Class B). Основна відмінність від пристроїв «класу А» полягає у виділенні додаткового вікна прийому, яке пристрій відкриває за розкладом. Для складання розкладу кінцеве пристрій здійснює синхронізацію за спеціальним сигналом від шлюзу (по маякам – Beacon). Завдяки цьому вікну сервер має можливість почати передачу даних в заздалегідь певний час.

Двонаправлені кінцеві пристрої «класу С» з максимальним прийомним вікном (Bi-directional end-devices, Class C). Пристрої цього класу мають майже безперервне вікно прийому даних і закриває його лише на час передачі даних, що дозволяє їх застосовувати для вирішення завдань, що вимагають одержання великого обсягу даних і не потрібна тривала робота від автономного джерела живлення.

Разом, LoRaWAN дозволяє будувати глобальні розподілені бездротові мережі з великим числом кінцевих вузлів. За заявами Semtech, один LoRa-шлюз допускає обслуговування до п'яти тисяч кінцевих пристроїв, що досягається за рахунок:

- Топології мережі.
- Адаптивної швидкості передачі даних і адаптивної вихідної потужності пристроїв, що задаються мережевим сервером.
- Часовий поділ доступу до середовища.
- Частотним поділом каналів.

- Особливістю LoRa-модуляції, що дозволяє в одному частотному каналі одночасно демодулювати сигнали, що передаються на різних швидкостях [7].

2.2 Технологія Narrow Band Internet of Things

Вузькосмуговий Інтернет речей (Narrow Band Internet of Things, NB-IoT) – стандартна технологія широкої зони низької потужності (LPWA), розроблена для забезпечення широкого спектру нових пристроїв та послуг IoT. NB-IoT значно покращує енергоспоживання користувацьких пристроїв, потужність системи та ефективність спектру, особливо при глибокому покритті. Термін служби батареї більше 10 років може підтримуватися для широкого кола випадків використання.

Нові сигнали та канали фізичного рівня розроблені для задоволення вимог щодо розширеного покриття - у сільській місцевості та глибоких приміщеннях - та наднизької складності пристроїв. Однак технологія набагато простіша, ніж GSM або GPRS, і, як очікується, її вартість буде швидко зменшуватися у міру зростання попиту.

NB-IoT співіснує з мобільними мережами 2G, 3G та 4G. Також висока безпека та конфіденційність мобільних мереж, таких як підтримка конфіденційності ідентифікації користувача, автентифікація сутності, конфіденційність, цілісність даних та ідентифікація мобільного обладнання.

2.2.1 Особливості радіосигналу NB-IoT

NB-IoT працює у більш низьких рівнях сигналу й високих показниках шумів, а також енергетичне споживання батареї на низькому рівні.

Також призначений для передачі коротких повідомлень, і не вимагає передачу аудіо-відео контенту, тобто великих файлів. Виходячи з цього, на фізичному рівні є певні особливості, які забезпечують такі характеристики:

- спільна полоса для NB-IoT обмежена в один ресурсний блок шириною в 180кГц;
- радіотракт користувачького пристрою має одну антенну, приймач і передавач;
- передача і прийом рознесені в часі, тобто напівдуплексний режим;
- можливість передавати в напрямлені UL на одній піднесучій;
- типи модуляції, обмежені BPSK і QPSK;
- переповтори сигналу, що передається (розширення покриття).

Використання вузької смуги частот в один ресурсний блок, однієї антени і напівдуплексний режим передачі дозволяє спростити пристрій та досягнути:

- зниження вимог до потужності;
- зниження споживання енергії;
- зменшення габаритів;
- зменшення вартості пристрою.

Для NB-IoT доступні діапазони частот такі як і для 2G / 3G / 4G в «низькому» діапазоні. Це B20 (800МГц), B8 (900МГц), B3 (1800МГц)[8, 36].

2.2.2 Механізми енергозбереження PSM і eDRX

Одним з ключових переваг LPWAN мереж є енергоефективність. Заявляється строк до 10 років автономної роботи пристрою на одній батареї. В технології NB-IoT існує два механізми роботи в режимі енергозбереження .

1.PSM (Power saving mode)

Режим енергозбереження PSM дозволяє пристрою надовго вимикати радіомодуль, залишаючись при цьому зареєстрованим в мережі, і не встановлювати заново PDN кожен раз при необхідності передати дані.

Мережа, періодично ініціює процедуру актуалізації – Tracking Area Update (TAU), щоб перевірити наявність пристрою. Частота цієї процедури

задається мережею за допомогою таймера T3412, значення якого передається пристрою під час процедури Attach або чергового TAU. У класичному LTE значення за замовчуванням цього таймера 54 хвилини, а максимальне - 186 хвилин. Однак, для забезпечення високої енергоефективності, необхідність виходу в радіоефір кожні 186 хвилин занадто енергозатратний, тому для вирішення цієї проблеми розроблено механізм PSM [31].

Пристрій активує режим PSM передаючи в повідомленнях «Attach Request» або «Tracking Area Request» значення двох таймерів T3324 і T3412-Extended. Перший визначає час, який пристрій буде доступний після переходу в «Idle Mode». Другий – це час, через який повинно відбутись TAU, але у цьому випадку значення може досягати 413 днів. Залежно від налаштувань, MME приймає значення таймерів, отриманих від пристрою, або змінити їх, передавши нові значення в повідомленнях «Attach Асепт» або «Tracking Area Update Асепт». Пристрій не вмикає радіомодуль максимально на 413 днів і при цьому зареєстрований в мережі. В результаті колосальна економія ресурсів мережі та енергоефективність пристроїв [31].

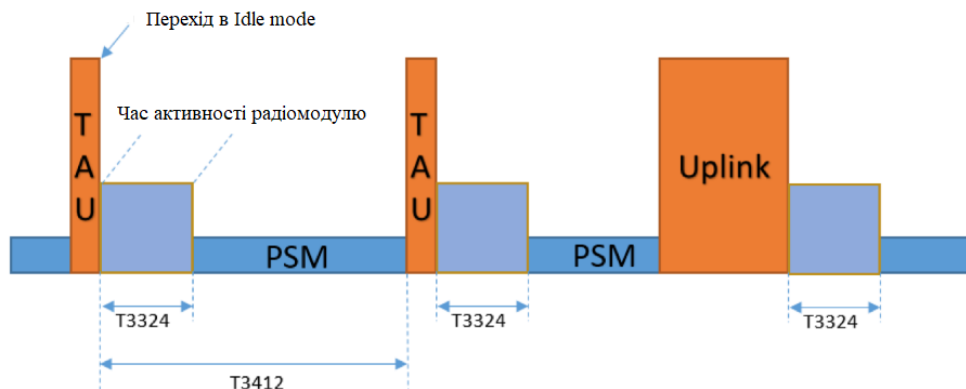


Рисунок 2.6 – Часова діаграма режиму PSM

Однак в режимі пристрій недоступний тільки для вхідних комунікацій. При необхідності передати будь-яке повідомлення до сервера додатків, пристрій в будь-який момент виходить з PSM і відправити дані, залишившись після цього активним протягом таймера T3324 для прийому інформаційних повідомлень від AS (якщо такі будуть) [31].

2. eDRX (extended discontinuous reception):

eDRX, розширений режим переривчастого прийому. Щоб передати дані на пристрій, який знаходиться в «Idle mode», мережа виконує процедуру сповіщення – «Paging». При отриманні сповіщення пристрій ініціює встановлення SRB для подальшої комунікації з мережею. Але щоб не пропустити адресоване йому повідомлення Paging, пристрій повинен постійно прослуховувати радіоефір, що також досить енерговитрато.

eDRX – режим, у якому пристрій приймає повідомлення від мережі періодично. Під час процедур Attach або TAU пристрій погоджує з мережею тимчасові проміжки, в які воно буде прослуховувати ефір. Відповідно, в ці ж проміжки буде проводитися процедура Paging. У режимі eDRX робота пристрою розбивається на цикли (eDRX cycle). На початку кожного циклу йде так зване «вікно пейджінга» (Paging Time Window, далі PTW) - це час, який пристрій слухає радіоканал. Після закінчення PTW пристрій відключає радіо модуль до кінця циклу [31].

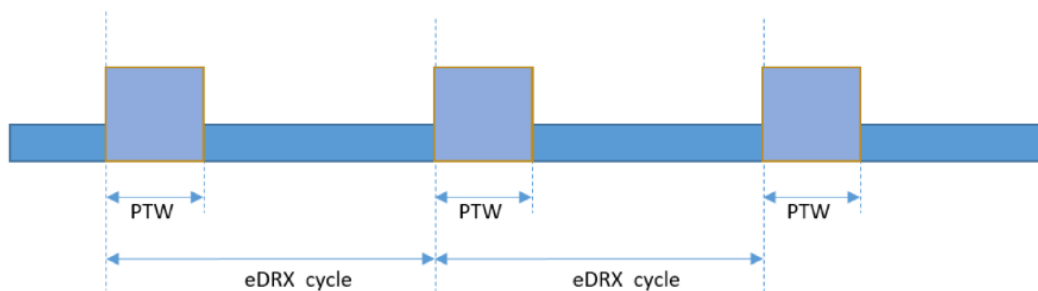


Рисунок 2.7 – Часова діаграма режиму eDRX

3. HLCOM (high latency communication):

У разі необхідності передати дані в Up-link пристрій може вийти з будь-якого з цих двох режимів енергозбереження, не чекаючи закінчення PSM або eDRX циклу, але передача даних на пристрій можлива лише в активній фазі роботи пристрою.

Функціонал HLCOM або комунікація з високими затримками – буферизація Down-link пакетів на SGW на час, поки пристрій знаходиться в режимі енергозбереження та недоступний для комунікації. Буферізовані пакети будуть доставлені, як тільки пристрій вийде з PSM, зробивши TAU або передавши Uplink трафік, або, коли настане PTW [31].

