

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-
КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:
«МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ NB-IOT»

на здобуття освітнього ступеня магістр
за спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис) Віталій КОЗАК
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав: здобувач вищої освіти гр.ІСДМ-63
Віталій КОЗАК
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
Керівник: Ольга ПОЛОНЕВИЧ
к.т.н, доцент. (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
Рецензент: _____
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Київ 2024

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Кафедра Інженерії систем та технологій

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСТ

Каміла СТОРЧАК

“___” _____ 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Козаку Віталію

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Методи підвищення енергоефективності
стільникових мереж NB-IoT

керівник кваліфікаційної роботи Ольга ПОЛОНЕВИЧ, к.т.н., доцент

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “15” 10.2024 р. № 320

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «27» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

1. Інтернет речей;
2. Штучний Інтелект;
3. Енергоефективні системи;
4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд сучасного стану розвитку та принципи функціонування NB-IoT;
2. Дослідження особливостей застосування штучного інтелекту в NB-IoT;
3. Підвищення енергоефективності стільникових мереж NB-IoT.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «15» жовтня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір технічної літератури	16.10.24-27.10.24	Виконано
2.	Аналіз сучасного стану розвитку застосування мереж NB-IoT	27.10.24-05.11.24	Виконано
3.	Огляд принципів застосування штучного інтелекту в мережах стільникового зв'язку	05.11.24-14.11.24	Виконано
4.	Дослідження напрямків підвищення енергоефективності стільникових мереж NB-IOT	14.11.24-22.11.24	Виконано
5.	Висновки по роботі	22.11.24-04.12.24	Виконано
6.	Розробка демонстраційних матеріалів, доповідь.	04.12.24-16.12.24	Виконано
7.	Оформлення роботи	16.12.24-25.12.24	Виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Віталій КОЗАК

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Ольга ПОЛОНЕВИЧ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття ступня магістр: 70 стор., 38 рис., 5 табл., 34 джерел.

Мета роботи – підвищення енергоефективності пристроїв технології NB-IoT.

Об'єкт дослідження – процес підвищення енергоефективності пристроїв IoT.

Предмет дослідження – методи підвищення енергоефективності

Короткий зміст роботи. У магістерській кваліфікаційній роботі виконано дослідження стану розвитку ринку IoT пристроїв станом на 2024 рік, тенденції розвитку, та виклики.

Було проаналізовано, як працює технологія NB-IoT, її архітектуру і енергоспоживання на різних етапах роботи. У другій частині було розглянуто різні методи підвищення енергоефективності в тому числі розглянуто інтеграцію ШІ в NB-IoT, а на основі поєднання різних варіацій ШІ було представлено приклади реалізації, недоліки і переваги таких рішень. В третьому розділі були проаналізовані ефективність енергоефективних рішень, включаючи функції PSM, eDRX, адаптивні налаштування частоти передачі та механізми енергозбереження на основі прогнозування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: NB-IOT, SMART POWER DISTRIBUTION NETWORKS, AI, SMART NETWORKS, ADAPTIVE TRANSMISSION FREQUENCY SETTING, PREDICTIVE ENERGY SAVING MECHANISM, PSM, PERFORMANCE ASSESSMENT, RESOURCES, eDRX, RELIABILITY.

ABSTRACT

The text part of the qualifying work for obtaining a bachelor's degree: 70 pp., 38 fig., 5 tables, 34 sources.

The purpose of the work is to increase the energy efficiency of NB-IoT technology devices.

The object of the study is the process of increasing the energy efficiency of IoT devices.

The subject of the study is methods of increasing energy efficiency

Summary of the work. The master's qualification work conducted a study of the state of development of the IoT device market as of 2024, development trends, and challenges.

It analyzed how NB-IoT technology works, its architecture and energy consumption at different stages of operation. The second part considered various methods of increasing energy efficiency, including the integration of AI into NB-IoT, and based on a combination of different variations of AI, examples of implementation, disadvantages and advantages of such solutions were presented. The third section analyzed the effectiveness of energy-efficient solutions, including PSM, eDRX functions, adaptive transmission frequency settings and energy saving mechanisms based on prediction.

KEY WORDS: NB-IOT, SMART POWER DISTRIBUTION NETWORKS, AI, SMART NETWORKS, ADAPTIVE TRANSMISSION FREQUENCY SETTING, PREDICTIVE ENERGY SAVING MECHANISM, PSM, PERFORMANCE ASSESSMENT, RESOURCES, eDRX, RELIABILITY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 СТАН РОЗВИТКУ РИНКУ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ, АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕРЕЖІ NB-IOT.....	11
1.1 Технології бездротового зв'язку для IoT.....	11
1.2 Стан та подальші перспективи розвитку ринку IoT.....	15
1.3 Актуальність проблеми і цілі енергоефективності.....	19
1.4 Архітектура мережі NB-IoT.....	22
1.5 Сценарій розгортання NB-IoT.....	24
1.6 Споживання енергії протягом життєвого циклу пристроїв IoT.....	31
РОЗДІЛ 2 ІНТЕГРАЦІЯ NB-IOT В ТЕХНОЛОГІЇ ШІ, ЕФЕКТИВНІСТЬ І НЕДОЛІКИ.....	36
2.1 Визначення умов і вимог проекту покращення енергоефективності мережі NB-IoT.....	36
2.2 Механізм енергозбереження на основі прогнозування.....	38
2.3 Механізми адаптивного налаштування частоти передачі.....	41
2.4 Інтеграція NB-IoT з Штучним інтелектом.....	44
РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ NB-IOT.....	57
3.1 Енергоефективні протоколи передачі даних в NB-IoT.....	58
3.2 Механізм AS-RAI.....	60
3.3 Дослідження енергоефективних функцій.....	64
ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	76
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)	80

ВСТУП

Актуальність теми. NB-IoT (Narrowband Internet of Things) є однією з найперспективніших технологій для забезпечення зв'язку між пристроями в середовищі Інтернету речей (IoT). Розвиток NB-IoT пристроїв вже дозволяє будувати цілі "розумні" міста, пропонуючи ефективні рішення для управління міськими ресурсами, такими як розумне освітлення, моніторингу транспортних засобів, каналізаційних люків чи дренажних систем. Масштабність впровадження NB-IoT пристроїв вимагає розумного споживання енергії, покращення існуючої енергоефективності.

Мета роботи – підвищення енергоефективності пристроїв технології NB-IoT.

Для виконання поставленої мети, у магістерській роботі розроблено та виконано наступні завдання:

- огляд сучасного стану розвитку та принципи функціонування NB-IoT;
- дослідження особливостей застосування штучного інтелекту в NB-IoT;
- підвищення енергоефективності стільникових мереж NB-IoT.

Об'єкт дослідження - процес підвищення енергоефективності пристроїв IoT.

Предмет дослідження – методи підвищення енергоефективності

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися методи теорії ймовірностей, методи математичного моделювання і теорії телетрафіка, аналіз і порівняння, емпіричні тести.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна магістерської кваліфікаційної роботи полягає в комплексному аналізі інтеграції технологій NB-IoT з штучним інтелектом, що передбачає розробку підходів до їх впровадження в існуючі пристрої, враховуючи обмеження та складнощі реалізації. Вперше оцінено ефективність сучасних енергоефективних рішень у контексті збільшення терміну роботи NB-IoT-пристроїв на батареях та зниження експлуатаційних витрат

Практична значущість одержаних результатів. Використання запропонованих енергоефективних рішень для NB-IoT дозволяє значно збільшити

час роботи пристроїв IoT від батарей.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи доповідались і обговорювались на двох науково-практичних конференціях, які проходили на базі Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

РОЗДІЛ 1 СТАН РОЗВИТКУ РИНКУ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ, АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕРЕЖІ NB-IOT

1.1 Технології бездротового зв'язку для IoT

Інтернет речей (IoT) створює окремий світ, де пристрої можуть взаємодіяти між собою без людського втручання. Основою цього світу є бездротові технології, які виконують з'єднання між різноманітними пристроями. Вибір оптимальної технології бездротового зв'язку для IoT-проекту залежить від конкретних вимог, таких, як дальність дії, пропускна здатність, енергоспоживання, вартість та інші.

В табл.1.1. наведені популярні технології для IoT і розглянемо їх трошки детальніше. Перша технологія це LoRa , яка забезпечує бездротовий зв'язок великого радіусу дії з низьким енергоспоживанням, вона була розроблена французькою компанією Cysleo у 2009 році. У 2012 році компанія Semtech, яка спеціалізується на виробництві напівпровідників, придбала Cysleo та права на технологію. Після цього LoRa була вдосконалена й набула широкого поширення завдяки її застосуванню в Інтернеті речей . LoRaWAN, стандарт для мереж, які використовують LoRa, був створений LoRa Alliance у 2015 році, щоб забезпечити сумісність пристроїв і мереж від різних виробників.

Одна з головних переваг LoRa це здатність передавати дані на значні відстані, навіть через перешкоди, такі як стіни та інші будівлі. Технологія використовує спеціальну модуляцію сигналу, яка дозволяє мінімізувати вплив перешкод, таких як радіочастотні перешкоди від інших пристроїв. Вартість модулів LoRa та обладнання для побудови мережі порівняно невисока, що робить цю технологію доступною для широкого кола користувачів. Хоча існує альянс LoRa Alliance, який розробляє стандарти, повна стандартизація технології все ще відсутня, що може призвести до проблем сумісності між різними виробниками обладнання. LoRa забезпечує відносно низьку пропускну здатність (до 50 кбіт/с), що обмежує її використання для передачі великих обсягів даних або даних у реальному часі.

Таблиця 1.1.

Порівняння технологій

Характеристика	LoRa	Sigfox	LTE-M	Wi-Fi HaLow	NB-IoT
Частотний спектр	(ISM)	(ISM)	Ліцензійний (LTE)	Безліцензійний (Wi-Fi)	Ліцензійний (LTE)
Швидкість передачі даних	0.3-50 Кбіт/с	100 біт/с - 600 біт/с	10-1000 Кбіт/с	До 100 Мбіт/с	1-250 Кбіт/с
Дальність зв'язку	До 15 км у сільській місцевості	До 50 км	До 11 км	До 1 км (у приміщенні)	До 10 км
Енергоефективність	Дуже висока	Дуже висока	Середня	Низька у порівнянні з іншими	Висока
Ємність мережі	Висока	Обмежена (до 140 повідомлень/день)	Дуже висока	Висока	Дуже висока
Мобільність	Обмежена	Обмежена	Висока	Обмежена	Низька
Час автономної роботи	До 10 років	До 10 років	Деякі роки	Місяці до кількох років	До 10 років
Ключові галузі застосування	Розумні міста, промисловість	Відстеження активів, моніторинг	Логістика, транспортування, мобільні рішення	Розумні будинки, промислові рішення	Сільське господарство, розумні лічильники, розумні міста
Вартість впровадження	Низька	Дуже низька	Від середньої до високої	Низька	Від середньої до високої

Sigfox – це одна з найвідоміших технологій LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), спеціально розроблена для Інтернету речей (IoT). Технологія була заснована у 2010 році французькими інженерами Людовиком Ле Моаном та Крістофом Фурте. Низька вартість, велика дальність і низьке енергоспоживання, роблять її привабливою для широкого кола застосувань. Однак затримка передачі

даних у мережах Sigfox може бути значною, що робить її непридатною для додатків, які вимагають швидкої реакції. А сигнал Sigfox може бути сприйнятливим до перешкод від інших бездротових пристроїв, що може призвести до втрати даних або зниження якості сигналу.

LTE-M (Long Term Evolution for Machines) – це технологія низькошвидкісного широкосмугового зв'язку, теж спеціально розроблена для Інтернету речей (IoT). Хоча точна дата появи перших стандартів LTE-M може дещо відрізнятися, прийнято вважати, що ця технологія почала активно розвиватися на початку 2010-х років. Технологія забезпечує надійне з'єднання для мільйонів пристроїв, які потребують низької пропускної здатності, але мають працювати тривалий час від батареї. Порівняно з іншими технологіями LPWAN, такими як LoRa або NB-IoT, LTE-M зазвичай є більш дорогою у розгортанні та експлуатації. Це пов'язано з необхідністю використання існуючої інфраструктури мобільних операторів. Хоча LTE-M і забезпечує низьке енергоспоживання, воно все ж таки вище, ніж у таких технологій, як LoRa або NB-IoT. Це може бути критичним для пристроїв, які працюють від батареї і мають обмежені енергетичні ресурси.

Wi-Fi HaLow – це відносно нова технологія бездротового зв'язку, розроблена як доповнення до традиційних стандартів Wi-Fi (802.11a/b/g/n/ac/ax). Вона призначена спеціально для Інтернету речей (IoT), де потрібна велика дальність дії, низьке енергоспоживання та підключення великої кількості пристроїв. Стандарт Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah) був офіційно опублікований у 2017 році. Однак, розробки та дослідження в цій галузі тривали декілька років до цього. Wi-Fi HaLow забезпечує вищу пропускну здатність, ніж LoRa, але нижчу, ніж NB-IoT. Це робить його хорошим вибором для додатків, які вимагають передачі невеликих обсягів даних з помірною швидкістю.