2.3 Технологія ZigBee

ZigBee (також можна зустріти назву ZigZag like a Bee). Мережа ZigBee забезпечує кілька шляхів передачі даних від пристрою до пристрою (також як і Інтернет) і тим самим усуває єдину точку відмови. Якщо вузол тимчасово вимикається або ж віддаляється з мережі на постійній основі, пакети даних ZigBee можуть «стрибати зігзагами» через вузли мережі до місця призначення немов бджоли. Основне призначення ZigBee-мереж – прості мережі управління з досить великою кількістю простих пристроїв, які періодично відправляють невеликі пакети від датчиків, щоб регулювати світло, електродвигуни та інше обладнання.

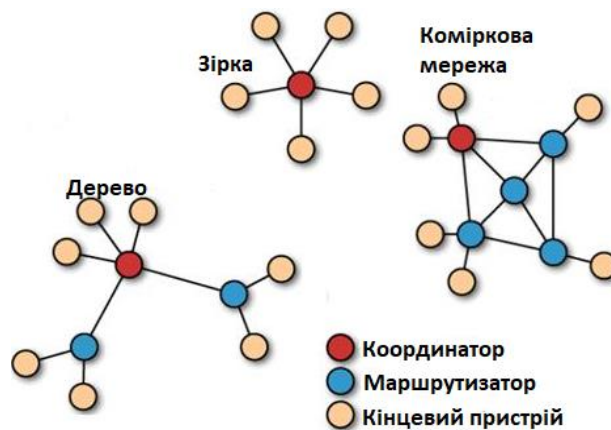


Рисунок 2.8– Топологія «зірка», «дерево» і «стілєникова мережа»

Розроблений на стандарті IEEE 802.15.4, ZigBee – це самостійний, безпечний, надійний протокол, що підтримує топологію «коміркова мережа». Він може розширюватися до тисяч вузлів у великих областях. ZigBee існує вже близько 10 років і має приблизно 1 млрд пристроїв, розгорнутих у всьому світі. Специфікація продовжує розвиватися [9]. Як показано на рис. 2.9,

специфікація ZigBee будується на каналному рівні 802.15.4 і підтримує інші рівні. ZigBee підтримує декілька топологій мережі, включаючи точка-точка, точка-багатоточка, та стільникову мережі.



Рисунок 2.9 – Специфікація ZigBee

В архітектурі системи ZigBee є 3 типи пристроїв. Координатор ZigBee (ZC), маршрутизатор ZigBee (ZR) і кінцевий пристрій ZigBee (ZED). В мережі є тільки один координатор. Координатор вибирає топологію мережі, встановлює мережу та керує інформацією про конфігурацію. Він виступає як шлюз в мережу і з неї, тому він бути ввімкненим і працювати постійно. Маршрутизатори ZigBee передають інформацію та переміщують дані через мережу. Також можуть функціонувати як сенсорні вузли. Оскільки маршрутизатори складають основу мережі, вони завжди повинні бути ввімкнені. Кінцевий пристрій знаходиться на краю мережі і є джерелом або користувачем мережних даних. Зазвичай він живиться від батареї і може знаходитися в режимі низького енергоспоживання протягом тривалого часу. Кінцевий пристрій зазвичай є найменш дорогим пристроєм у мережі.

Маршрутизація – процес вибору шляху, який використовують для передачі повідомлення від кінцевого пристрою до пристрою призначення. Координатор ZigBee і маршрутизатор ZigBee відповідають за виявлення і підтримку маршрутів по всій мережі.

Основні характеристики ZigBee:

- працює на частоті 2,4 ГГц (для глобального використання), але також стандарт визначає радіоприймачі на частоті 868 МГц і 915 МГц;
- використовує множинний доступ з контролем несучої і униканням колізій (CSMA-CA), що дозволяє багатьом пристроям спільно використовувати один і той же частотний канал;
- підтримка швидкості передавання даних до 250 Кбіт/с, хоча вона, зазвичай, набагато нижча;
- використовує зв'язок з розширеним спектром для підвищення продуктивності в середовищах радіозв'язку з багатопроблемним, шумним та низьким рівнем сигналу;
- дозволяє використовувати діапазон від 10 до 100 метрів для програм ZigBee;
- підтримує до 65000 вузлів;
- використовує асоціацію і дисоціацію, щоб дозволити пристроям приєднуватися або виходити з мережі. Цей процес дає змогу самостійно формуватися і самовідновлюватися;
- використовує прив'язку для створення логічних зв'язків між відповідними програмами;
- забезпечує захист за допомогою 128-бітного шифрування AES для безпечних з'єднань даних.

Переваги:

1. Альянс

- 1.1 Альянс складається з безлічі учасників, що визначають всі ланки в публічно доступних специфікаціях,
 - 1.2 постачальники стека і виробники продукту повинні пройти процес сертифікації,
 - 1.3 пристрої можуть взаємодіяти між собою «з коробки».
2. Маршрутизація
- 2.1. Маршрутизації AODV дозволяє будь-якого пристрою спілкуватися з будь-яким іншим пристроєм в мережі,
 - 2.2. надійні і масштабовані мережі, 100+ вузлів з використанням маршрутизації багато до одного,
 - 2.3. самовідновлення мережі без єдиної точки відмови.
 - 2.4. зниження витрат на просування, тому що стандарт ZigBee є визнаним і прийнятим у всіх регіонах світу,
 - 2.5. ZigBee побудований поверх IEEE802.15.4 і використовує частоту 2.4 ГГц,
 - 2.6. фізичний рівень може бути сертифікований для будь-якого регіону в світі,
 - 2.7. скорочення витрат на розробку, тому що один дизайн (апаратний і програмний) може бути використаний в будь-якому регіоні світу.

2.3.1 Типи пристроїв ZigBee

Координатор(шлюз): ZigBee (COO – Coordinator)

- Запускає мережу,
- Здійснює маршрутизацію пакетів в мережі,
- Керує безпекою в мережі,
- Встановлює відповідність між роутерами і кінцевими пристроями.

Роутер ZigBee (FFD – Router)

- Здійснює маршрутизацію пакетів в мережі,
- Встановлює відповідність між роутерами і кінцевими пристроями.

Кінцеве пристрій (датчик): ZigBee (E – End Device)

- Знаходиться в режимі сну більшу частину часу
- Може працювати від батарейного живлення
- Не здійснює маршрутизацію

Перераховані пристрої виступають в якості батьківських вузлів для кінцевих пристроїв. Максимальне число дочірніх вузлів у роутера або координатора може досягати 32. Батьківські пристрої відповідають за прийом і зберігання повідомлень для кінцевих пристроїв, які підключені до них. Кінцеві пристрої, в свою чергу, спілкуються з мережею через батьків. Кожен раз, коли новий кінцевий пристрій підключається до мережі або ж старий перепідключається, для нього визначається батько, який робить запис у спеціальній таблиці дочірніх пристроїв. У цій таблиці зберігається короткий і довгий адреса дочірнього вузла і його тип. Батьки постійно накопичують пакети в черзі для асоційованих з ними дітей, до тих пір поки останні не прокинуться і не запросять їх. Кінцеві пристрої посилають запити батькам після пробудження для отримання пакетів зі своєї черги. Розглянемо доступні типи кінцевих пристроїв:

- кінцевий пристрій (ZED) – пристрій, який не бере участі в роботі мережі по маршрутизації трафіку, підключенні нових пристроїв і т.д. Для даного типу специфікація технології ZigBee не передбачає наявність сплячого режиму. Тому при описі батька (*) означала, що вони не зберігають повідомлення для ZED-пристроїв. Передбачається, що у ZED-пристрої приймач завжди включений і батьківський вузол відразу ж після отримання адресного повідомлення переправляє його адресату. Тому дані пристрої теж повинні мати стаціонарне джерело живлення.

- сплячий кінцевий пристрій (SED) – мережеві обов'язки для даного типу пристроїв аналогічні попередньому типу. Відмінність лише в підтримці режиму сну, який оголошений в специфікації технології ZigBee. Такі пристрої більшу частину часу проводять в режимі сну і можуть працювати від мало ємнісного джерела живлення тривалий час. Визначення «тривалого часу» тут залежить від програми, але якщо розглянути приклад з бездротовим ZigBee-вимикачем, то термін роботи такого пристрою від одного комплекту дискових батарейок може скласти 2-3 роки [3]. Такі пристрої виходять із сплячого режиму тільки з якого-небудь зовнішньої події (по перериванню від таймера, щоб відцифрувати показання датчика; після натискання на кнопку і т.д.) або коли прийшов час відправляти пакет даних. Для того, щоб отримувати повідомлення від батьківського вузла, сплячі вузли використовують Polling-механізм.
- мобільний кінцевий пристрій (MED) – аналог сплячого кінцевого пристрою (SED), з тим лише виключенням, що запис про нього в дочірній таблиці батьківського вузла зберігається нетривалий час - від декількох секунд до декількох хвилин (для сплячого кінцевого пристрою час зберігання записи може становити до 48 днів). Це зроблено, виходячи з назви типу, для того, щоб такий пристрій міг переміщатись приміщенням та не викликати колізій під час передачі повідомлення. Колізія може виникнути, якщо у кількох батьків буде запис про один й той самий вузол. Даний тип пристрою не описаний в специфікації ZigBee і є типом розширення функцій SED-пристрої в реалізації стека ZigBee від Silicon Labs [10].