Вузькосмуговий IoT (Narrowband Internet of Things) — це стандарт радіотехнології глобальної мережі малої потужності (LPWAN), розроблений 3GPP для пристроїв і послуг стільникової мережі. Хоча роботи над стандартом NB-IoT тривали протягом кількох років, офіційно перша робоча версія специфікації була представлена консорціумом 3GPP у червні 2016 року. Крім передачі даних, NB-IoT

може забезпечувати підтримку додаткових послуг, таких як голосовий зв'язок і передача коротких повідомлень. Технологія дозволяє підключати до мережі велику кількість пристроїв з низьким споживанням енергії, забезпечуючи при цьому широкий покриття та надійність. Клієнти можуть отримати доступ і використовувати всі функції та можливості.

Кожна з цих технологій має свої сильні сторони, і їх комбінація дозволяє створити гібридні мережі, які краще відповідають потребам конкретних застосувань. У сільських районах Індії впроваджується комбінована система технологій NB-IoT та LoRa для моніторингу стану ґрунту, зрошення та відстеження кліматичних умов на полях. LoRa збирає і передає дані з сенсорів через локальну мережу на великі відстані, а в центральних точках (де є мобільне покриття) передача даних здійснюється через NB-IoT до хмарного сервера. Завдяки такій інтеграції фермери повідомляють про 25% зниження використання води і на 15% більшу врожайність, завдяки точному контролю умов зрошення і застосуванню прогнозованої аналітики. Інтеграція NB-IoT та LoRa дозволила знизити витрати на розгортання мережі, адже LoRa розгорнута у сільських важкодоступних місцях без потреби у ліцензованих частотах та інвестицій у стільникові базові станції, а NB-IoT використана для підключення до глобальних мереж, що в комплексі збільшує гнучкість і масштабність IoT-рішень.

Також існує практичне застосування NB-IoT + LTE-M. В Китаї проекти розумних міст використовують як NB-IoT, так і LTE-M для різних цілей. NB-IoT застосовується для тривалого моніторингу ресурсів (водопостачання, сміттєві баки, вуличне освітлення), тоді як LTE-M використовується для інтенсивніших додатків, таких як відеоспостереження і транспортні системи. Спільне використання цих двох технологій допомогло підвищити ефективність управління ресурсами міста і зменшити витрати на обслуговування інфраструктури. За рахунок оптимізації витрат на енергоспоживання через датчики NB-IoT економія на енергетиці зросла на 20-30%.

Німецький телекомунікаційний холдинг Deutsche Telekom інтегрує обидві технології NB-IoT та LTE-M для різних IoT-рішень, включаючи транспорт і

логістику. Їхні рішення з розумного відстеження допомагають моніторити стан вантажу, надавати оновлення в реальному часі та оптимізувати маршрути. Це поєднання знижує витрати та забезпечує широке покриття при мінімальному енергоспоживанні.

Глобальна компанія в галузі рішень підключення, iBASIS впроваджувала та тестувала NB-IoT та LTE-M у декількох країнах. Їхні рішення використовуються у міжнародних транспортних перевезеннях, забезпечуючи безперервне підключення для транспортних засобів та контейнерів під час транскордонних перевезень. Це дозволяє операторам ефективніше управляти відстеженням, контролювати споживання пального та планувати технічне обслуговування.

1.2 Стан та подальші перспективи розвитку ринку IoT

На світовому ринку IoT (Інтернету речей) працюють сотні виробників пристроїв, їх кількість продовжує зростати через постійний попит на IoT-рішення в різних галузях. Основні країни виробники IoT-пристроїв: Китай, Європа, Японія, Південна Корея.

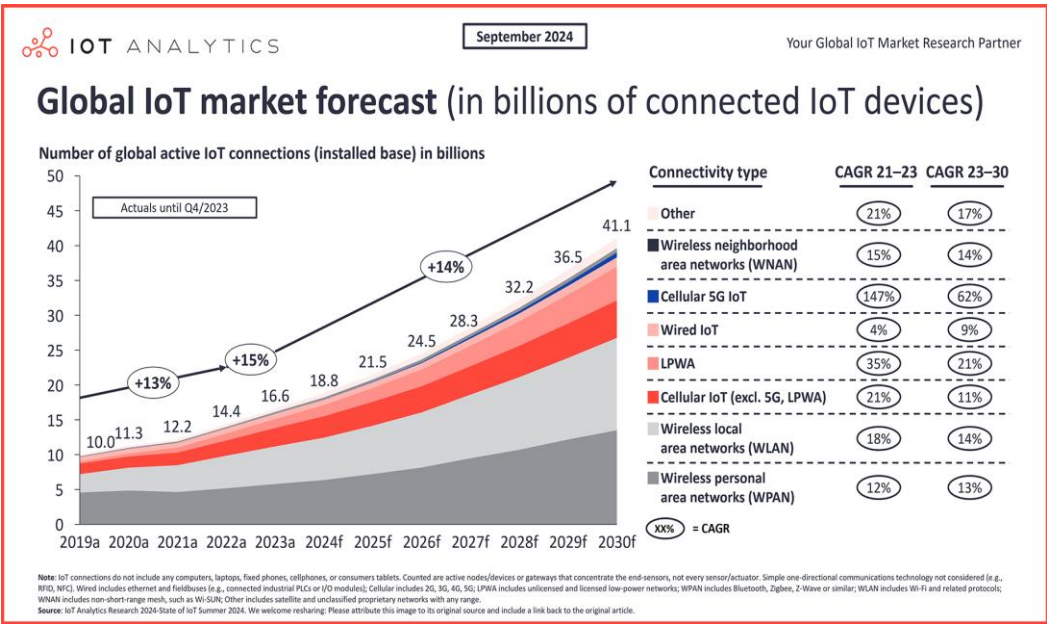


Рис.1.1. Глобальний прогноз ринку IoT

Відповідно до 171-сторінкового звіту IoT Analytics про стан Інтернету речей за літо 2024 року, станом на кінець 2023 року було 16,6 мільярда підключених пристроїв IoT (зростання на 15% порівняно з 2022 роком). IoT Analytics очікує, що до кінця 2024 року цей показник зросте на 13% до 18,8 мільярда. Цей прогноз нижчий, ніж у 2023 році, через триваючі обережні витрати підприємств, оскільки інфляція та відсоткові ставки залишаються високими, хоча й сповільнюються, а також тривають обмеження поставок чіпсетів і триваючі конфлікти в Україні та на Близькому Сході. Незважаючи на зазначені вище макрофактори, 51% підприємств, які запровадили IoT, планують збільшити свій бюджет на IoT у 2024 році (при цьому 22% компаній очікують збільшення бюджету на 10%+ порівняно з 2023 роком). Очікується, що до 2030 року кількість підключених пристроїв IoT зросте до 40 мільярдів. У 2023 році мобільні оператори в усьому світі заробили 15 мільярдів доларів на 3,56 мільярдів стільникових підключень IoT. У 2023 році темпи зростання доходів операторів мобільного зв'язку від IoT перевищили показники постачальників програмного забезпечення та гіпермасштабувальників у цілому. Це свідчить про те, що відносна важливість стільникового зв'язку для підключених до IoT пристроїв продовжує зростати і наразі стільниковий IoT (2G, 3G, 4G, 5G, LTE-M і NB-IoT) становить майже 21% глобальних підключень IoT. Відповідно до Global Cellular IoT Connectivity Tracker & Forecast від IoT Analytics (оновлено в червні 2024 р.).

В Україні IoT-ініціативи активно підтримуються на рівні держави, Міністерство цифрової трансформації України активно працює над впровадженням цифрових технологій у державний сектор, створена програма «Держава в смартфоні» передбачає, що технології IoT можуть бути використані для віддаленого управління міськими інфраструктурними об'єктами, через інтеграцію з державними системами та сервісами.

У 2024 році оцінка глобального ринку NB-IoT перевищила 8,2 мільярда доларів США з очікуваним середньорічним темпом зростання ринку (CAGR) приблизно на 26% до 2030 року. Станом на 2024 рік 133 оператори зв'язку у світі запустили комерційні послуги NB-IoT. Українські мобільні оператори надають

послуги NB-IoT за найнижчою ціною у світі, близько 0,5 долара США на місяць. Для порівняння по світу середня вартість NB-IoT послуг коливається від \$0,50 до \$5 на місяць за пристрій залежно від регіону, оператора та умов використання.

У Великій Британії компанія BT інвестувала багатомільйонний бюджет у розгортання мережі NB-IoT, яка охоплює 97% населення країни. Мобільний оператор Vodafone та телекомунікаційна компанія Huawei вже інвестують сотні мільйонів доларів у розробку нових NB-IoT технологій. У глобальному контексті, суми інвестицій в подальший розвиток технології можуть сягати мільярдів доларів, враховуючи необхідність створення відповідної інфраструктури, а також дослідження оптимальних застосувань для ринків розумних міст та промисловості і впровадження нових стандартів. (MDPI)(Cavli Wireless).

Китай лідер у впровадженні NB-IoT пристроїв, оператори China Mobile та China Unicom вже підключили понад 1,35-1,4 мільярда NB-IoT пристроїв до своїх мереж, в 60 мільйонах домогосподарств по всій країні. В рамках ініціативи Smart Nation (Розумна нація) Сінгапур за допомогою розробки передових лічильників електроенергії з підтримкою NB-IoT, має на меті до кінця 2024 року в понад 1,4 мільйона домогосподарств досягти ефективного використання енергії.

У Лондоні і Барселоні, впроваджені системи для моніторингу каналізаційних люків та дренажних систем за допомогою датчиків NB-IoT. В Африці, вони допомагають відстежувати міграції диких тварин, це зазвичай важкодоступні регіони, де немає покриття стільникових мереж. У провідних музеях і галереях світу з метою захисту старовинних артефактів та експонатів використовують датчики моніторингу вологості та температури. NB-IoT пристрої використовують в океанах для відстежування стану і місця розташування рибальських сіток, запобігаючи їх втраті та захищаючи морське чи океанське середовище від забруднення. В сільському господарстві завдяки ним фермери можуть контролювати та оптимізувати всі аспекти вирощування продукції: від зрошення та управління ґрунтом до моніторингу здоров'я рослин. У великих містах та парках використовують NB-IoT пристрої для моніторингу стану дерев.

Спочатку NB-IoT використовувалася переважно в таких галузях, як смарт-

міста та промисловість. Однак, зараз її застосування розширюється і наразі розглядається варіант, за якого NB-IoT зможе у реальному часі виконувати моніторинг екологічних змін на глобальному рівні. Сенсори будуть встановлені по всій планеті для збору даних про вологість, температуру, рівень вуглекислого газу та інші екологічні показники. І завдяки цим даним можливо буде прогнозувати не бажані зміни клімату, що дасть змогу приймати рішення для їх запобігання.

Технологія NB-IoT продовжує активно розвиватися, відкриваючи нові можливості для Інтернету речей. І має чудові перспективи для подальшого розвитку, адже

технологія вже стає основою для створення розумних міст, промислових підприємств, систем транспорту та інших інноваційних рішень. Постійно з'являються нові бізнес-моделі, засновані на використанні даних, отриманих від пристроїв NB-IoT. В подальшому NB-IoT може стати основою для створення нових екосистем, що об'єднують різноманітні пристрої та сервіси.

У сучасному світі дані стали одним з найцінніших активів, особиста інформація, фінансові дані, інтелектуальна власність – все це має високу вартість на чорному ринку. І стрімкий розвиток IoT технології став привабливою мішенню для кібератак. Згідно зі звітом ThreatLabz за 2023 рік, у 2022 році кількість кібератак, націлених на IoT, зросла на 400%. Виробництво було сектором, який найбільше підпадав під кіберудари, це 54,4% від зареєстрованих атак. При атаках на рівні пристроїв, зловмисник може отримати фізичний доступ до пристрою та модифікувати його програмне забезпечення або налаштування. Багато пристроїв IoT використовують відкриті бібліотеки та компоненти, які можуть містити відомі вразливості. Вразливості в прошивці пристрою можуть бути використані для отримання доступу до системи. Зловмисники можуть підміняти дані, що передаються між пристроями та сервером, якщо вони незашифровані. Значно зросла в останні роки частота DDoS-атак, і вони стали одним із найпоширеніших видів кібератак. Розподілені атаки відмови в обслуговуванні можуть вивести з ладу мережу або окремі пристрої, а через SQL-ін'єкції зловмисники можуть вводити шкідливий код у вразливі веб-додатки, що дозволяє отримати доступ до бази даних.

Велика Британія стала першою країною, яка ввела обов'язкові стандарти кібербезпеки IoT, а ЄС вимагає, щоб продукти, що продаються в ЄС, відповідали мінімальним стандартам. Крім того, США запровадили програму добровільного маркування бездротових споживчих продуктів IoT.

Тому ми не можемо оминати варіанти захисту пристроїв NB-IoT, такі як криптографічні методи:

- симетричне шифрування: AES, для захисту даних під час передачі.
- асиметричне шифрування: RSA, для забезпечення автентифікації та цілісності даних;
- хешування: Для перевірки цілісності даних (SHA-256, SHA-3).

Обов'язкові механізми багатофакторної аутентифікації, комбінація чогось, що ви знаєте (пароль), чогось, що у вас є (токен) і чогось, що є частиною вас (біометричні дані). Також потрібно використовувати сертифікати, для захисту передачі даних і перевірки автентичності пристроїв.

Потрібні регулярні оновлення програмного забезпечення: Для усунення відомих і виявлення нових вразливостей. Для захисту мережі потрібно використовувати брандмауери, які будуть відповідати за контролем мережевого трафіку. Для виявлення вторгнень використовувати систему IDS (Intrusion Detection System), завдання якої моніторити мережу та виявляти підозрілу активність, яка може свідчити про спробу злому. А система IPS (Intrusion Prevention System) не тільки виявляє загрози, але й вживає заходів для їх блокування, таким чином запобігаючи проникненню зловмисників в систему. Для створення безпечного тунелю для передачі даних можна використовувати VPN.

1.3 Актуальність проблеми і цілі енергоефективності

Кількість NB-IoT пристроїв стрімко зростає, масове розгортання таких пристроїв створює суттєве енергетичне навантаження, і піднімає питання екологічної відповідальності. Оптимізація енергоспоживання дозволяє знизити

екологічний вплив та підтримувати сталий розвиток, особливо у поєднанні з використанням відновлюваних джерел енергії, наприклад сонячних панелей. Vodafone та Huawei спільно створили систему моніторингу ґрунту в Іспанії з використанням різних NB-IoT датчиків, які живляться сонячними панелями. Ця система дозволила місцевим фермерам отримувати дані про вологість ґрунту, температуру, рівень кисню, а також рівня сонячне випромінювання в реальному часі, що дозволило знизити витрати на воду на 25% і підвищити врожайність сільськогосподарських рослин.

Понад 50% пристроїв NB-IoT живляться від батарей, і вимагають постійної або частішої передачі даних, наприклад:

- пристрої для відстеження витоків газу, диму, пожежних сигналів або охоронних систем. Такі датчики повинні постійно передавати дані, адже їх робота пов'язана з безпекою та потребує миттєвих реакцій у випадку загрози.
- медичні пристрої використовуються для дистанційного моніторингу пацієнтів, таких як, контроль серцевого ритму чи рівня цукру в крові. Такі пристрої передають дані в реальному часі.
- датчики руху на батареях у транспортній інфраструктурі, системах паркування та контролі трафіку, що передають інформацію в реальному часі для оптимізації транспортних потоків або управління пакувальними зонами.

NB-IoT пристрої часто використовуються в віддалених місцях або важкодоступних зонах, де регулярне технічне обслуговування ускладнене, тому низьке енергоспоживання та можливість працювати протягом кількох років без заміни джерела живлення є ключовою необхідністю.

Аналіз існуючих методів енергозбереження в стільникових мережах IoT, зокрема в NB-IoT, показує широкий спектр підходів, які можуть значно знизити енергоспоживання як у пристроях, так і в мережевій інфраструктурі.

Розглянемо основні методи енергозбереження і як вони дозволяють зменшити енергоспоживання.

1. Динамічна регуляція потужності передавача, яка передбачає автоматичне налаштування потужності передачі сигналу в залежності від умов

навколишнього середовища і відстані до базової станції. За умови зменшення потужності передатчиків в умовах близького розташування пристрою і базової станції, ми можемо досягти зменшення енергоспоживання UE пристрою.

2. Використання режимів сну на пристроях, дозволяє знизити енергоспоживання, оскільки компоненти в ці періоди перебувають у режимі споживання мінімальної кількості енергії. Також режими сну можна використовувати і на базових станціях, щоб зменшити енергоспоживання під час низької активності мережі.

3. Зменшення обсягу переданих даних за допомогою алгоритмів стиснення, дозволяє знизити кількість енергії, витраченої при передачі інформації і зменшити кількість часу для передачі інформації.

4. Методи адаптивної модуляції та кодування, під час передачі даних, які змінюються в залежності від умов мережі, також дозволяє оптимізувати споживання енергії EU.

5. Розробка і впровадження алгоритмів маршрутизації, які враховують енергоспоживання на кожному етапі, може знизити загальне споживання енергії в мережі.

6. Інтеграція сонячних панелей або вітрових турбін у стільникові станції допомагає зменшити залежність від традиційних джерел енергії, і дозволяє зробити їх автономними.

7. Використання новітніх енергоефективних чіпів з оптимізованими алгоритмами може значно зменшити витрати енергії пристроїв.

8. Використання оптимізованого апаратного забезпечення ,пристроїв з урахуванням енергоефективності може зменшити споживання енергії під час роботи.

9. Використання систем моніторингу для аналізу енергоспоживання в реальному часі може допомогти виявити можливості для підвищення ефективності.

10. Впровадження централізованих системи управління що можуть координувати роботу пристроїв для досягнення оптимального енергоспоживання.

В цій роботі ми проведемо детальний аналіз енергоефективності існуючих

методів енергоспоживання, щоб зрозуміти, їх ефективність. Розглянемо нові технології та рішення, які можуть підвищити енергоефективність NB-IoT, включаючи нові алгоритми управління ресурсами, зменшення затримок та оптимізацію обробки даних.

Мета такої оптимізації :

1. Подовжити час автономної роботи UE пристроїв, які зможуть працювати роками без заміни батарей.
2. Зменшити експлуатаційні витрати, адже часта заміна батарей або обслуговування пристроїв, які споживають багато енергії, суттєво підвищує вартість експлуатації IoT мережі.
3. Підвищити надійність та стійкість мережі, тому що багато IoT пристроїв розгортаються у віддалених чи важкодоступних зонах. Якщо пристрої швидко виснажують батареї, це може призвести до втрати зв'язку або критичних даних, особливо в безперервних моніторингових системах.

У цій роботі ми будемо використовувати наступні методи дослідження:

1. Теорія ймовірностей та телетрафіка – для моделювання та аналізу процесів передачі даних в мережах NB-IoT.
2. Імітаційне моделювання – для оцінки енергоспоживання мережі в різних умовах та режимах роботи.
3. Методи математичного моделювання – для розробки моделей енергоспоживання пристроїв і мережевих елементів.
4. Аналіз і порівняння – для вивчення існуючих рішень щодо енергозбереження та їх ефективності.
5. Емпіричні тести – для перевірки ефективності запропонованих рішень

1.4 Архітектура мережі NB-IoT

Технологія NB-IoT є еволюцією, яка базується на довгостроковій еволюції (LTE), більша частина архітектури успадкована від LTE, але з деякими спрощеннями, щоб відповідати обмеженням щодо низької вартості та низької потужності модулів NB-IoT. Незважаючи на те, що NB-IoT простіше, ніж LTE, дані

можуть надсилатися різними шляхами з різними характеристиками з точки зору пропускної здатності, підтвердження та надійності. NB-IoT спростила архітектуру EPC (ядро мережі) для підтримки передачі невеликих даних, необхідних для додатків M-IoT у формі оптимізації EPC площини користувача та площини керування.

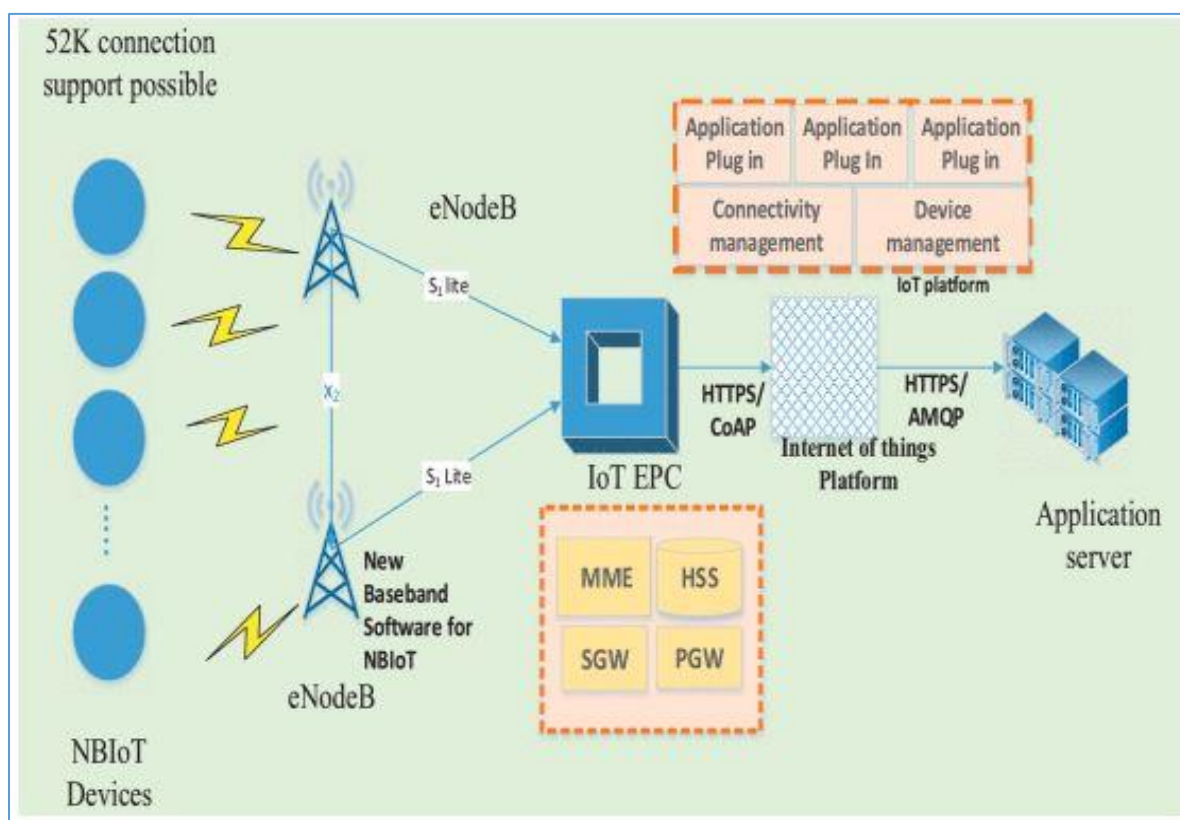


Рис.1.2. Архітектура NB-IoT

На рис.1.2 показана архітектура NB-IoT. в якій, пристрій або обладнання користувача зв'язується з eNodeB (базова станція стандарту LTE) , після чого БС з'єднується з ядром пакетів IoT (EPC). EPC складається з чотирьох елементів мережі, а саме шлюзу обслуговування (SGW), шлюз PDN (PGW) і керування мобільністю Entity (MME). Протокол тунелювання GPRS (GTP) є основним протоколом зв'язку в LTE/EPC.

eNodeB передає NAS (рівень відсутності доступу, сигнальне повідомлення) до EPC (ядро мережі) за допомогою s1-lite (спрощений інтерфейс, який використовується для підключення IoT-пристроїв). NAS -працює на рівні

протоколу, який забезпечує сигналізацію та передачу даних між кінцевим пристроєм. Щоб продовжити обробку, ЕРС шукає Stratum, а потім передає її на платформу IoT. Платформа IoT передає дані на сервери додатків у підтримуваній формі, існує два способи передачі даних між пристроєм NB-IoT і сервером додатків, на основі IP і без IP. Потім ці дані обробляються сервером додатків.

1.5 Сценарій розгортання NB-IoT

Для NB-IoT можуть використовуватися практично ті самі діапазони частот, що і для 2G/3G/4G в «низьких» band. Це B20(800МГц), B8(900МГц), B3(1800МГц). Більш «високі» частоти сенсу використовувати немає через більшу згасання сигналу. Носій NB-IoT можна розгорнути в трьох режимах: автономний, внутрішньо смуговий і захисний.

Stand-alone Deployment (Автономна робота): у цьому режимі окремий спектр або резервується для технології радіодоступу, як-от GSM/UMTS, або спеціальний спектр використовується для розгортання несучої NB-IoT. Виділений частотний канал має ширину 200кГц, саме цей варіант є найбільш ефективним для роботи NB-IoT, але й найбільш витратним. Справа в тому, що в цьому випадку може знадобитися від 300 до 600 кГц дуже цінного спектра разом із захисними інтервалами. В цьому випадку взаємні інтерференції з іншими технологіями мінімальні

In-band Deployment (Робота в діапазоні): у цьому режимі оператор NB-IoT розгортається в межах оператора LTE. Це дає змогу використовувати вже наявну смугу LTE без потреби у видаленні додаткового спектра. Що спрощує впровадження NB-IoT для операторів з наявною інфраструктурою LTE, але використання ресурсу LTE може погіршити його доступність для інших користувачів. У одотональному режимі передачі у висхідній лінії зв'язку будуть перешкоди між NB-IoT і LTE (інтервал між піднесучими 3,75 кГц). Но ці перешкоди можна мінімізувати шляхом планування користувачів із подібними вимогами до SNR у NB-IoT і найближчих LTE PRB.