2.4 Порівняльна таблиця наведених технологій

Стандарти Інтернету речей, акцент в яких ставиться на тривалій роботі кінцевих пристроїв від автономних джерел живлення (LPWAN). Основними технологіями на ринку LPWAN вже розглянуті раніше LoRa, NB-IoT та

ZigBee. У наведеній таблиці 1 [12, 13, 20] порівняння основних характеристик даних стандартів.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця технологій Інтернету речей

Технічні характеристики	LoRa	NB-IoT	ZigBee
Розробка стандарту	Модуляція - запатентована технологія Semtech Протокол - відкритий LoRaWAN	Специфікація 3GPP (Rel.14)	Специфікація стандарту IEEE 802.15.4
Частотний діапазон	433 МГц; 865 МГц – 867 МГц 868 МГц; 915 МГц; 923 МГц	450 МГц – 3,5 ГГц [18]	2.4 ГГц (діапазон ISM)
Мережа	Виділена мережа	Програмна модернізація існуючих мереж LTE	Виділена мережа
Тип мережі	Асинхронна. UP і DL пакети передаються в одних частотних каналах	Синхронна. Напівдуплексна мережа з частотним поділом UP і DL	Асинхронна

		каналів - HD-FDD	
Смуга одного радіоканалу	125кГц – 500 кГц	180кГц	2 МГц
Максимальна потужність випромінювання кінцевого пристрою	14дБм	20дБм (class 5) 23дБм (class 3)	20 дБм
Чутливість приймача базової станції	-137дБм	-141дБм (1)	-85 дБм для (2.4 МГц) 802.15.4 -92 для 900 МГц
динамічний діапазон	151дБ	161дБ (class 5) 164дБ (class 3)	104 дБ
модуляція	LoRa	QPSK / BPSK	O-QPSK
Шифрування	Так	Так	AES-128 на мережевому рівні AES-128 доступний на прикладному рівні
Завадостійкість	SNR> -20дБ	> -11,8дБ (1)	3 дБ
Швидкість передачі даних кінцевим пристроєм	0,3-50 кбіт / с	158.5 кбіт / с (UL), 127 кбіт / с (DL)	250 кбіт / с (2.4 ГГц) 40 кбіт / с (915 МГц) 20 кбіт / с (868 МГц)

Робота від автономних джерел живлення	~ 10 років	~ 10 років	> 2 років
Забезпечення низького енергоспоживання	Двонаправлені кінцеві пристрої «класу А»; Невеликі потоки даних	Використання вузької смуги частот в одному ресурсному блоці; Одна антена; Напівдуплексний режим передачі даних; Режими роботи: PSM, eDRX, HLCOM	Типами кінцевих пристроїв: сплячий кінцевий пристрій; мобільний кінцевий пристрій.

З таблиці 1 випливає, що у кожній технології є особливості в енергоспоживанні які забезпечують низьке енергоспоживання, а саме:

- LoRa: Двонаправленість кінцевих пристроїв «Класу А», невеликі обсяги потоків даних;
- NB-IoT: Вузька смуга частот в одному ресурсному блоці, напівдуплексний режим, режими роботи PSM, eDRX, HLCOM;
- ZigBee: сплячий та мобільний кінцеві пристрої.

Висновки до розділу

Розглянуто основні технічні характеристики трьох поширених систем Інтернету речей таких, як LoRa, NB-IoT і ZigBee, та методи якими забезпечено зменшення енергоспоживання для кожної із технологій.

У технології LoRa особливості забезпечення низького енергоспоживання полягає у типі кінцевих пристроїв класу A, також через зменшення потоків даних, які відправляються із сталим періодом. Також дана технологія має найкращий завадостійкість між представленими технологіями.

У технології NB-IoT основною причиною забезпечення низького споживання електроенергії є три режими роботи, а саме PSM, eDRX, HLCOM, які продовжують збільшують час автономної роботи кінцевого пристрою.

У технології ZigBee основною причиною економії енергії є декілька режимів роботи кінцевих пристроїв: сплячий кінцевий пристрій; мобільний кінцевий пристрій.

Всі розглянуті технології завдяки режимам роботи з пониженим енергоспоживанням, мають великий термін автономної роботи, але існує технологія, що дозволяють керувати постійним прослуховуванням ефіру, що дає можливість більш гнучкого сеансу зв'язку і споживання енергії. Дана технологія розглянута у наступному розділі.

3. ОСОБЛИВІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ WAKE-UP RADIO

3.1 MAC протоколи з циклічним режимом роботи

Розглянуто протоколи MAC з циклічним режимом роботи. Такі протоколи застосовують цикли сну або роботи для економії енергії, переводячи вузли в режим сну в очікуванні сеансу зв'язку. Вимкнення радіомодулю, коли вузол не працює, може зменшити споживання енергії до 50%. Протоколи MAC з циклічним режимом роботи забезпечують енергоефективність, але створюють затримки при передачі даних. На рисунку 1 показано споживання енергії радіостанції MICA2 в різних радіорежимах.

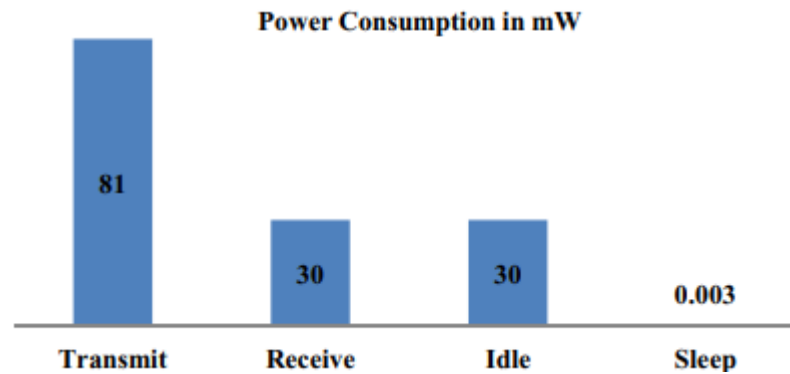


Рисунок. 3.1 – Енергоспоживання радіосигналу MICA2

Класифікують протоколи MAC з циклічним режимом роботи WSN на синхронні та асинхронні. Синхронні протоколи створюють розклад для вузлів, щоб вказати час їх сну та пробудження. Асинхронні або позапланові схеми додатково класифікуються на ініційовані передавачем та ініційовані приймачем. При використанні підходу, ініційованого передавачем, вузол надсилає часті пакети запитів на передачу, коротку преамбулу або сам пакет даних, поки один з них не «потрапить» на період прослуховування вузла призначення. У підході, ініційованому приймачем, вузли надсилають часті запити на пакети, коротку преамбулу або підтвердження, щоб інформувати сусідні вузли про готовність вузла приймати пакети [45].

3.2 Технологія пробудження системи Інтернету речей

Розглянуто вище системи не можуть використовуватись в критичних застосуваннях через переривчастий режим роботи. Використання радіомодуля для пробудження має на меті запропонувати нове апаратне рішення з енергоспоживанням на прослуховування на порядок нижче, ніж у радіопристроїв з низьким енергоспоживанням з можливістю безперервного прослуховування ефіру.

В архітектурі WuR, як показано на рис. 3.2 (а), вторинний радіомодуль із наднизькою потужністю є приймачем, що споживає кілька мікватт потужності, знаходиться поряд з основним приймачем з низькою потужністю. Оскільки його енергоспоживання на кілька порядків нижче, ніж у традиційного приймача з низьким енергоспоживанням, WuR може бути постійно увімкненим, на відміну від циклічного режиму роботи основного радіомодулю.

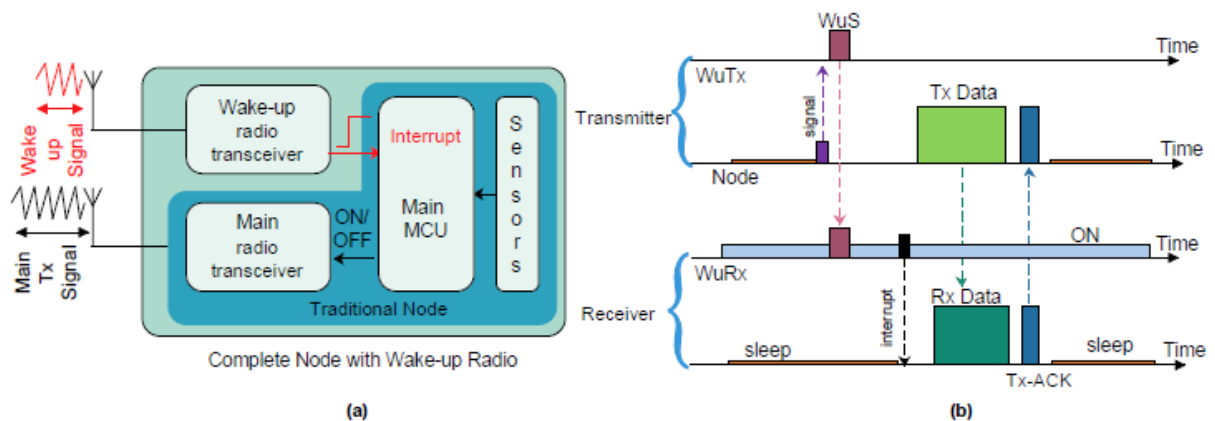


Рисунок 3.2 – (а) Загальна архітектура Wake-up Radio. Синя область вказує на традиційний вузол, інтегрований із функцією пробудження Радіо. (б) Дистанційне спрацьовування за допомогою схеми радіопробудження.

Один із способів використання WuR проілюстровано на рис. 3.2 (б). У цьому налаштуванні головне радіо зберігається в глибокому режимі сну або у вимкненому режимі, доки це не буде потрібно. Натомість, коли вузол має

пакет даних для відправки, він надсилає спеціальний пакет, відомий як сигнал пробудження (WuS), використовуючи передавач пробудження (WuTx).

Постійно ввімкнений приймач пробудження (WuRx) виявляє цей WuS і генерує переривання мікроконтролеру головного вузла, щоб перевести його з режиму сну в активний режим. Згодом головний мікроконтролер вмикає головний радіоприймач для обміну пакетами даних з іншим вузлом звичайним способом.

Цей простий і очевидний режим роботи став можливим завдяки недавнім досягненням у споживанні енергії CMOS елементів, що дозволяє як реалізацію аналогового інтерфейсу наднизької потужності для отримання WuS, так і цифровий компонент низької потужності, що використовується всередині WuR для декодування адреси [14].

3.3 Радіомодуль для пробудження. Особливості роботи

Як уже згадувалося раніше, прослуховування в режимі холостого ходу є значним фактором загального споживання енергії вузлами чергового циклу. Завдяки впровадженню WuRx із на порядок нижчим споживанням, підхід WuR мінімізує цю непотрібну втрату енергії, оскільки головне радіо та вузол будуть активовані лише тоді, коли буде фактична передача.