Guard-band Deployment (У режимі гвардійської смуги): у цьому режимі носій NB-IoT буде розташовано в межах охоронного діапазону оператора LTE, щоб уникнути перешкод. Цей режим забезпечує кращу пропускну здатність низхідної лінії зв'язку порівняно з режимом у смугі, оскільки доступно більше ресурсів низхідної лінії зв'язку, але це вимагає відповідного налаштування обладнання для ефективної роботи в гвардійській смугі.

Рис.1.3. описує сценарій різних режимів. Режими розгортання NB-IoT забезпечують високу гнучкість, оскільки оператор, розгорнутий в одному режимі, може продовжувати роботу в будь-якому з інших режимів, якщо спектр переходить на LTE.

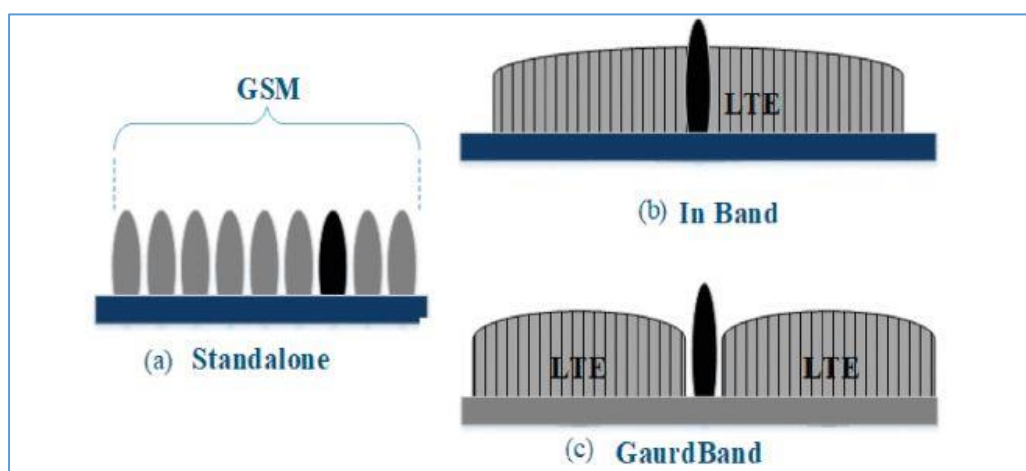


Рис.1.3. Режими роботи NB-IoT

Структура фрейму. NB-IoT використовує специфічну структуру фрейму для ефективної передачі даних між пристроями IoT та базовою станцією. Ключовими компонентами цієї структури є uplink (висхідний канал) та downlink (низхідний канал).

Downlink використовується для передачі даних від базової станції до пристрою IoT. Це можуть бути команди, оновлення програмного забезпечення, або інші типи інформації. Радіокадр Downlink складається з 10 субкадрів, кожен з яких має довжину 1 мс, і кожен субкадр складається з 2 слотів із часовим слотом із семи символів OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - метод модуляції сигналів.). Кожен символ OFDM у кадрі позначається символом число, в діапазоні

від 0 до 13. Кількість цих радіокадрів називається системним номером кадру (SFN), який коливається від 0 до 1023, коли лічильник SFN досягає значення 1023, лічильник скидається до 0, після чого лічильник гіпер SFN збільшується. Hyper SFN коливається від 0 до 1023. У кожному радіокадрі підкадри позначаються цифрами від 0 до 9, а слоти – від 0 до 19. Один блок фізичних ресурсів складається з 12 підносіїв, розмір одного ресурсного блоку: 180 кГц (12 підносіїв по 15 кГц кожен). Для запуску Nb-IoT пристрою використовується тільки один ресурсний блок.

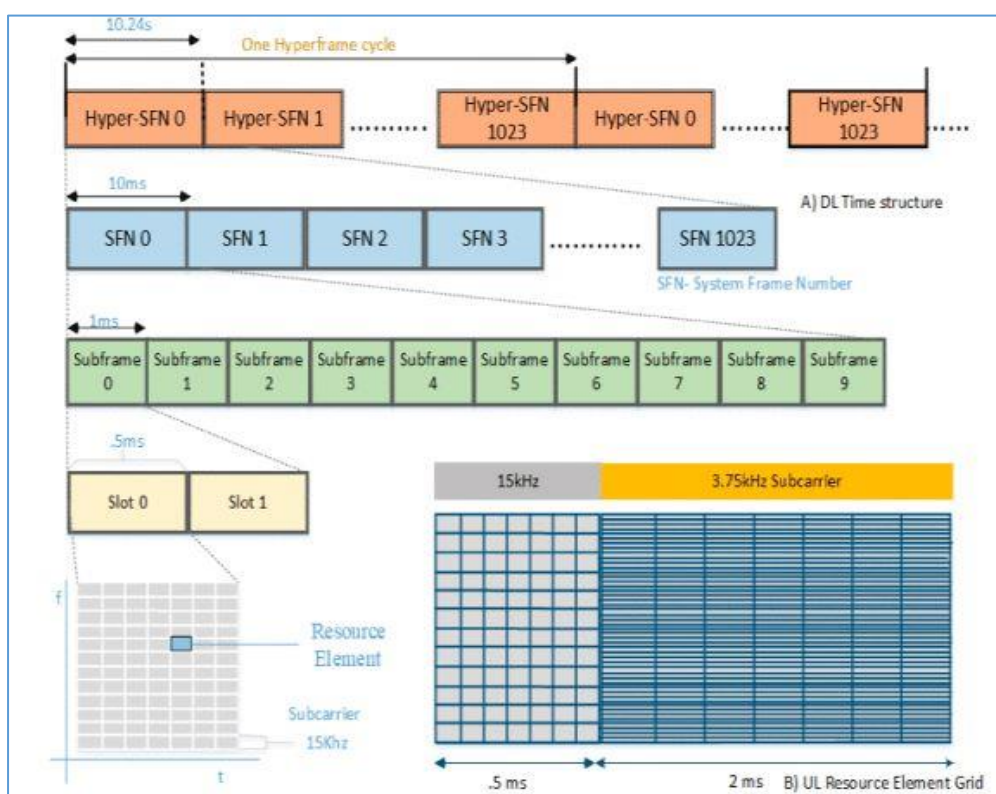


Рис.1.4. Робота Nb-IoT в мережі LTE

Uplink використовується для передачі даних від пристрою IoT до базової станції, це можуть бути дані про вимірювання, статус пристрою або інші типи інформації.

Радіокадр Uplink має два варіанти інтервалу піднесучих, а саме 15 кГц і 3,75 кГц. З інтервалом піднесучих 15 кГц кожен слот має тривалість 0,5 мс, кількість піднесучих буде 12, що подібно до часової області. Однак для інтервалу піднесучих

3,75 кГц загальна кількість піднесучих у частотній області становить 4 рази, тобто $12 \cdot 4 = 48$ піднесучих. Тривалість слота становитиме 2 мс.

На uplink використовуються такі канали та сигнали:

- вузькосмуговий фізичний канал довільного доступу (NPRACH);
- спільний вузькосмуговий фізичний висхідний канал (NPUSCH);
- опорний сигнал демодуляції (DMRS).

У кадрі downlink лінії зв'язку:

- спільний вузькосмуговий фізичний низхідний канал (NPDSCH);
- вузькосмуговий фізичний канал керування низхідним каналом (NPDCCH);
- вузькосмуговий опорний сигнал (NRS);
- вузькосмуговий первинний сигнал синхронізації (NPSS);
- вузькосмуговий вторинний сигнал синхронізації (NSSS);
- вузькосмуговий фізичний широкомовний канал (NPBCH).

NB-IoT підтримує до 128 повторних передач у висхідній лінії (від пристрою до базової станції) і до 2048 повторних передач у низхідній лінії (від базової станції до пристрою). Різниця в кількості повторних передач пов'язана з тим що, пристрої IoT часто мають обмежені ресурси, і для них кількість повторних передач була обмежена, щоб зберегти енергію. Базова станція має більше ресурсів, тому може здійснювати більшу кількість повторних передач для забезпечення надійної доставки даних до пристроїв.

Повторні передачі (retransmissions) є ключовим механізмом у мережах NB-IoT, який забезпечує надійність передачі даних у складних умовах, таких як слабкий сигнал, завади та інші перешкоди. Цей механізм дозволяє переконатися, що дані були доставлені успішно, навіть якщо перша спроба передачі була невдалою.

NB-IoT розроблений для розширення покриття для додатків, які знаходяться у важкодоступних місцях, таких як глибокі приміщення та підвали. У зв'язку з цим NB-IoT забезпечує додаткове покриття до 20 дБ порівняно зі старою системою LTE. Це відповідає 164 дБ MCL

Процес синхронізації . Розглянемо, як відбувається процес синхронізації M2M терміналу (M2M-UE) блоку телеметричної інформації за допомогою мережі вузькосмугового інтернету речей.

Термінал вмикається та проводить внутрішню діагностику (Self-Test) для перевірки працездатності апаратного та програмного забезпечення.

Завантажуються попередні встановлені налаштування:

- частоти та параметри радіозв'язку;
- APN (Access Point Name) для доступу до оператора мережі;
- ідентифікаційна інформація (IMSI, ключ безпеки).

Термінал виконує сканування мережі, пошук базової станції NB-IoT у заданому частотному розділі. Після чого встановлюється синхронізація із сигналом базової станції (зокрема, синхронізація часу та частоти). Після успішного сканування термінал формує запит для підключення до мережі через процедуру Random Access Procedure (RAP). Запит передається до базової станції для початку взаємодії.

Термінал надсилає свою ідентифікаційну інформацію, наприклад, IMSI (International Mobile Subscriber Identity), до базової станції. Мережа перевіряє коректність ідентифікатора за допомогою аутентифікації сервера та використовує ключі безпеки для інсталяції захищеного підключення. Після успішної аутентифікації мережа видає термінал тимчасового ідентифікатора, наприклад, TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity), щоб захистити конфіденційність абонента.

Термінал реєструється в мережі, підтверджуючи свою готовність до передачі даних. У разі використання IP-з'єднання мережа призначає терміналу динамічну IP-адресу , якщо це необхідно. Термінал отримує від мережі інформацію про канали передачі (uplink/downlink), таймінг і режими енергозбереження (наприклад, PSM або eDRX).

Після чого відбувається формування та передача телеметричного блоку, M2M-термінал отримує дані від підключених сенсорів чи інших пристроїв. Зібрані дані можуть включати показники температури, вологості, рівня батареї або інші

телеметричні параметри залежно від конкретного джерела.

Дані структуруються у визначеному форматі, наприклад: JSON (легкий текстовий формат), CBOR (компактний двійковий формат), Протокол спеціальної програми (наприклад, MQTT або CoAP).

Телеметричні дані розбиваються на пакети відповідно до обмеження NB-IoT (зазвичай 160–200 байт на пакет). Для мінімізації використання мережевих ресурсів пакети можуть стискатися.

Пакети передаються через uplink-канал (UL) до базової станції. Використовуються протоколи передачі даних: UDP для швидкої, але менш надійної передачі чи MQTT або CoAP для застосунків, які потребують підтвердження доставки.

Мережа надсилає підтвердження (ACK) про успішну доставку пакета. У разі виникнення помилок виконується повторна передача даних (Retransmission).

Цей етап завершує надання телеметричних даних до сервера або хмарної платформи, де вони обробляються чи зберігаються. Сервер або платформа отримувача виконує перевірку цілісності переданих даних. Якщо дані пошкоджені або частина пакетів втрачена, ініціюється запит на повторну передачу.

Таблиця 1.2.

Час знаходження M2M-UE в синхронізації

Розмір корисного навантаження (Payload)	Час знаходження M2M-UE у станах								
	MCL=-144dB			MCL=-154dB			MCL=-164dB		
	Tx	Rx	Idle	Tx	Rx	Idle	Tx	Rx	Idle
Payload=10 байт	12,6	155	864	34,8	168	10%	165,6	303	1536
Payload=100 байт	40,6	155	864	146,8	168	10%	1061,6	303	1536

Після успішної доставки всіх пакетів телеметричних даних термінал завершує сеанс передачі. Закриваються активні з'єднання або передача переходить у "сплячий" режим. Для мінімізації енергоспоживання термінал повинен перейти в

один із режимів енергозберігання PSM чи eDRX. Термінал залишається в пасивному режимі до моменту отримання нового завдання (активується внутрішнім таймером, зовнішнім тригером або командою від сервера).