Крім того, деякі WuR додають схему для механізму адресації, який може бути використаний для вирішення проблеми підслуховування, декодуючи адресу, вбудовану в пакет, пробуджуючи лише певний вузол, а не всю околицю. Оскільки WuRx може бути постійно увімкненим, вузол може працювати чисто асинхронно, активуючи основну радіостанцію на вимогу, не вимагаючи безперервної передачі. Нарешті, оскільки час, необхідний для спрацьовування головного вузла, становить близько мілісекунд (мс), проблема затримки, з якою стикаються протоколи MAC з циклічним режимом роботи, також зменшується.

Незважаючи на те, що концепція WuR здається простою, а переваги - перспективними, впровадження апаратного забезпечення та його використання як частина більшої системи створює кілька викликів та компромісних варіантів.

На апаратному рівні досягнення прослуховування з дуже низьким енергоспоживанням обмежує обробку RX та компоненти, які можна використовувати в WuRx.

Суворі межі споживання енергії також обмежують вибір схем модуляції та складність приймача, що, як наслідок, обмежує чутливість приймача і, зрештою, досяжний діапазон зв'язку. Оскільки основне радіо спрацьовує WuR, це обмеження діапазону WuR за своєю суттю обмежує зв'язок, незалежно від можливостей основного радіо. У цьому відношенні були прийняті різні компроміси, починаючи від зосередження уваги на сценаріях короткого радіусу дії (Body Area Networks), до використання WuS, що не підпадають під діапазон, і до використання значно збільшеної потужності WuTx.

Що стосується протоколу MAC, то чисто асинхронна робота, що забезпечується постійно ввімкненим WuRx, значно спрощує дизайн протоколу. Однак необхідна розробка нових протоколів MAC для WuR, беручи до уваги подвійне налаштування радіо в архітектурі WuR.

3.4 Визначення характеристик і вимог

Технологічні та конструктивні аспекти WuR відіграють ключову роль у визначенні ефективності мереж датчиків низької потужності. Щоб WuR ефективно працював як частина більшої системи в багатокористувацькому середовищі, він повинен враховувати наступні конструктивні вимоги:

1. Споживання енергії. Найважливішою особливістю WuR є низьке споживання енергії в активному режимі. Насправді, оскільки його використання вимагає додавання нового обладнання поверх головного вузла,

сам пристрій повинен споживати не більше десятків мікروات. Зокрема, активна потужність WuR повинна бути нижче потужності головної радіосигналу [15], щоб забезпечити позитивний баланс між збереженою та використаною енергією. Це основна специфікація, що керує дизайном WuR .

2. Час прокидання. Вузол, прикріплений до WuR , повинен увімкнутись з мінімальною затримкою під час отримання WuS , щоб уникнути затримки, спричиненої мульти-стрибками до приймачу, і для підвищення загальної чутливості чисто асинхронної мережі. Системи, засновані на WuR , можуть отримати вигоду від ряду протоколів та додатків за умови низької затримки. Наприклад, програми в галузі охорони здоров'я мають суворі вимоги до латентності та не можуть підтримувати тривалі затримки через процедуру пробудження.

3. Помилкові пробудження та втручання. Якщо всі вузли в сенсорній мережі покладаються на одну і ту ж стратегію пробудження, коли $WuTx$ надсилає сигналувімкнення на вузол, це спрацьовує на всі вузли в околиці, що спричиняє значні втрати енергії.

Це спричиняє непотрібну активацію багатьох вузлів, яких слід уникати. Існує два можливих джерела помилкових пробуджень: 1) вузли прокидаються при отриманні WuS , призначеного для іншого вузла, і 2) завади від прилеглих пристроїв, що працюють на тій же частоті.

Для вирішення першого, WuR може використовувати адресування та декодування вузлів, щоб активувати лише передбачуваний вузол. Це дозволяє $WuRx$ уникнути генерування переривання, якщо WuS не був призначений для нього, однак він вносить складність і часто споживання в $WuRx$. По-друге, завади та фоновий шум, які можуть спричинити помилкові пробудження, повинні бути відфільтровані. $WuRx$ повинен мати достатню кількість можливостей локальної обробки, щоб диференціювати WuS від навколишніх завод, не використовуючи процесор основного вузла. Через низький бюджет

енергії можуть бути використані лише основні методи модуляції, що вимагають простої структури приймача [16]. Схеми модуляції, такі як безвідмовна маніпуляція (OOK), широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) або амплітудна маніпуляція (ASK), можуть бути використані для зменшення можливості завад пристроїв один одному. Преамбула може бути використана для диференціації шуму від дійсного WuS, таким чином уникаючи помилкових пробуджень.

Крім того, цільовий вузол не повинен пропустити WuS, оскільки повторні передачі є дорогими з точки зору споживання енергії та затримки. Щоб забезпечити це, WuRx можуть використовувати цикл зворотного зв'язку, такий як підтвердження WuS (WuS-ACK), що вказує на успішний прийом WuS.

4. Чутливість і діапазон. У дизайні WuR чутливість приймача є важливим параметром, оскільки забезпечує найнижчий рівень потужності, при якому приймач може виявити WuS.

Як правило, висока чутливість вимагає більшої енергоємної електроніки на стороні приймача, а отже, високої потреби в енергії. На відміну від цього, низька чутливість для того ж діапазону зв'язку вимагатиме високої потужності випромінювання на стороні передавача. Через це вимоги до чутливості часто призводять до надмірного проектування для забезпечення надійного зв'язку в несприятливих умовах.

Коли WuR використовується для спрацьовування радіостанції більшої потужності, в ідеалі він повинен мати однаковий діапазон. На жаль, це не розумно з огляду на обмеження потужності, тому більшість проектів WuR розраховані на десятки метрів дальності зв'язку для підтримки багатьох сценаріїв застосування [17].

Дуже короткі діапазони зв'язку роблять WuR непрактичним, оскільки для покриття короткої відстані багатоплановим способом, що збільшує витрати на вузол та енергію, потрібна висока щільність вузлів. Іншим побічним ефектом короткого діапазону зв'язку є збільшення кількості повідомлень про кількість переходів, які потрібно пройти, щоб досягти приймача, збільшуючи загальну затримку даних. Діапазон пробудження, якого можна досягти за допомогою більшості сучасних конструкцій WuR, становить, як правило, близько 30 м. Значення, яке можна поліпшити, використовуючи такі методи, як рознесення антен [18] та спрямовані антени [19].

5. Швидкість передачі даних. Загальні витрати енергії вузла є не тільки функцією властивостей фізичного рівня, таких як несуча частота, радіотехнічна архітектура та вибір антени, але також функцією кількості часу, витраченого радіостанцією на доставку пакету даних за повітря. Цей час залежить від швидкості передачі даних, що підтримується WuTx, і накладних витрат протоколу для встановлення та підтримки зв'язку. Таким чином, швидкість передачі даних є одним із ключових факторів, що визначають споживання енергії WuR. Наприклад, WuR зі швидкістю 100 кбіт / с буде споживати майже половину потужності WuR із 50 кбіт / с для того самого розміру корисного навантаження. Для WuTx з низькою швидкістю передачі даних бітова тривалість і потужність, необхідна для передачі WuS, будуть значно вищими. Завдяки більшій бітовій тривалості модуляція триматиме передавач активним протягом більш тривалого часу. На стороні WuRx час і енергія, необхідні для генерації переривання пробудження, також будуть значно вищими, оскільки приймач і схема демодуляції будуть активними до закінчення передачі. Більш висока швидкість передачі даних може розглядатися як спосіб підвищення енергоефективності та досягнення швидшого пробудження. Хоча висока швидкість передачі даних зменшує затримку пробудження, більша тривалість бітів збільшує діапазон зв'язку та

надійність WuS. При меншій швидкості передачі даних вища енергія на біт, що відображається передавачем, може накопичуватися WuRx під час отримання WuS. WuR не вимагає високої швидкості передачі даних, особливо якщо вона використовується лише як пристрій запуску, оскільки лише кілька байтів даних вимагаються.

6. Вартість та розмір. Щоб інтегрувати WuR в існуючі вузли датчиків, це повинно бути економічно вигідним. Щоб зробити WuR здійсненним [20], вартість цього додаткового обладнання повинна бути в межах 5-10% від вартості повного вузла датчика. Тим не менше, це вимога, яку можна здобути, оскільки деякі програми можуть підтримувати більші витрати, якщо виграш буде достатнім. Крім того, стандартні готові компоненти можуть бути використані для пришвидшення розробки та зменшення загальних витрат порівняно з розробкою єдиного мікросхемного рішення.

7. Частоти, що використовуються. Нарешті, конструкції WuR повинні дотримуватися регулювання частоти в промислових, наукових та медичних діапазонах (ISM). Він також повинен відповідати стандартам зв'язку, таким як максимально дозволена ефективна випромінювана потужність (ERP), що використовується для передачі WuS.

3.5 Архітектура WuRs

Загальна архітектура для WuR та будівельні блоки, які складають повне апаратне рішення. Функціональність різних апаратних компонентів, а також те, як ці пристрої можуть житися та взаємодіяти з традиційними вузлами датчиків. Представлення систематики WuR, проілюстрованої на рис. 3.3, що показує кілька вимірів, які відрізняють конструкції один від одного.

Хоча WuR можуть бути побудовані різними способами, кожен із яких характеризується різними характеристиками та особливостями, є деякі загальні будівельні блоки, що використовуються у всіх конструкціях.

Визначено два розрізнені підходи до реалізації, тобто прототипи, сконструйовані з використанням готових дискретних компонентів, та реалізації, які використовують технологію CMOS для побудови інтегральних схем. Енергоспоживання є одним із рушійних факторів використання WuR завдяки енергозбереженню, яке воно може забезпечити. Як правило, реалізації CMOS досягають покращеної продуктивності, оскільки вони краще інтегрують всі компоненти безпосередньо на кремній, тобто більш щільні інтегральні схеми призводять до менших розмірів мікросхеми для тієї ж функції, отже, споживаючи менше енергії. З іншого боку, при використанні дискретних компонентів існує більше обмежень для кожного окремого компонента, вибраного для побудови схеми, що призводить до гіршої середньої продуктивності, ніж конструкції на основі CMOS.