Опис процедури Random Access і ролі MSG2 базується на стандарті 3GPP (3rd Generation Partnership Project), який регламентує функціонування технології LTE, включаючи NB-IoT.

Таблиця 1.3.

Енергоспоживання модема NB-IoT

Операція	Енергоспоживання			
	+23дБм(Class 3)		+14Class 6)	
	мВт	мА	мВт	мА
Передача даних (Tx)	545	181,7	147	49,0
Прийом даних (Rx)	90	30	90	30
Очікування (Idle)	3	1,0	3	1,0
Standby(Режим Psm)	0.0015	0,005	0.0015	0,005

Таблиця 1.4.

Час життя АКБ за різних умов

Розмір корисного навантаження (Payload)	MCL = -144 dB		MCL = -154 dB		MCL = -164 dB	
	Class 3	Class 6	Class 3	Class 6	Class 3	Class 6
Payload=10байт	33,5	35,8	28,3	33,4	14,7	23,5
Payload=100байт	27,9	33,8	17,0	27,5	3,9	10,7

Відповідно «R1-156006, NB-IoT - Battery lifetime evaluation» можна розрахувати енергоспоживання NB-IoT модема. При цьому передбачається використання джерела автономного електропостачання з робочим напругою від 2,4 В до 3,6 В (номінальна напруга 3,0 В); енергоспоживання в режимі передачі включає в себе енергоспоживання внутрішніх цепей (90Вт) і енергоспоживання підсилювача потужності (КПД=44%).

В табл.1.4 наведені розрахунки часу життя АКБ, ємністю 2100мАч, для різних радіоумов при інтенсивності передачі 1 повідомлення в час. MCL (Maximum Coupling Loss): Визначає максимальну втрату сигналу між терміналом та базовою станцією. Чим більше значення MCL, тим краща здатність мережі підтримувати з'єднання в умовах слабого сигналу (наприклад, у приміщеннях або під землею).

1.6 Споживання енергії протягом життєвого циклу пристроїв IoT

Сенсорний пристрій з підтримкою NB-IoT – це IoT-пристрій, оснащений різними датчиками (температури, вологості, тиску тощо), який використовує технологію NB-IoT для передачі даних. Енергія в NB-IoT споживається на різних рівнях і через різні процеси. Під час роботи процесор пристрою працює в основному в одному з режимів: стан обробки даних (активний), режим очікування і режим сну, а також під час переходу стану. В режимі сну, він споживає найменшу кількість енергії. Коли він працює в режимі очікування, пристрій споживає середній рівень енергії. Найбільше енергії він споживає при роботі в активному режимі. Визначення споживання енергії на рівні процесора не є детермінованим експериментом, астохастичним. Процес залежить від багатьох аспектів, особливо від випадковості тривалості величин, які зумовлені випадковим характером типу фізичних явищ і подій для яких і було встановлено NB-IoT. Прикладом є сценарій, у якому встановлено NB-IoT пристрій у системі розподілу води для виявлення витоків. В такому сценарії немає впевненості, коли, як часто і де станеться витік води. Модель Маркова зображує різні стани зростання, через які проходить процесор під час свого найбільш енерговитратного стану (активний).

Під час своєї роботи пристрій прагне повернутись до режиму найменшого енергоспоживання(режим сну). Статистично доведено, що більшість вузлів NB-IoT процесори призначені витрачати майже 98% свого часу в режимі сну, тоді як вони проводять приблизно 1,5% у стані очікування і лише 0,5% їхнього часу роботи в активному режимі.

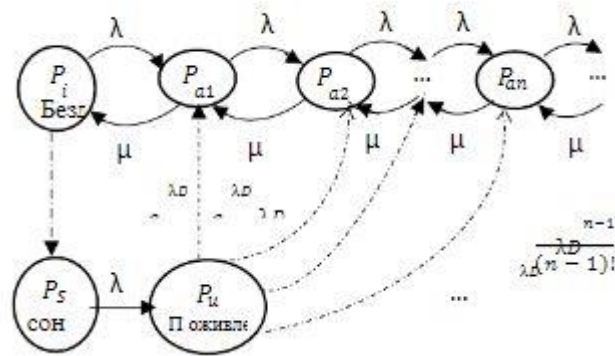


Рис.1.5. Процес народження і смерті задач процесора.

Для кожного зв'язку в NB-IoT частина енергії споживається електронною схемою вузла передачі, тоді як інша важлива частина споживається в процесі передачі на вузлі відправника NB-IoT у разі операції завантаження. Енергія також споживається електронною схемою вузла NB-IoT. Загалом схема NB-IoT складається з датчиків і перетворювачів сигналів, таких як АЦП. Більшість схем вузлів NB-IoT працюють або в пакетному, або в періодичному режимі. Для періодичного режиму вимірювання енергоспоживання вузла NB-IoT майже дорівнює споживанню енергії вимірювання (тобто, коли ланцюг вимірювання ввімкнено), доданого до енергії, спожитої під час переходу від «ON» до «OFF», а також «ВІМК.» у «УВІМК.». Таким чином, енергоспоживання електронної схеми можна виразити як:

$$E_{Circuit} = E_{on-off} + E_{off-on} + E_{sending} \quad (1.1)$$

Радіозв'язок є найбільш енергозатратним з переліку функцій, це підтверджується різними дослідженнями, у тому числі Abbas et al. [12], Лукіч та ін. [13], Мікелінакіс та ін. [14] На рисунку 1 показано споживання енергії пристроєм NB-IoT під час його різних робочих станів протягом одного дня, що представляє сценарій, коли передається лише один пакет. Важливо зазначити, що протягом усього терміну служби пристрій проходить лише ці робочі стани Як показано на рис.1.6., початкове налаштування підключення, також відоме як процедура каналу

довільного доступу (RACH) (помаранчевий); пакетна передача (світло-блакитний); прослуховування радіоканалу (фіолетовий); і прийом трафіку низхідної лінії зв'язку (червоний) спричиняє майже все споживання енергії. Навпаки, енергія, витрачена в режимі PSM (темно-синій), незначна і не видно на малюнку.

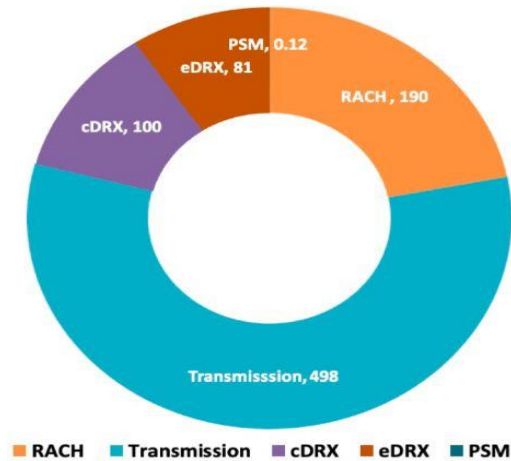


Рис.1.6. Відносне споживання електроенергії (мВт) серед різних робочих станів радіо в NB-IoT

Крім стану передачі, наявний стан прийому, стан очікування та стан сну в цілому. У більшості випадків є дев'ять можливих переходів між станами чотирьох режимів живлення. До них відноситься перехід із режиму передачі в режим очікування і, навпаки, режим прийому в режим очікування стан очікування і навпаки стан переходу в режим сну і навпаки; стан прийому до сплячий режим і навпаки і одноразовий перехід з режиму очікування в сплячий режим. Моделювання енергоспоживання показали, що основним фактором загального середнього енергоспоживання бездротової мереж є споживана енергія під час передачі, а також енергію, спожиту під час прийому.

$$E_{Trans} = \frac{(P_{tx} + P_{rx}) \times M}{B \times P_{st}} \quad (1.2)$$

Де:

- E_{Trans} - це енергія, споживана ланцюгом трансивера в одному бездротовому каналу зв'язку;

- P_{tx} – потужність передачі;
- P_{rx} – потужність прийому;
- M – розмір пакету висхідної лінії зв'язку в бітах;
- B – швидкість передачі;
- P_{st} – ймовірність успішної передачі.

Час передачі даних T_d це випадкова змінна, яка моделює тривалість успішної передачі по одному каналу. Деякі з основних параметрів включають розмір даних, швидкість передачі даних і колізію пакетів.

Враховуючи ідеальні умови каналу, тривалість часу передачі можна моделювати як

$$T_d = \frac{M}{B} \quad (2.3)$$

Де:

- розмір даних (M): означає розмір даних, які передаються через посилання. Цей розмір є змінним залежно від типу повідомлення, яке передається, яке може бути повідомленням інтересу, повідомленням даних або керуючим повідомленням, таким як повідомлення підтвердження (АСК). Ця величина зазвичай вимірюється в бітах;

- Швидкість передачі даних (B): Ця величина представляє швидкість передачі даних і зазвичай вимірюється в бітах на секунду.

Також важливо підкреслити, що значна кількість енергії споживається в неактивному стані роботи радіозв'язку вузла NB-IoT. Витрати енергії під час простою прослуховування через час, витрачений на прослуховування під час очікування отримання пакетів, досить значні. У стані очікування можна вважати, що трансивер просто слухає шум каналу (фактична інформація не приймається або не передається), і, отже, споживає P_{Idle} кількість потужності для нормально розподіленого випадкового часу, коли немає значної активності радіо T_{Idle} . Споживання енергії трансивером у стані очікування може бути змодельовано як:

$$E_{Idle} = T_{Idle} + P_{Idle} \quad (2.4)$$

Вплив температури на енергоспоживання пристроїв NB-IoT. Температура є одним з найважливіших факторів, що впливають на енергоспоживання пристроїв NB-IoT. Її зміни можуть суттєво вплинути на роботу електронних компонентів, таких як мікроконтролери, датчики та радіомодулі.

То, як саме температура впливає на енергоспоживання?

З підвищенням температури зростає струм витоку в транзисторах, що призводить до збільшення споживання енергії в режимі очікування. Дослідження показали що при підвищенні температури на 10°C споживання енергії може зростати на 5-10% і більше.

Також зміна температури може впливати на ємність конденсаторів, опір резисторів та інші параметри компонентів, що призводить до зміни їх роботи і швидшому виходу з ладу. Зміни температури можуть призвести до нестабільної роботи пристрою, збоїв у передачі даних та інших проблем, таких як прискорення старіння акумулятора чи зниження його ємності.

Ознайомимся з прикладами впливу температури на роботу пристроїв NB-IoT. В датчиках температури та вологості, при низьких температурах може спостерігатися зниження точності вимірювань, а при високих – підвищена похибка. Зміна температури може впливати на чутливість приймача та потужність передавача UE.

Саме тому при виборі компонентів для пристрою NB-IoT необхідно звертати увагу на їхню робочу температуру. Пристрій слід розміщувати в місцях, де температура не піддається значним коливанням, якщо цього не можливо уникнути, для захисту пристрою від перегріву можна використовувати датчики температури та системи охолодження. Наприклад для відведення тепла від мікросхем можна використовувати теплові розсіювачі.

РОЗДІЛ 2 ІНТЕГРАЦІЯ NB-IOT В ТЕХНОЛОГІЇ ШІ, ЕФЕКТИВНІСТЬ І НЕДОЛІКИ

2.1 Визначення умов і вимог проекту покращення енергоефективності мережі NB-IoT

Визначення чітких умов і вимог є критично важливим кроком для успішного впровадження проекту з покращення енергоефективності мережі NB-IoT. Цей процес допоможе зосередити зусилля, визначити пріоритети та оцінити ефективність реалізованих заходів.

Потрібно почати з аналізу існуючої системи, адже це важливий етап будь-якого проекту, особливо, коли мова йде про вдосконалення або заміну існуючих процесів чи технологій. Аналіз можна розділити на наступні етапи:

- визначити характеристик наявних NB-IoT пристроїв (датчики, трекери, лічильники тощо). Місткість батареї (наприклад, 400 мАг) і напругу живлення;
- перевірити потужність сигналу пристрою та якість покриття мережі. Визначити частотний спектр, у якому працює мережа (наприклад, LTE Band 20, Band 8 тощо);
- перевірити частота передачі даних (інтервали, тригери подій). Встановити які обсяг переданих даних (пакети малого розміру);
- ознайомитись з програмним забезпечення, оновити його.

Наступним етапом потрібно визначити робочі умов, процес, який передбачає встановлення чітких правил та вимог, за яких будуть працювати пристрої в рамках конкретного проекту чи завдання, наприклад:

- температурні режими роботи (наприклад, від -20°C до +60°C);
- вологість, рівень пилу, механічні навантаження.

Визначення технічних вимог, фундаментальний етап у розробці будь-якого програмного або апаратного продукту, в якому потрібно:

- визначити необхідні програмні інструменти та бібліотеки для реалізації проекту;

- встановити вимоги до обладнання, включаючи процесори, пам'ять, інтерфейси;
- визначити, які протоколи будуть використовуватися для передачі даних і управління мережею;
- визначити, які стандарти і норми необхідно дотримуватися.