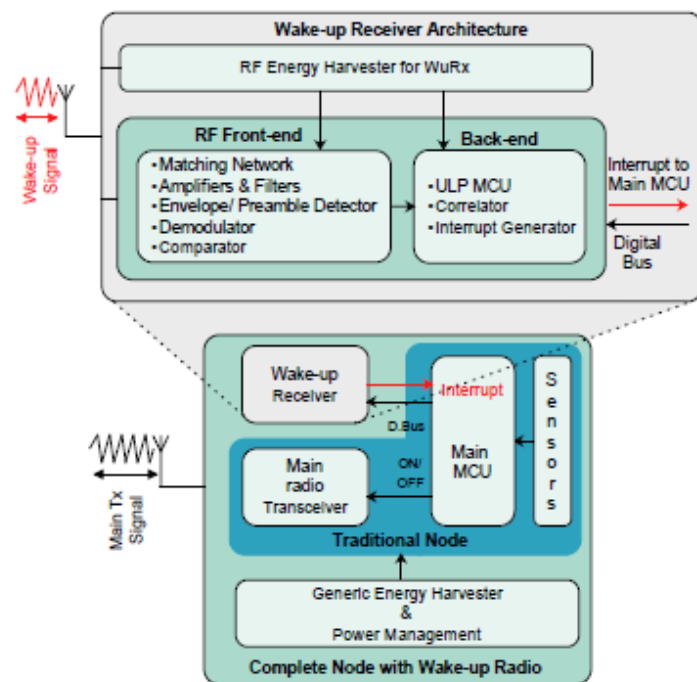


Рисунок 3.3 – Сучасна архітектура та різні функціональні блоки, які утворюють повний WuRx. Ця архітектура розділена на два розділи: RF-інтерфейс та інтерфейс.

WuS спочатку приймається RF-інтерфейсом через антену, а потім проходить через відповідну мережу, яка фільтрує та посилює вхідний WuS.

Після узгодження вхідних даних детектор огибаючої виявляє сигнал і перетворює його на сигнал базової смуги, роблячи схему простішою та енергоефективнішою. Потім сигнал проходить через підсилювачі, часто підсилювач з низьким рівнем шуму (LNA) для підвищення чутливості приймача, підсилюючи слабкі сигнали, відповідаючи вимогам до шуму. LNA домінує з точки зору споживання енергії.

Тому під час розробки WuRx з наднизькою потужністю важливо усунути деякі, якщо не всі, з цих вискоелективних ВЧ-компонентів, щоб зменшити споживання енергії. Помножувач напруги випрямляє радіочастотну енергію і перетворює цей вхідний сигнал у сигнал постійного струму (постійного струму). Зазвичай множник напруги будується за допомогою каскадних конденсаторів та діодів Шоттки з нульовим зміщенням. Чим більше енергії в радіочастотному сигналі, тим більша зміна напруги на виході випрямляча, що сприймається за допомогою компаратора. Коли для спрацьовування компаратора достатньо енергії, сервер може видавати переривання головному мікроконтролеру. Цей сервер може також складатися з мікроконтролера або корелятора наднизької потужності, який декодує та фільтрує адресу вузла та генерує переривання.

З енергетичної точки зору, однією зізавад є забезпечення достатньої кількості енергії для роботи цих пристроїв у самодостатньому режимі без частої заміни батарей. Одним з підходів для досягнення цього є бездротовий збір енергії (WEN). Як показано на рис. 3.3, підсистема може включати один або кілька комбайнів енергії, які перетворюють навколишню енергію в електричну. Збирач загальної енергії модуль, який може жити весь вузол (включаючи WuRx, основний трансивер, основний мікроконтролер та датчики), використовуючи різні джерела енергії, такі як магнітні, сонячні, вітрові та механічні вібрації. Також може бути використаний окремий автономний РЧ-комбайн, призначений лише для WuRx, що робить підсистему повністю пасивною, тобто енергію можна відбирати від самої вхідної WuS.

Блок RF-ЕН складається з антени та блоку управління живленням (PMU). PMU в основному контролює потужність, що подається на інші блоки WuRx. У деяких додатках можна безпосередньо жити WuRx, використовуючи вироблену енергію з WuS без накопичення енергії, однак це може бути не життєздатним рішенням. Альтернативою може бути включення накопичувального компонента, такого як акумуляторні батареї або суперконденсатори, що діють як буфер енергії для підсистеми. Основною метою цього компонента зберігання буде накопичення та збереження накопиченої енергії для подальшого використання, підтримуючи тим самим зміни рівня ВЧ потужності, що випромінюється WuTx. Діапазон пробудження є відносно коротким через втрату вільного простору, низьку чутливість та ефективність збирання енергії на WuRx. В результаті WuS зазвичай передається з великою потужністю. Передавач пробудження, який, як правило, також відіграє важливу роль з системної точки зору. Розглянемо зміст WuS, структура пакетів якого повинна відповідати вимогам відповідності та стандартам, що використовуються різними технологіями. Нещодавно були зроблені спроби [21] стандартизувати це для WuR у медичних програмах.

Типовий пакет WuS проілюстрований на рис. 3.4:

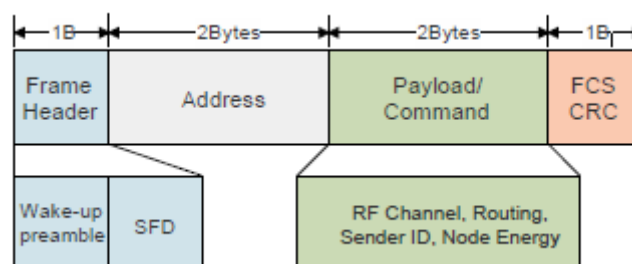


Рис. 3.4 – Типова структура пакету сигналів пробудження.

1. Заголовок кадру. Заголовок кадру складається з преамбули пробудження та роздільника початкового кадру (SFD), стандартного шаблону байтів, узгодженого між передавачем і приймачем. Преамбула містить набір

бітів, які дозволяють передавачу та приймачу синхронізувати свої бітові інтервали, а SFD вказує приймачу фактичний початок кадру та час, коли починати декодування вмісту пакету. Розмір SFD зазвичай встановлюється на рівні 1В.

2. Адреса. Необов'язкове поле адреси містить ідентифікатор вузла призначення для ідентифікації передбачуваного приймача. Хоча в більшості приладів використовується ідентифікатори вузлів розміром до 2 байт [22], розмір цього поля може змінюватися залежно від можливостей WuRx.

3. Корисне навантаження / Команди. Це поле містить фактичні дані програми, команду або додаткові інструкції, визначені користувачем або програмою.

4. Виявлення помилок. Нарешті, для перевірки цілісності даних застосовується послідовність перевірки кадру (FCS) із використанням коду циклічного надлишку (CRC). Простий CRC забезпечує високий ступінь виявлення помилок на високій швидкості.

3.6 Ключові застосування

Протягом останніх років застосування Wireless Sensor Network WSN розширювалось, починаючи від контролю природних явищ, таких як температура та вологість, до особистого здоров'я. З поширенням низької потужності та дешевих напівпровідників, як очікується, WSN набудуть ще більшої популярності [23].

З розумінням надзвичайно низької потужності WuR, побудованої в попередніх розділах, розглянемо декілька застосувань, даної надбудови у мережі Інтернету речей.

1. Бездротова мережа для вимірювання характеристик тіла (Wireless Body Area Networks, WBAN)

Бездротова мережа для вимірювання характеристик тіла (WBAN), які знаходять застосування в медичних програмах і, отже, вимагають високої надійності. Щоб підтримувати різноманітні програми в приладі, системи повинні мати низьке енергоспоживання та підтримувати змінну швидкість передачі даних [24]. Як приклад останнього, для моніторингу рівня глюкози потрібно менше 1 кбіт / с, тоді як під час ЕКГ швидкість може досягати 192 кбіт / с [24]. Крім того, зв'язок WBAN може бути періодичним, керованим подіями, наприклад, ініціюватися виявленням стану попередження або на вимогу, наприклад, у відповідь на зовнішній запит лікаря про отримання збережених даних. Технологію WuR можна застосувати двома основними способами.

По-перше, його можна використовувати як тригер для ініціації зв'язку з високою швидкістю передачі даних. Крім того, його можна використовувати як радіостанцію передачі даних із низьким тарифом споживання [25]. Примітно, що для цих програм короткий діапазон не є проблемою [26], і надзвичайно низьке споживання в режимі очікування є основною перевагою. Наприклад, чутливості приймача -40 дБм достатньо для прийому сигналу, що передається з 0 дБм. З низьким попитом на чутливість енергоефективні WuR можуть бути реалізовані як проста топологія зірок із кількістю вузлів, як правило, від двох до десяти.

З точки зору розробки системи, існує кілька протоколів MAC з підтримкою WuR, спеціально розроблених для додатків WBAN. Щоб запропонувати високу швидкість передачі даних та низьку затримку, усі ці постійно активовані MAC-адреси.