Пошук основних причин низької енергоефективності є критичним кроком для розробки ефективних заходів з енергозбереження. Причини можуть варіюватися залежно від конкретного об'єкта, процесу або системи, але існують загальні фактори, які часто призводять до неефективного використання енергії, наприклад:

- неоптимальні налаштування обладнання;
- зайві передачі даних;
- неефективні алгоритми маршрутизації;
- недостатня оптимізація програмного забезпечення.

Також важливим етапом процесу є моделювання сценаріїв використання мережі NB-IoT, це дозволяє оцінити потенційні застосування, визначити технічні вимоги та оптимізувати мережу для конкретних задач. Як приклад: Періодичне надсилання даних (кожні 30 хвилин).

Потрібно враховувати що формулювання чітких цілей є критично важливим кроком у будь-якому проекті, особливо в такому, що спрямований на підвищення енергоефективності. Цілі мають бути конкретними, досяжними, релевантними і тимчасово визначеними, наприклад:

- збільшити середній час автономної роботи датчиків з 3 до 5 років;
- зменшити кількість перепідключень пристроїв на 30% протягом 6 місяців;
- зменшити операційні витрати на 15% протягом 2 років.

Оцінка економічної ефективності є невід'ємною частиною будь-якого проекту, особливо в галузі енергетики. Впровадження заходів з підвищення енергоефективності мережі NB-IoT передбачає значні інвестиції, тому важливо розуміти, наскільки швидко вони окупляться, чи можливо вкладені інвестиції взагалі неможливо буде повернути. Обов'язково потрібно:

- розрахувати очікувані витрати на реалізацію проекту, включаючи витрати на обладнання, програмне забезпечення, роботи та послуги;
- провести розрахунок окупності, оцінити, за який період часу проект окупиться за рахунок економії енергії та інших переваг.

Для визначення вимог можна використовувати існуючі стандарти такі, як 3GPP і EN 301 528-10 які містять рекомендації щодо енергоефективності. Вибір конкретних інструментів залежить від складності пристроїв, вимог до точності і наявності ресурсів. Існують спеціалізовані прилади, що дозволяють вимірювати споживання енергії різними компонентами пристрою в реальному часі. Можна використати симулятори, що змодельюють роботу пристрою в різних умовах і дозволяють оцінити енергоспоживання теоретично. А математичні моделі дозволяють описати енергетичні процеси в пристрої і прогнозувати його енергоспоживання в різних режимах роботи.

Також потрібно не забувати що вимоги до проекту можуть змінюватися в процесі його виконання. Потрібне залучення до визначення вимог всіх зацікавлених сторін і потрібно ретельно документувати всі вимоги для подальшого використання.

2.2 Механізм енергозбереження на основі прогнозування

Характеристики NB-IoT, такі як повторювана передача NPUSCH і NPRACH, збільшують споживання енергії в пристрої IoT, таким чином помітно зменшуючи термін служби батареї. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано механізм енергозбереження на основі передбачення (PBESM) [12], який дозволяє передбачити розподіл ресурсів, щоб зменшити споживання енергії, спричинене процедурою запиту планування в мережі NB-IoT. PBESM прогнозує виникнення висхідної лінії зв'язку та затримку обробки на основі перевірки пакетів, а eNB попередньо призначає радіо ресурси для висхідної передачі пакетів. Таким чином, PBESM дозволяє надсилати пакети висхідної лінії без необхідності процедури запиту планування.

На рис.2.1. показано мережеву архітектуру NB-IoT, яка включає запропонований механізм. В основному він такий самий, як звичайна архітектура мережі та структура інтерфейсу, але враховує дві нові сутності, а саме сутність перевірки пакетів (PIE) і сутність передбачення пакетів (PPE). PIE, який логічно розташований на MME, визначає тип сеансу з перевірки заголовка пакета, наприклад, тип протоколу, номер порту та IP-адресу. Потім PIE прогнозує появу повідомлення відповіді висхідної лінії зв'язку зі стратегією як о затримка пейджингового виклику в PSM.

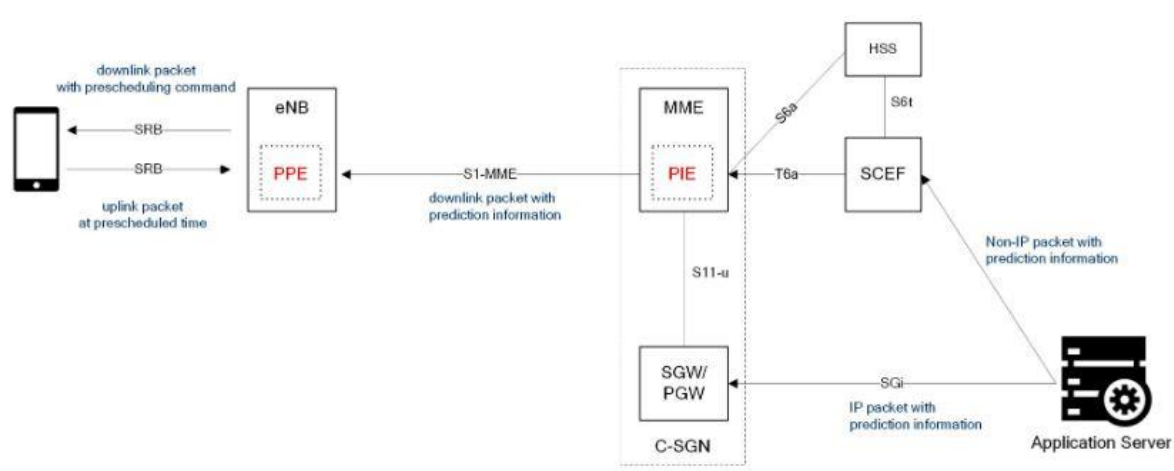


Рис.2.1. Архітектура мережі з механізмом енергозбереження на основі прогнозування (PBESM)

Механізм PBESM не потребує спеціального апаратного забезпечення на пристрої IoT, але вимагає простої модифікації мережевих об'єктів, включаючи перевірку пакетів і прогнозування затримки. Характеристики NB-IoT, такі як повторювана передача NPUSCH і NPRACH, збільшують споживання енергії в пристрої IoT, таким чином помітно зменшуючи термін служби батареї.

Симуляція на рівні мережі на рисунку 8 показала, що PBESM може досягти від 10% до 34% економії заряду батареї в різних сценаріях і покращити загальний час активності за сеанс до 16% у порівнянні з NPUSCH і NPRACH. Навіть у найгіршому випадку, який відповідає дуже короткому часовому сеансу з хорошою якістю каналу, активний час певною мірою збільшився, але споживання енергії

було різко зменшено. Враховуючи, що передача по висхідній лінії зв'язку затримується через помилку передбачення, загальний активний час для одного сеансу може збільшуватися, але час радіопередачі та споживання енергії зменшуються.

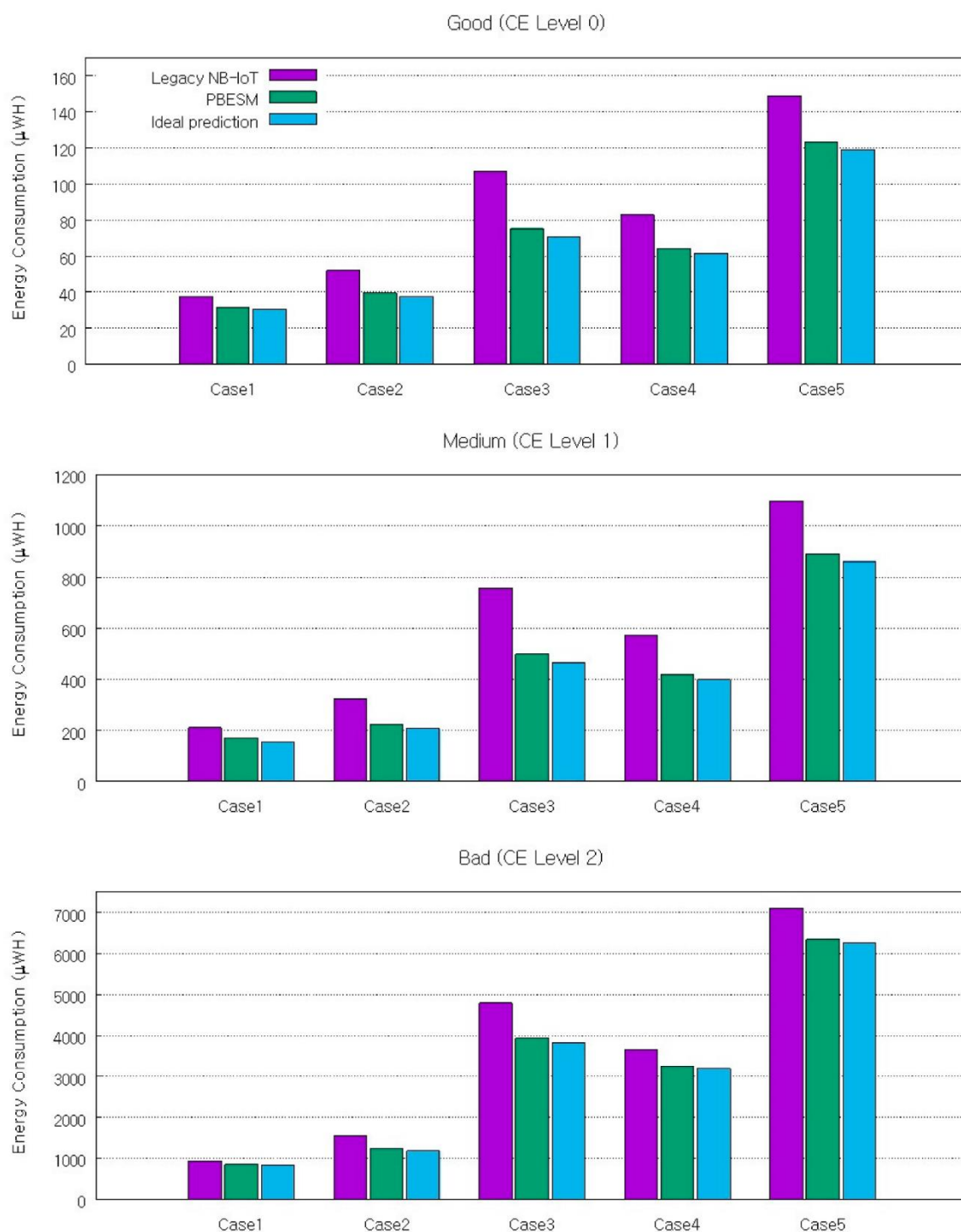


Рис.2.2. Споживання енергії відповідно до умов каналу для NB-IoT, PBESM та ідеального прогнозу

Для випадку коли використовується CoAP/DTLS/UDP, і передбачає, що контекст DTLS уже існує, але потрібне відновлення. Результати у сценарії вимірювального пристрою з батареєю AA ємністю 5 Вт·год і щоденної перевірки споживання енергії через мережу, термін служби батареї становить 12,26 років і середньої якості каналу в застарілому IoT, але він збільшується до 15,95 років шляхом застосування механізму PBESM.

2.3 Механізми адаптивного налаштування частоти передачі

Адаптивне налаштування частоти передачі (Adaptive Transmission Power Control, ATPC) є одним з ключових механізмів, що дозволяють оптимізувати енергоспоживання в мережах NB-IoT. Цей процес передбачає динамічну зміну потужності передавача базової станції залежно від умов поширення радіосигналу та вимог до якості обслуговування.

Розглянемо основні механізми ATPC в мережах NB-IoT, перший з яких вимірювання якості сигналу, що включає в себе:

- сила прийнятого сигналу (RSSI): Вимірювання рівня сигналу, прийнятого від пристрою. Чим вищий RSSI, тим меншу потужність необхідно для передачі;
- швидкість помилок бітів (BER): Вимірювання кількості помилок при передачі даних. Високий BER свідчить про погані умови поширення і потребує збільшення потужності;
- сигнал до шуму (SNR): Вимірювання співвідношення потужності сигналу до потужності шуму. Високий SNR дозволяє знизити потужність передавача.

Далі перерахуємо основні алгоритми управління потужністю, такі як:

- алгоритми на основі гістерезису - потужність передавача змінюється дискретними кроками в залежності від перевищення порогових значень RSSI або BER;

- алгоритми на основі прогнозування - використовують історичні дані про зміну умов поширення для прогнозування майбутніх значень і більш точного регулювання потужності;

- алгоритми на основі машинного навчання - застосовують методи машинного навчання для аналізу великих обсягів даних і прийняття рішень щодо зміни потужності.

Тепер зосередимся на факторах, що впливають на вибір алгоритму, таких, як складність середовища поширення. Адже в умовах з сильними завадами і швидкими змінами умов можуть бути ефективнішими алгоритми з прогнозуванням. Для критичних застосувань можуть використовуватися більш консервативні алгоритми, що гарантують високу надійність зв'язку, а складні алгоритми можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів.

Проведемо моделювання енергоефективності при застосуванні адаптивного налаштування частоти передачі, за таких умов:

Тестові сценарії:

1. Статична передача: Пристрій передає дані з постійною частотою, незалежно від умов середовища та змін у показниках.

2. Адаптивна передача: Частота передачі динамічно змінюється залежно від подій, стану мережі та важливості даних.

Параметри тестування:

- енергоспоживання під час передачі: Вимірюється загальне енергоспоживання пристрою за один цикл передачі;

- частота пробудження пристрою: Вимірюється частота, з якою пристрій "прокидається" для передачі даних;

- час автономної роботи: Визначається загальний час роботи пристрою від одного заряду акумулятора.

Результат тестів енергоспоживання під час передачі, показав наступне:

- у сценарії зі статичною частотою передачі пристрій передає дані регулярно, що призводить до вищого енергоспоживання через часті переходи з

режиму сну в активний режим;

- в адаптивному сценарії енергоспоживання знижується на 20-40%, оскільки пристрій передає дані лише тоді, коли це необхідно (наприклад, під час виявлення подій або значних змін).

Частота пробудження пристрою:

- при статичному налаштуванні частота пробудження фіксована (наприклад, кожні 10 хвилин), що збільшує енергоспоживання;

- в адаптивному сценарії пристрій пробуджується рідше, особливо в періоди низької активності (без змін або подій), що знижує частоту пробудження і, відповідно, енергоспоживання.

Час автономної роботи:

- при статичній передачі пристрій працює на одному заряді акумулятора менший час через постійне активування для передачі даних;

- адаптивна передача дозволяє продовжити час автономної роботи на 30-50% завдяки оптимізації передачі даних та зменшенню частоти пробуджень пристрою;

У реальних тестових мережах, де застосовували адаптивну частоту передачі, результати показали:

- збільшення енергоефективності на 35-50% залежно від середовища (зміни сигналу, події, кількість переданих даних);

- зменшення загальної кількості передачі даних на 20-30% через оптимізацію інтервалів і скорочення службової сигналізації;

- підвищення стабільності зв'язку: Зменшення кількості активних сесій знижує ймовірність перевантаження мережі, що позитивно впливає на якість зв'язку.

Но при всіх перевагах, чи має, такий механізм недоліки?! звісно має, основний з них це необхідність часу на відпрацювання алгоритму. Так, як більшість алгоритмів АТРС змінюють потужність дискретними кроками, це може призвести до деякої затримки у реагуванні на зміни умов поширення, особливо в динамічних середовищах. Частота вимірювання параметрів каналу також впливає на швидкість

реакції системи. Занадто рідкісні виміри можуть призвести до того, що система не встигне відреагувати на швидкі зміни умов. Також через складні алгоритми, вони вимагають значних обчислювальних ресурсів, що може бути проблематично для пристроїв з обмеженою обчислювальною потужністю. Для ефективного використання АТРС необхідно враховувати ці обмеження і розробляти алгоритми, які будуть оптимальними для конкретних умов експлуатації мережі. Неправильна реалізація алгоритмів АТРС також може створювати вразливості для кібератак, наприклад, дозволяючи зловмисникам маніпулювати потужністю передавача.

2.4 Інтеграція NB-IoT з Штучним інтелектом

Використання штучного інтелекту (AI) у системах Інтернету речей (IoT) привернуло значну увагу завдяки його потенціалу для підвищення ефективності, функціональності та прийняття рішень. Зростання ринку штучного інтелекту фіксується по всьому світі, обсяг світового ринку штучного інтелекту в 2023 році оцінювався у 196,63 мільярда доларів США, і експерти очікують його подальше зростання на 36,6% з 2024 по 2030 рік. Ринок характеризується високим ступенем інновацій завдяки стрімкому технологічному прогресу, спричиненому такими факторами, як прогрес у алгоритмах машинного навчання, доступність великих даних і збільшення обчислювальної потужності. Компанії використовують послуги штучного інтелекту, щоб зменшити загальні операційні витрати та отримати більше прибутку.

Генеративний ШІ (GenAI) - область штучного інтелекту, яка фокусується на створенні нового контенту (текстів, зображень, музики, кодів та іншого). Моделі GenAI навчаються на великих обсягах даних і потім використовують ці знання для генерації нового, оригінального контенту. Обсяг глобального ринку генеративного штучного інтелекту (GenAI) становив 17,65 мільярда доларів США у 2023 році, 25,86 мільярда доларів США у 2024 році, і очікується, що він сягне приблизно 803,90 мільярда доларів США до 2033 року, збільшуючись із CAGR на 46,5% з 2024 по 2033 рік.

Поєднання генеративного штучного інтелекту (GenAI) та NB-IoT передбачає складну, але ефективну архітектуру, в якій пристрої збирають дані з навколишнього середовища (температура, вологість, вібрація тощо) і через мережу NB-IoT передають їх на сервер. На сервері GenAI аналізує зібрані дані, виявляє закономірності, чи аномалії. На основі результатів аналізу GenAI приймає рішення, які у вигляді команд відправляються на пристрої NB-IoT для виконання.

Наприклад аналізуючи дані з датчиків температури в будинку, GenAI може створювати персоналізовані сценарії опалення, що забезпечать максимальний комфорт для мешканців.

Також моделі GenAI можуть виконувати обчислення безпосередньо на пристроях NB-IoT. Але через те що пристрої NB-IoT мають обмежену обчислювальну потужність, пам'ять та енергію це все ще складно реалізувати, адже моделі GenAI можуть бути дуже великими і вимагати значних обчислювальних ресурсів. Для інтеграції на пристрій краще підходить Edge AI.

Периферійний ШІ(Edge AI) - це перенесення можливостей штучного інтелекту з централізованих хмарних серверів безпосередньо на периферійні пристрої. Обробка даних відбувається прямо на пристрої, без необхідності відправляти їх в хмару. Це забезпечує швидку обробку даних і дозволяє пристроям працювати автономно. Розмір глобального ринку штучного інтелекту Edge AI, теж стрімко зростає і до 2033 року становитиме близько 163 мільярдів доларів США з 19 мільярдів доларів США у 2023 році, зростаючи на 24,1% у середньому протягом прогнозованого періоду з 2024 по 2033 рік. Ринок апаратного забезпечення Edge AI значно зросте, і його розмір, за прогнозами, становитиме близько 43 мільярдів доларів США до 2033 року, порівняно з 8 мільярдами доларів США у 2023 році, що становить CAGR 19,2% протягом прогнозованого періоду з 2024 по 2033 рік. Ефективність периферійних інтелектуальних пристроїв підкреслюється очікуванням, що до 2025 року ці пристрої оброблятимуть 18,2 зетабайта даних на хвилину, що значно зменшить хмарний трафік до 99% до того ж року.

При такій інтеграції технологій, сенсори на пристрої збирають дані з

навколишнього середовища а Edge AI модель, розміщена на пристрої, аналізує зібрані дані в реальному часі. На основі результатів аналізу модель приймає рішення і генерує команди подальших дій. Лише важливі дані або результати аналізу можуть бути передані в хмару для подальшої обробки або зберігання.

Але нажаль не всі периферійні пристрої мають відповідні обчислювальні потужності. А створення моделей Edge AI вимагає спеціальних знань і інструментів, адже необхідно забезпечити баланс між потужністю обчислень і енергоспоживанням.

Можно і одночасно використовувати такі підходи, як Edge AI та GenAI.

Пристрої збирають дані з навколишнього середовища, Edge AI виконує обчислення ШІ прямо на периферійних пристроях, тобто там, де збираються дані. Це означає, що замість відправки всіх даних в хмару для обробки, основна частина обробка відбувається локально. NB-IoT забезпечує низькоенергетичне з'єднання між пристроями та сервером. GenAI може використовуватися для аналізу даних з великої кількості пристроїв, шукаючи аномалії або закономірності. В контексті інтеграція NB-IoT з Edge AI та GenAI може використовуватися для прогнозування, створення синтетичних даних для навчання моделей або навіть для генерації нових сценаріїв використання.

Для прикладу ми розглянемо систему моніторингу стану сільськогосподарських культур. Датчики, підключені через NB-IoT, збирають дані про вологість ґрунту, температуру, освітленість тощо. Замість відправки всіх цих даних в хмару, модель Edge AI, що працює на самому датчику, може:

- проаналізувати дані в реальному часі. Наприклад визначити, чи рослини потребують поливу або чи є ризик захворювання;
- спрогнозувати майбутні потреби рослин в поливі або добривах, використовуючи GenAI;
- на основі прогнозу, автоматично скоригувати режим поливу або подати сигнал фермеру.

Переваги такого поєднання:

- зниження затримки адже локальна обробка даних на Edge дозволяє

приймати рішення в реальному часі;

- дані не покидають пристрій, що знижує ризик їх перехоплення, що збільшує конфіденційність;

- зниження витрат на передачу даних та обчислювальні ресурси в хмарі;

- покращення надійності, адже система стає менш залежною від стабільності мережі;

- нові можливості застосування, такі як прогнозування, персоналізація та створення нових продуктів.

Вибір оптимальної архітектури для системи на основі ШІ, Edge AI та NB-IoT залежить від конкретних вимог проекту. Для простих завдань достатньо локальної обробки на пристрої, яка має високу ступінь конфіденційності. Якщо необхідна швидка реакція, обчислення виконуються на краю мережі. Но для складних завдань потрібна потужність сервера або хмари і розгортання централізованої системи може бути дорожчим, ніж децентралізованої.

В цілому поєднання NB-IoT та ШІ демонструє високу ефективність у різних галузях, дозволяючи автоматизувати процеси, підвищити продуктивність та знизити витрати.

Але значними недоліками цих технологій є складність і вартість впровадження, їх альтернативою можуть стати алгоритми машинного навчання.

Штучний інтелект (ШІ) це широка галузь, що охоплює широкий спектр технологій, від простих алгоритмів до складних нейронних мереж.

Алгоритми машинного навчання дозволяють аналізувати великі обсяги даних, отриманих від датчиків NB-IoT, і виявляти закономірності, які можна використовувати для прийняття інтелектуальних рішень щодо управління енергоспоживанням.

RNN (Рекурентні нейронні мережі). RNN (Рекурентні нейронні мережі)— це тип штучних нейронних мереж, спеціально розроблений для роботи з послідовними даними. На відміну від звичайних нейронних мереж, які обробляють кожен вхідний елемент незалежно, RNN мають внутрішній стан, який дозволяє їм "пам'ятати" попередні входи.

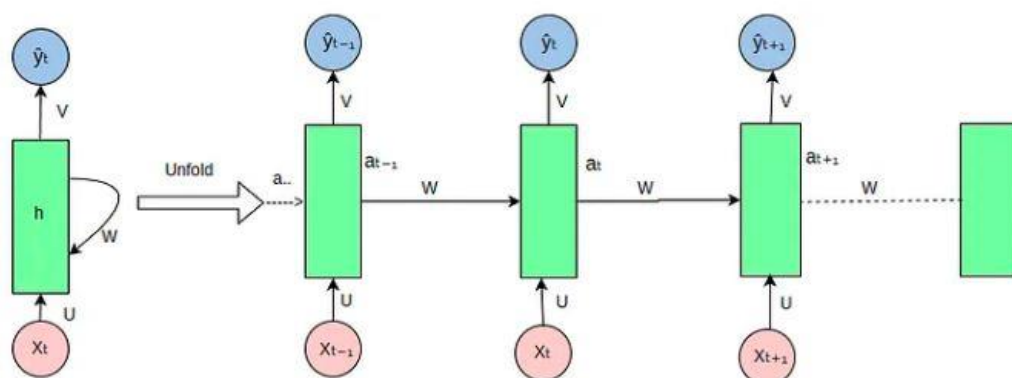


Рис.2.3. RNN у розгорнутому вигляді

Це працює так, RNN приймає вхідний вектор X , а мережа генерує вихідний вектор y , скануючи дані послідовно зліва направо, з кожним кроком у часі, оновлюючи прихований стан і створюючи вихід. Він має однакові параметри на всіх етапах часу. Це означає, що однаковий набір параметрів, представлений U , V , W , використовується послідовно в усій мережі. U представляє ваговий параметр, який регулює з'єднання від вхідного шару X до прихованого шару h , W представляє вагу, пов'язану зі з'єднанням між прихованими шарами, і V для з'єднання від прихованого шару h до вихідного шару y . Цей спільний доступ до параметрів дозволяє RNN ефективно фіксувати тимчасові залежності та ефективніше обробляти послідовні дані, зберігаючи інформацію з попереднього введення в поточному прихованому стані.

Ключовими перевагами застосування, це аналіз даних датчиків у реальному часі. Пристрої NB-IoT збирають дані з датчиків машин та обладнання і передають їх у хмару. Моделі RNN аналізують історичні дані для виявлення закономірностей та аномалій, прогнозуючи потенційні збої до їх виникнення. Завдяки прогнозуванню поломок, команди з обслуговування можуть планувати втручання заздалегідь, зменшуючи простой та витрати.