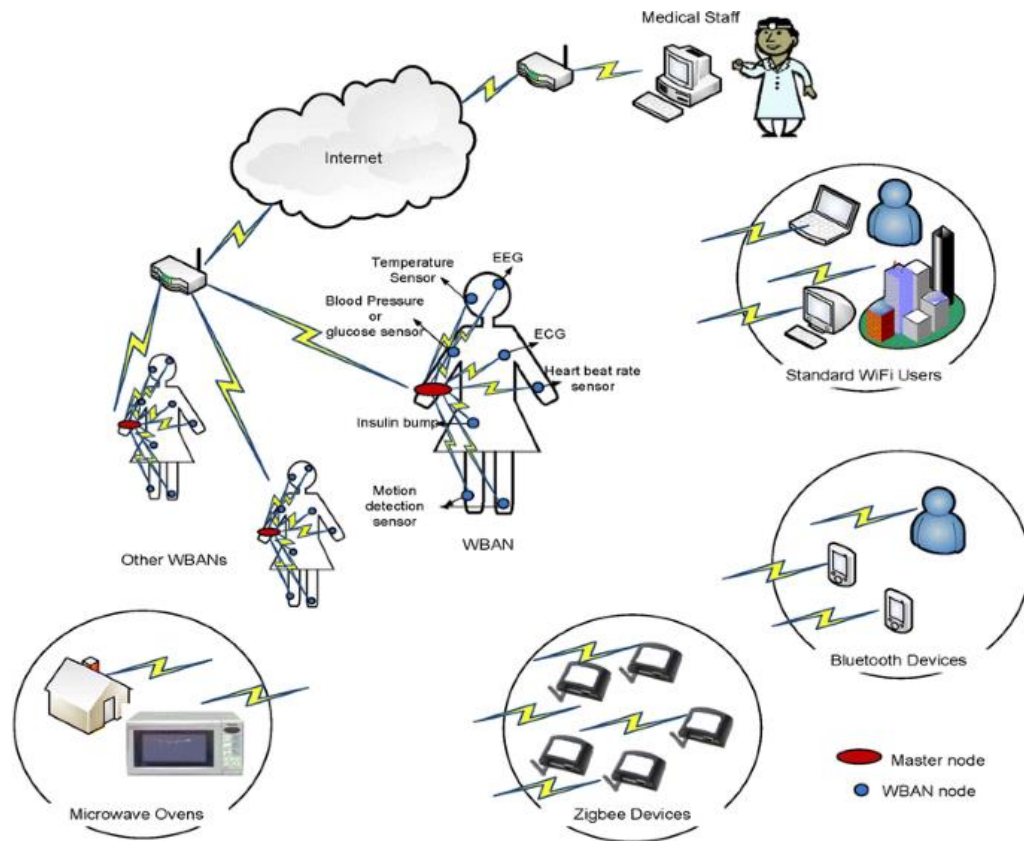


Рисунок 3.5 – Бездротова мережа для вимірювання характеристик тіла

Однак, протоколи MAC, які придатні для WBAN, повинні бути двонаправленими, щоб аномалії могли повідомлятися ефективно та на вимогу. Для передачі даних програми WBAN вимагають або зіркової, або однохопкової мережі, тому складний протокол маршрутизації не є важливим.

2. Розумне місто

Концепція Розумного міста зростає в популярності, оскільки датчики, розміщені в усіх містах, використовуються для підтримки як державного управління, так і безпосередньо громадян. Велика кількість розміщених датчиків використовує бездротовий зв'язок і працює від батареї, що дозволяє їх розміщувати в умовному плані. Тим не менше, це вимагає роботи з низькою потужністю.

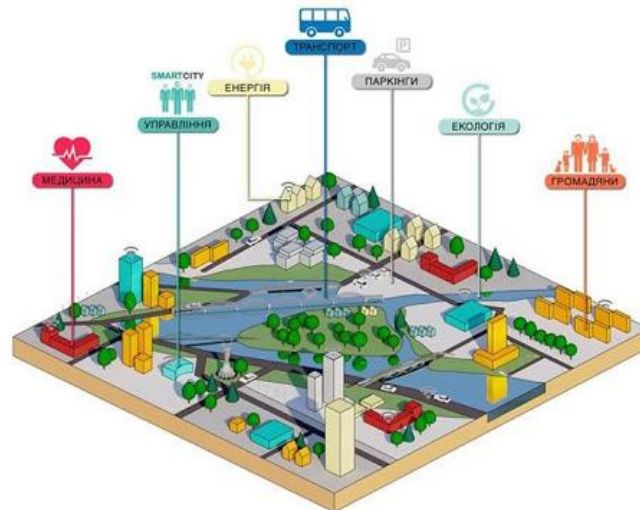


Рисунок 3.6 – Розумне місто

Сьогодні більшість розумних міських вузлів обмінюються бездротовим доступом за різними посланнями, такими як IEEE802.15.4, IEEE802.15.4g, IEEE802.15.1 (Bluetooth) або малопотужний 802.11 [27]. WuRs можуть зіграти вирішальну роль, зробивши ці мережі більш енергоефективними, масштабованими та автономними. Наприклад, може бути побудований корпус з одним стрибком, в якому мобільний збирач даних, наприклад, автобус або сміттєвоз, обладнаний WuR. Цей мобільний збирач даних об'їжджає місто та збирає інформацію з сенсорних вузлів, заснованих на WuR, розміщених уздовж його маршруту. Вузли зондування будуть активовані лише тоді, коли мобільний збирач даних надсилає WuS із запитом до цих вузлів дані (на вимогу).

Моніторинг інфраструктури також можливий за допомогою використання WuR у багатоступеневому порядку [28]. Стаціонарний або мобільний збирач даних може збирати дані з ланцюга датчиків, прикріплених до мосту, тунелю або просто вздовж вулиць. WuR дозволяє вузлам зондування більшої потужності залишатися в режимі низької енергії, коли немає даних для надсилання. Однак інстанціація цього сценарію вимагає вирішення невідповідності між типовою відстанню WuR і дальністю первинного радіо.

Для того, щоб WuR був придатним для інтелектуальних міських програм, він повинен підтримувати розумну швидкість передачі даних, великий діапазон зв'язку для більш широкого охоплення та роботи з низьким енергоспоживанням. WUR, що не належать до радіочастот, не підходять через вимоги, що пред'являються апаратним забезпеченням, такі як чутливість та LOS для оптичних систем.

Датчики, розміщені в розумному місті, можуть повідомляти періодичні дані або дані на вимогу з різними навантаженнями на транспорт. Це додає додатковий критерій надійності на додаток до охоплення та швидкості реагування. Наприклад, системи моніторингу інфраструктури вимагають швидкого реагування та повинні бути енергоефективними. Тобто, події слід швидко виявляти та надійно повідомляти їх енергоефективним способом за допомогою багатокористувацької мережі для подальшої обробки.

Датчики, які можуть покладатися на технології збору енергії, можуть використовувати SLAM, WUR-TICER і DoRa як основний MAC. Якщо конкретний вузол потрібно запитувати, застосовуються двонаправлені MAC, такі як WMAC. Для періодичного зондування, де вузли можна вимкнути під час періодів бездіяльності, слід враховувати MAC пробудження робочого циклу.

Через певну тривалість вузли можуть вийти з ладу через виснаження батареї або інші зовнішні фактори, отже, потрібно встановити нові маршрути. Отже, протоколи маршрутизації повинні бути адаптивними та забезпечувати підтримку збору даних із кількох стрибків. Для швидкого розповсюдження даних слід прийняти протоколи затоплення мережі, такі як ZIPPY та FLOOD-WUP.

3. Розумне вимірювання



Рисунок 3.7 – Розумне вимірювання

Розумні лічильники забезпечують віддалене бездротове зчитування поточних значень лічильників, усуваючи необхідність перевірки техніком кожного. Типові установки сьогодні розміщують на лічильнику блок бездротового зв'язку від мережі, а мобільний блок, який несе технік, у мобільному транспортному засобі. Незважаючи на те, що це економить час і енергію техника для відвідування кожного лічильника, саме радіо повинно мати живлення, щоб очікувати сигнал зчитування.

Натомість, комунальний лічильник, оснащений WuRx [29], може бути активований за запитом, вимагаючи нульового або майже нульового споживання між показаннями. Щоб бути прийнятним, рішення має мати наднизьке споживання (10+ років автономної роботи при 1 зчитуванні на місяць). Оскільки лічильники комунальних послуг зазвичай розміщуються всередині будівлі, вони також повинні мати гарне проникнення радіосигналу та високу чутливість, що працюють на частоті нижче ГГц. Зазвичай потрібна відстань зв'язку 15 м.

Відповідно до стандартів зв'язку для інтелектуального вимірювання в Європі [30], максимально допустима ефективна випромінювана потужність (ERP) в діапазоні 868 МГц становить 25 дБм. Приймач з мінімальною чутливістю -75 дБм зможе приймати пакети на відстані 15 м. Необхідна швидкість передачі даних для програм інтелектуального вимірювання є помірною, підтримуючи швидкість передачі даних від 2,4 до 200 кбіт / с.

Більше того, WuR повинен мати адресувальну здатність, щоб запитувати конкретний розумний лічильник з його унікальним серійним номером.

Однак здебільшого лічильники з підтримкою WuR будуть зв'язуватися з колектором одноразово, тоді складні протоколи маршрутизації не підходять, але вимагають підтримки наскрізної надійності з вузлами, які мають бути унікально ідентифіковані.

3.7 Конструкція та специфікація AS3933

AS3933 [47] – приймач амплітудної маніпуляції з низьким енергоспоживанням (ASK), здатний генерувати переривання пробудження під час виявлення сигналу даних на несучій частоті від 15 кГц до 150 кГц. Плата WuRx може працювати з використанням одного, двох або трьох активних каналів, як показано на блок-схемі на рисунку 2.17. Способом зробити прийом незалежним від орієнтації приймача є увімкнення трьох каналів, тобто трьох ортогональних котушкових антен; котушкова антена з кращим прийомом – це антена, яка забезпечує вхідний сигнал для роботи IC. Якщо така тривимірна детекція не потрібна, можна деактивувати один або кілька каналів або навіть експлуатувати їх із циклічним режимом роботи 50%, 33%, 20% або 11% з метою економії енергії. AS3933 WuRx включає вбудований корелятор для додаткової реалізації схеми декодування адреси пробудження 16/32 біт. Цей WuRx має максимальну чутливість -69 дБм [47].

Стосовно синхронізуючого сигналу (CLK), то система WuRx приймає зовнішній тактовий сигнал, кристалічний генератор або власний внутрішній, названий відповідно LC-генератором, Xtal RTC та RC-OSC.

Обране джерело сигналу CLK визначає споживання струму WuRx. Відповідно до специфікацій таблиці, споживання струму в стандартному режимі прослуховування з трьома активними каналами та кристалічним генератором, як CLK, становить 8,9 мкА. Натомість споживання зменшується до 8,3 мкА у разі використання RC-OSC для тактової частоти.

Схема AS3933 WuRx здатна виявляти наявність індуктивного зв'язаного носія та витягувати оболонку WuC. Далі вміст кадру корелюється із запрограмованим шаблоном. Якщо отримане значення відповідає збереженій адресі вузла, генерується запит переривання пробудження (мітка IRQ на рисунку 3.8).

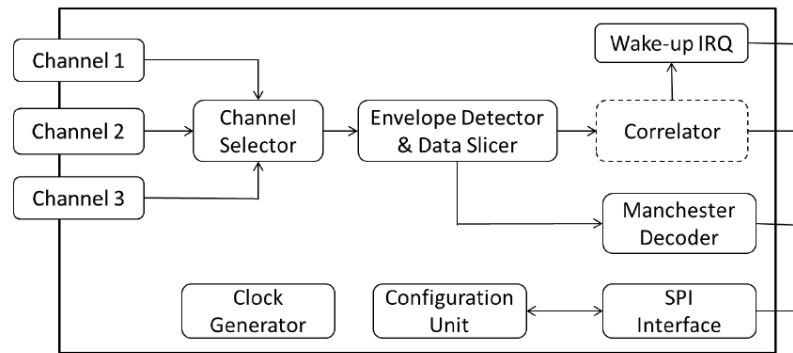


Рисунок 3.8 – Блок-схема AS3933. Використання корелятора необов'язкове.

Таку кореляцію можна обійти, і в цьому випадку процедура пробудження виконує лише виявлення несучої частоти, як у випадку SuA-WuRx. Апаратні плати показані на рисунку 3.9. Зверніть увагу на тривимірну систему котушок у верхній частині WuRx.

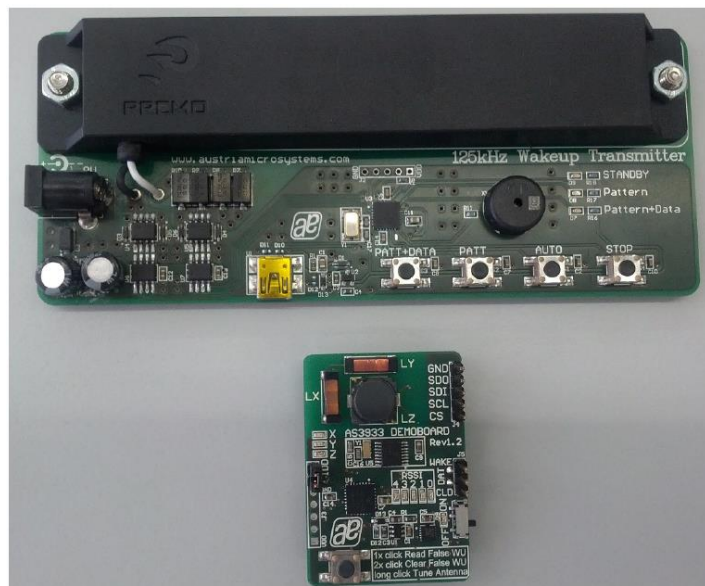


Рисунок 3.9 – AS3933 WuTx (зверху) та WuRx (знизу)

Проведені вимірювання поточного споживання всієї плати WuTx вказують на максимальне споживання струму 0,8 А при передачі одного WuC.

Що стосується плати AS3933 WuRx, вона включає спеціальну перемичку, яка дозволяє вимірювати струм лише IC, а не всієї плати. Вимірні значення споживання струму 6,3 мкА та 6,4 мкА наближаються до значення 6,5 мкА в [24*] для конфігурації, що включає три активні канали сигналу та кристалогенератор як джерело CLK. Під час декодування WuC поточне значення споживання зростає до 12 мкА [46].

Висновки до розділу

Розглянуто протоколи MAC з циклічним режимом роботи, що застосовують цикли сну або роботи для економії енергії, переводячи вузли в режим сну в очікуванні сеансу зв'язку.

Розглянуто радіомодуль для пробудження, як нове апаратне рішення з енергоспоживанням на прослуховування на порядок нижче, ніж у радіопристроїв з низьким енергоспоживанням з можливістю безперервного прослуховування ефіру. Технологічні та конструктивні аспекти WuR відіграють ключову роль у визначенні ефективності мереж датчиків низької потужності й враховує наступні конструктивні вимоги: споживання енергії; час прокидання; помилкові пробудження та втручання; чутливість і діапазон; швидкість передачі даних; вартість та розмір; частоти, що використовуються. Розглянуто типову структуру пакету сигналів пробудження.

На апаратному рівні досягнення прослуховування з дуже низьким енергоспоживанням обмежує обробку RX та компоненти, які можна використовувати в WuRx. Суворі межі споживання енергії також обмежують вибір схем модуляції та складність приймача, що, як наслідок, обмежує чутливість приймача і, зрештою, досяжний діапазон зв'язку. Оскільки основне радіо спрацьовує WuR, це обмеження діапазону WuR за своєю суттю обмежує зв'язок, незалежно від можливостей основного радіо.

ВИСНОВКИ

Інтернет речей розвивається і впливає на повсякденне життя. Сфера застосування поширюється, на сьогодні зустрічаються системи з різною складністю вирішень поставлених в програмному і апаратному рішень, але притримуючись встановлених вимог до дизайну приладів та архітектури систем. В основному популяризують системи із малим енергоспоживанням, оскільки дані системи економічно вигідніші, ніж звичайні комунікаційні мережі й зважаючи на той факт, що дані мережі надсилають лише короткі повідомлення з інтервалом в декілька годин, то пропускну здатністю нехтується.

Розглянуто основні технічні характеристики трьох поширених систем Інтернету речей таких, як LoRa, NB-IoT і ZigBee, та методи якими забезпечено зменшення енергоспоживання для кожної із технологій, а саме:

- LoRa: типі кінцевих пристроїв класу А, також через зменшення потоків даних, які відправляються із сталим періодом;
- NB-IoT: три режими роботи, а саме PSM, eDRX, HLCOM;
- ZigBee: декілька режимів роботи кінцевих пристрої сплячий кінцевий пристрій; мобільний кінцевий пристрій.

Використання радіомодуля для пробудження має на меті запропонувати нове апаратне рішення з енергоспоживанням на прослуховування на порядок нижче, ніж у радіопристроїв з низьким енергоспоживанням з можливістю безперервного прослуховування ефіру.

Незважаючи на те, що концепція WuR здається простою, а переваги - перспективними, впровадження апаратного забезпечення та його використання як частина більшої системи створює кілька викликів та компромісних варіантів.

На апаратному рівні досягнення прослуховування з дуже низьким енергоспоживанням обмежує обробку RX та компоненти, які можна використовувати в WuRx.

Суворі межі споживання енергії також обмежують вибір схем модуляції та складність приймача, що, як наслідок, обмежує чутливість приймача і, зрештою, досяжний діапазон зв'язку. Оскільки основне радіо спрацьовує WuR, це обмеження діапазону WuR за своєю суттю обмежує зв'язок, незалежно від можливостей основного радіо. У цьому відношенні були прийняті різні компроміси, починаючи від зосередження уваги на сценаріях короткого радіусу дії (Body Area Networks), до використання WuS, що не підпадають під діапазон, і до використання значно збільшеної потужності WuTx.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. What Is LoRa®? *Semtech*: веб-сайт URL: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora> (дата звернення:25.05.2021)
2. Eric B. LoRa –2018 рік, веб-сайт URL: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/> (дата звернення: 23.05.2021 р.)
3. Що таке інтернет речей? *Internet of Things*: веб-сайт. URL: <http://iot.lviv.ua/що-таке-інтернет-речей/> (дата звернення:21.05.2021)
4. Кілька найпопулярніших сфер використання інтернету речей і де можна здобути потрібну освіту. *Національний університет «Львівська політехніка»*: веб-сайт. URL: <https://lpnu.ua/news/kilka-naipopuliarnishykh-sfer-vykorystannia-internetu-rechei>(дата звернення: 21.05.2021)
5. The 4 Stages of IoT Architecture. *DIGI*: веб-сайт. URL: <https://www.digi.com/blog/post/the-4-stages-of-iot-architecture> (дата звернення: 23.05.2021)
6. IoT Architecture: the Pathway from Physical Signals to Business Decisions. *Altexsoft*: веб-сайт. URL: <https://www.altexsoft.com/blog/iot-architecture-layers-components/>(дата звернення: 26.05.2021)
7. An In-depth look at LoRaWAN. *LoRa Developer portal*: веб-сайт. URL: <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lorawan-class-a-devices/> (дата звернення: 28.05.2021)
8. Narrowband – Internet of Things (NB-IoT). *4G LTE Mall*: веб-сайт. URL: <https://www.4gltmall.com/blog/narrowband-internet-of-things-nb-iot/>(дата звернення: 28.05.2021)
9. Що таке Zigbee? - ідеї розумного будинку. *Romsat*: веб-сайт. URL: <https://romsat.ua/company/news/ideya-rozumnogo-budinku-zigbee/>(дата звернення: 28.05.2021)

10. ZigBee applications – Part 1: Sending and receiving data. *EETime*: веб-сайт. URL: <https://www.eetimes.com/zigbee-applications-part-1-sending-and-receiving-data/#> (дата звернення: 28.05.2021)
11. Безпека IoT починається з ідентифікації. *Вебтраст Україна*: веб-сайт. URL: https://iot-ssl.com.ua/iot_secure.html (дата звернення: 28.05.2021)
12. Конкуруючі технології. *iTech*: веб-сайт. URL: <https://itechinfo.ru/content/конкурирующие-технологии> (дата звернення: 28.05.2021)
13. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *Science Direct*: веб-сайт. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061> (дата звернення: 28.05.2021)
14. Ultra Low Power Wake-Up Radios: A Hardware and Networking Survey / Rajeev Piyare, Member, Amy L. Murphy та інші. *IEEE* 2017.42 с.
15. Mercier P. P., Chandrakasan A. P., Ultra-low-power Short-range. Springer International Publishing, 2015. 394 с
16. Le-Huy P., Roy S., Low-Power Wake-Up Radio for Wireless Sensor Networks, *Mobile Networks and Applications*, vol. 15, no. 2, 2010. С. 226–236.
17. der Doorn B. V., Kavelaars W., Langendoen K., A Prototype Lowcost Wakeup Radio for the 868 MHz Band, *International Journal of Sensor Networks*, 2009. vol. 5, no. 1. С. 22–32.
18. Kumberg T., Tannhaeuser R., Reindl L. M., Using Antenna Diversity to Improve Wake-up Range and Probability, *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, 2015.vol. 2091.С. 2779–2783.
19. Shih W.-C., Jurdak R., Abbott D., Chou P. H., Chen W.-T., A Long-Range Directional Wake-Up Radio for Wireless Mobile Networks, *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2015. vol. 4, no. 3. С. 189–207.

20. Demirkol I., Ersoy C., Onur E., Wake-up receivers for wireless sensor networks: benefits and challenges, *IEEE Wireless Communications*, 2009. vol. 16, no. 4, C. 88–96.
21. Hong C. S., Ameen M. A., Moon S. I. Emergency Communication for Low Energy Body-Centric Wearable Networks, Internet *Engineering Task Force, Internet- Draft* 2016,
22. Ansari J., Pankin D., Mähönen P., Radio-triggered Wake-ups with Addressing Capabilities for Extremely Low Power Sensor Network Applications, *International Journal of Wireless Information Networks*, 2009.vol. 16, no. 3. C. 118–130.
23. Rashid B., Rehmani M. H. Applications of Wireless Sensor Networks for Urban Areas: A Survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016. vol. 60. C. 192 – 219.
24. Cavallari R., Martelli F., Rosini R., Buratti C., Verdone R. A Survey on Wireless Body Area Networks: Technologies and Design Challenges, *Communications Surveys & Tutorials IEEE*, 2014. vol. 16,no. 3.C. 1635–1657.
25. Sthapit P., Pyun J.-Y. Effects of Radio Triggered Sensor MAC Protocol over Wireless Sensor Network. Computer and Information Technology (CIT), *IEEE 11th International Conference on. IEEE*, 2011. C. 546–551.
26. Patel M., Wang J. Applications, Challenges, and Prospective in Emerging Body Area Networking Technologies, *IEEE Wireless Communications Magazine*, 2010. vol. 17, no. 1 C. 80–88.
27. Dohler M., Watteyne T., Winter T., Barthel D. Routing Requirements for Urban Low-Power and Lossy Networks, *IETF, RFC 5548*, 2009.
28. Kumberg T., Kokert J., Younesi V., Koenig S., Reindl L. M. Wake-up transceivers for structural health monitoring of bridges. *SPIE Smart Structures and*

Materials+Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 2016 vol. 9804. International Society for Optics and Photonics, C. 98 041S–98 041S–9.

29. Gamm G. U., Reindl L. M. Smart Metering using Distributed Wake-up Receivers. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE International. IEEE*, May 2012, C. 2589– 2593.

30. Chang K.-H., Mason B. The IEEE 802.15.4g Standard for Smart Metering Utility Networks,” in Smart Grid Communications (Smart Grid Comm), *IEEE Third International Conference on. IEEE*, Nov 2012, C. 476–480.

31. NB-IoT: як це працює? Частина 2. *Habr*: веб-сайт. URL: https://habr.com/en/company/ru_mts/blog/431648/ (дата звернення: 30.05.2021)

32. Foubert B., Mitton N. Long-Range Wireless Radio Technologies: A Survey *Future Internet* 2020, 16 с

33. 5G—The High-Speed Mobile Network of the Future. *Infineon*: веб-сайт. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/mobile-communication-5g/> (дата звернення: 01.06.2021).

34. GSMA. 5G Spectrum GSMA Public Policy Position; Technical Report; GSMA: London, UK, 2019. с. 12.

35. Liberg, O., Sundberg M., Wang Y.P.E., Bergman J. 5G and the Internet of Things. In Cellular Internet of Things; Elsevier. The Netherlands, Amsterdam 2018. с. 361–366.

36. 3GPP Low Power Wide Area Technologies. *GSMA white paper*: веб-сайт. URL: <https://www.gsma.com/iot/resources/3gpp-low-power-wide-area-technologies-white-paper/> (дата звернення: 02.06.2021).

37. State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. *NCBI*: веб-сайт. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4883399/#sec2-sensors-16-00708> (дата звернення: 31.05.2021).

38. Xiong X., Zheng K., Xu R., Xiang W., Chatzimisios P. Low power wide area machine-to-machine networks: Key techniques and prototype. *IEEE Commun. Mag.* 2015. C. 53,64–71.

39. Wang F., Liu J. Networked wireless sensor data collection: Issues, challenges, and approaches. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2011. C. 673–687.

40. Chen D., Brown J., Khan J.Y. An interference mitigation approach for a dense heterogeneous wireless sensor network; Proceedings of the 9th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS); Cairns, Australia. 14–16 December 2015. C. 1–7.

41. Mekikis P.-V., Antonopoulos A., Kartsakli E., Lalos A.S., Alonso L., Verikoukis C. Information Exchange in Randomly Deployed Dense WSNs With Wireless Energy Harvesting Capabilities. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2016. C.3008–3018.

42. Vambase S.V., Mangalwede S.R. Cooperative clustering protocol for mobile devices with bluetooth and Wi-Fi interface in mLearning; Proceedings of the 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC); Ghaziabad, India. 22–23 February 2013; C. 505–510.

43. Younis O., Krunz M., Ramasubramanian S. Node clustering in wireless sensor networks: Recent developments and deployment challenges. *IEEE Netw.* 2006. C. 20–25.

44. Wolff R., Andrews E. Broadband access, citizen enfranchisement, and telecommunications services in rural and remote areas: A report from the american frontier (Topics in Wireless Communications) *IEEE Commun. Mag.* 2010. C.48:128–135.

45. A Survey on MAC Protocols for Duty-cycled Wireless Sensor Networks
Science Direct: веб-сайт. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705091503495X>(дата звернення: 2.06.2021).

46. Joaquim Oller i Bosch. Wake-up Radio Systems: Design, Development, Performance Evaluation and Comparison to Conventional Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks / A thesis submitted in partial fulfillment for the degree of Doctor of Philosophy Universitat Politecnica de Catalunya 2015. С. 205

47. Austria Microsystems, \AS3932/AS3933 LF detector ICs Datasheet," AMS: веб-сайт. URL: <http://www.ams.com/eng/acceptpolicy/information/66224/570460/AS3933Datasheet EN v2.pdf> (дата звернення: 2.06.2021)

48. Nasralla M.M., Ognenoski O., Martini M.G. Bandwidth scalability and efficient 2D and 3D video transmission over LTE networks; *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*; Budapest, Hungary. 9–13 June 2013; С. 617–621.

49. Lin F., Liu Q., Zhou X., Chen Y., Huang D. Cooperative differential game for model energy-bandwidth efficiency tradeoff in the Internet of Things. *China Commun.* 2014. С. 92–102.

50. Zhang H., Jiang C., Mao X., Chen H.-H. Interference-limited resource optimization in cognitive femtocells with fairness and imperfect spectrum sensing. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2016. С.1761–1771.

51. Zhang H., Liu H., Jiang C., Chu X., Nallanathan A., Wen X. A practical semidynamic clustering scheme using affinity propagation in cooperative picocells. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2015. С.4372–4377.

52. Технологія LoRa. *Habr*: веб-сайт. URL: <https://habr.com/en/company/realtrac/blog/304312/> (дата звернення: 2.06.2021)

Додаток А
SUMMARY

ABSTRACT

Internet of things is be introduced into everyday life every day. Each "smart" device is the owner of a set of specifications that must support strict requirements for power consumption, equipment life and data rates. Now, there are additional technologies that in this case reduce energy consumption. This is a separate additional radio module that wakes up the main end devices, reducing the main cost of electricity.

The first section presents of the basic concepts, as well as strict requirements for Internet of Things technologies. The Internet of Things requires a multi-layered approach to security, which will constantly change as new problems arise. Public Key Infrastructure (PKI) is one of the security technologies based on standards and tested today on devices that ensures the security of devices connected to the network. The main technologies of communication between devices that make up the Internet of Things are considered. There are several types of networks used in the Internet of Things, which in turn are classify as a range.

The second section presents the main technical characteristics of the three common Internet of Things systems, such as LoRa, NB-IoT and ZigBee, and the methods used to reduce energy consumption for each of the technologies.

In LoRa technology, the features of low power consumption are the type of Class A end devices, also due to the reduction of data streams that sent with a constant period. In addition, this technology has the best noise immunity between the presented technologies.

In NB-IoT technology, the main reason for low power consumption are three modes of operation, namely PSM, eDRX, HLCOM, which continue to increase the battery life of the end device.

The technology ZigBee main cause of saving energy has several modes of terminal devices dormant terminal device; mobile terminal device.

The third section considered cyclic-mode MAC protocols that use sleep or power-saving cycles to put nodes to sleep while waiting for a communication session. The wake-up radio module is considered as a new hardware solution with power consumption for listening by an order of magnitude lower than that of low-power radio devices with the possibility of continuous listening a continuous broadcast. Technological and design aspects of WuR play a key role in determining the efficiency of low power sensor networks and take into account the following design requirements: energy consumption; waking time; false awakenings and interventions; sensitivity and range; data transfer rate; cost and size; frequencies used. The typical structure of the wake-up signal packet is considered. At the hardware level, achieving listening with very low power consumption limits RX processing and components that can be used in WuRx. Various equipment variants have investigated in the literature, exploring a wide range of options, including some that do not depend on radio frequencies (RF), such as optical or acoustic.