Розглянемо приклад застосування у охороні здоров'я. Пристрої NB-IoT збирають життєво важливі показники та інші медичні дані від пацієнтів. Моделі RNN аналізують дані пацієнтів для виявлення ранніх ознак захворювання або

погіршення стану здоров'я. Аналізуючи дані пацієнтів та медичну історію, моделі RNN можуть допомогти лікарям розробити індивідуальні плани лікування.

Як RNN сприяють енергоефективності?! Моделі RNN можуть прогнозувати поведінку системи та оптимізувати роботу пристроїв, зменшуючи кількість непотрібних передач даних. А швидке виявлення аномалій дозволяє вчасно реагувати на проблеми та уникати тривалого збору непотрібних даних. Також RNN можуть керувати режимами роботи пристроїв, адаптуючи їх до поточних умов та зменшуючи енергоспоживання.

Поєднання RNN і NB-IoT відкриває широкі можливості для створення енергоефективних IoT-систем. Завдяки здатності RNN аналізувати великі обсяги даних та прогнозувати майбутні події, можна оптимізувати роботу пристроїв та зменшити їх енергоспоживання. Однак, для досягнення максимальної енергоефективності необхідно ретельно підбирати параметри системи та враховувати специфіку конкретного застосування. Рекурентні нейронні мережі (RNN) є потужним інструментом для обробки послідовних даних, але мають свої обмеження. При навчанні глибоких RNN градієнти можуть експоненційно зменшуватися при зворотному поширенні, що ускладнює навчання мережі та унеможливорює навчання довгострокових залежностей. Або навпаки, градієнти можуть експоненційно зростати, що призводить до нестабільності навчання та розбіжності моделі.

Для ефективного навчання RNN потрібна велика кількість даних, особливо для складних завдань. Загалом навчання RNN є обчислювально дорогим процесом, особливо для довгих послідовностей і глибоких мереж. Внутрішня робота RNN може бути складною для розуміння, що ускладнює інтерпретацію отриманих результатів.

Для подолання цих недоліків були розроблені різні модифікації RNN, такі як:

- LSTM (Long Short-Term Memory)- тип RNN має спеціальні механізми, які дозволяють моделювати довгострокові залежності, вирішуючи проблему зникаючого градієнта;

- GRU (Gated Recurrent Unit) - подібний до LSTM, але має більш просту структуру;

- Attention механізми дозволяють мережі фокусуватися на найбільш релевантних частинах вхідної послідовності;

Вибір конкретного типу RNN залежить від конкретного завдання та наявних даних.

RNN добре підходять для завдань, де порядок даних має значення, наприклад:

- обробка природної мови: переклад, генерація тексту, аналіз настроїв;
- розпізнавання мови: перетворення звукових сигналів у текст;
- аналіз часових рядів: прогнозування цін на акції, погоди тощо;
- генерація послідовностей: створення музики, тексту, відео.

RNN є потужним інструментом для обробки послідовних даних, але мають свої обмеження. Розуміння цих недоліків RNN дозволяє більш ефективно використовувати їх у реальних проектах.

Reinforcement Learning. Підсилювальне навчання (Reinforcement Learning, RL) метод навчання машинного навчання, де агент діє в середовищі, отримуючи винагороди або штрафи за свої дії. Мета агента – максимізувати сумарну винагороду за певний період часу.

Основні алгоритми, які застосовуються:

- Q-learning: Один з найпростіших алгоритмів, але може бути неефективним для складних завдань.

- Deep Q-Networks (DQN): Поєднує Q-learning з глибокими нейронними мережами для обробки великих обсягів даних.

- Actor-Critic: Алгоритми, які використовують два окремі компоненти: актора (вибирає дії) та критика (оцінює значення станів).

Принцип роботи методу полягає в тому IoT-пристрій, оснащений NB-IoT, виступає агентом у системі підсилювального навчання. Середовище навчання це фізичний світ, в якому діє пристрій, є середовищем. Пристрій може виконувати різні дії, наприклад, змінювати налаштування датчиків, регулювати споживання

енергії тощо. Пристрій отримує винагороду або штраф залежно від результатів своїх дій. Наприклад, зменшення енергоспоживання може бути винагородою, а перевищення ліміту – штрафом. А вже на основі отриманих винагород агент коригує свою стратегію, щоб у майбутньому приймати більш вигідні рішення.



Рис.2.4. Принцип роботи Reinforcement Learning

Навчання з підкріпленням ґрунтується на процесі прийняття рішень з Маркова – математичного моделювання прийняття рішень з використанням дискретних тимчасових кроків. На кожному етапі агент виконує нову дію, що призводить до зміни стану довкілля. Так само поточний стан приписується послідовності попередніх дій.

Шляхом проб і помилок при переміщенні середовище агент створює набір правил або політик типу «якщо-то». Ці правила допомагають компанії вирішити, які дії вжити далі для отримання оптимальної сукупної винагороди. Агент також повинен вибрати між подальшим дослідженням середовища для отримання нових винагород за дії у стані та вибором відомих дій у даному стані з високою винагородою. Це називається компромісом між розвідкою та експлуатацією.

При задачі оптимізації енергоспоживання, мета навчити агента визначати оптимальні моменти для збору та передачі даних, мінімізуючи енергоспоживання. Приклад:

- середовище: Кімната з різною температурою;

- агент: Сенсор температури, який може змінювати частоту збору даних;
- дії: Збільшити частоту, зменшити частоту, залишити без змін;
- винагорода: Мінімізувати енергоспоживання при збереженні точності вимірювань.

Нажаль навчання моделей підсилювального навчання може займати багато часу, особливо для складних завдань. Все через велику кількість можливих станів і дій ускладнює процес навчання. Реальний світ є невизначеним, що ускладнює точне прогнозування наслідків дій агента. Багато IoT-пристроїв мають обмежені обчислювальні ресурси, що ускладнює використання складних алгоритмів підсилювального навчання. Вибір алгоритму підсилювального навчання залежить від конкретного завдання та обмежень. Затримки в передачі даних можуть призвести до нестабільності навчання та зниження ефективності.

Для подолання недоліків потрібна оптимізація гіперпараметрів, використання методів автоматичної оптимізації гіперпараметрів. Прискорення навчання можна розподілити обчислення між декількома пристроями, а для прискорення навчання можна використовувати моделі, які були навчені на інших завданнях. Для зменшення складності задачі можна спростити модель середовища.

Загалом підсилювальне навчання є потужним інструментом, але його застосування в IoT має свої особливості та виклики. Для успішної реалізації необхідно ретельно аналізувати завдання, вибирати відповідний алгоритм і враховувати обмеження системи.

Decision Trees and Random Forest. Decision Trees and Random Forest(Дерево рішень) модель, у певному сенсі близька до моделі прийняття рішень людиною. Як приклад, співробітник банку ставить питання позичальнику і за його відповідями на певному етапі вирішує, чи доцільно видати кредит такому позичальнику.

Дерева рішень та випадкові ліси можуть бути використані в IoT та NB-IoT для виявлення аномалій, визначення незвичайних або помилкових даних, які можуть свідчити про несправність пристрою або зміну умов середовища. Для

класифікації подій, при розпізнаванні різних типів подій, таких як аварії, перевищення порогів, зміни стану. Передбачення майбутніх значень на основі історичних даних, наприклад, прогнозування споживання енергії або попиту на ресурси.

При прийнятті рішень можуть відповідати за оптимізацію ресурсів і управління системами.

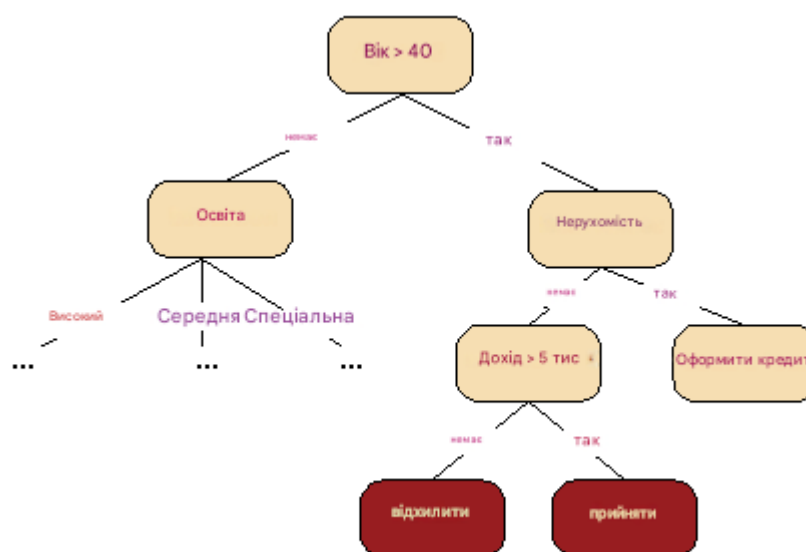


Рис.2.5. Дерево рішень

Дерева рішень та випадкові ліси добре підходять для NB-IoT, адже можуть легко візуалізувати та зрозуміти, що важливо для аналізу даних в IoT, де прозорість моделі часто є критичною. Їх алгоритми ефективно працюють з різними типами даних, включаючи категоріальні, що часто зустрічаються в IoT (наприклад, тип датчика, стан пристрою і можуть бути ефективно реалізовані на пристроях з обмеженими обчислювальними ресурсами, що характерно для багатьох IoT-пристроїв.

Хоча дерева рішень та випадкові ліси є потужними інструментами для аналізу даних в IoT, вони мають певні недоліки, які варто враховувати при їх застосуванні.

Це і схильність до перенавчання, особливо це стосується глибоких дерев, які можуть надмірно підлаштовуватися під навчальний набір, що призводить до поганої генералізації на нових даних. І їх нестабільність, навіть невеликі зміни в навчальних даних можуть призвести до значних змін у структурі дерева рішень. Дерева рішень краще працюють з категоріальними даними, ніж з числовими. Для числових даних можуть знадобитися додаткові методи обробки. Для виявлення складних нелінійних залежностей можуть знадобитися глибокі дерева, що може призвести до перенавчання.

Кластеризація. Кластеризація, або кластерний аналіз — це статистична процедура, задача якої полягає в розбитті вибірки об'єктів на підмножини, що не перетинаються і називаються кластерами. Кожен кластер має складатися зі схожих об'єктів, а об'єкти різних кластерів мають істотно відрізнятися один від одного. Задача кластеризації відноситься до статистичної обробки, а також до широкого класу задач навчання без вчителя.

Кластеризація, як некерований метод машинного навчання, є потужним інструментом для аналізу даних, отриманих від пристроїв NB-IoT. Вона дозволяє групувати пристрої за схожими характеристиками, що може бути корисним для оптимізації ресурсів, виявлення аномалій та прогнозування.

Основні методи кластеризації для NB-IoT:

- K-means - один з найпоширеніших алгоритмів кластеризації. Він розподіляє дані на задану кількість кластерів, мінімізуючи суму квадратів відстаней від кожної точки до центру її кластера.
- Ієрархічна кластеризація поступово об'єднує або розділяє дані, утворюючи ієрархічну структуру кластерів.
- DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) метод що виявляє кластери довільної форми, базуючись на щільності даних.
- Кластеризація на основі густини, групує дані в кластери з високою щільністю точок, відокремлені низькою щільністю областями.

Розглянемо принцип роботи і приклад кластеризації сенсорів температури в будинку за допомогою K-means. З сенсорів протягом певного періоду збираються дані про температуру, потім визначається оптимальне число кластерів, наприклад, 3 (холодна зона, нормальна температура, тепла зона). Вибираються випадкові точки як початкові центри кластерів, кожна точка даних присвоюється до найближчого центру кластера. Центри кластерів перераховуються як середнє значення всіх точок у кожному кластері. Процес повторюється до збіжності або досягнення максимального числа ітерацій. Отримані кластери можуть бути використані для оптимізації роботи системи опалення, наприклад, шляхом встановлення різних температурних режимів для різних зон.

Перевагами кластеризації для енергоефективності NB-IoT є оптимізація передачі даних, можна виявити групи пристроїв з подібними профілями використання, що дозволить оптимізувати частоту передачі даних для кожного кластера, зменшуючи загальне енергоспоживання. Кластеризація допомагає виявити пристрої з аномальною поведінкою, що може свідчити про несправності або інші проблеми, які потребують уваги. На основі кластерів можна прогнозувати майбутнє поведінку пристроїв, що дозволяє оптимізувати роботу системи в цілому.

До недоліків кластеризації можна віднести великий вибір кількості кластерів. Вибір оптимального числа кластерів залишається відкритим питанням і часто вимагає експертної оцінки. Вибір відповідної метрики відстані для визначення подібності між об'єктами може вплинути на результати кластеризації. Інтерпретація отриманих кластерів може бути складною, особливо для великих і багатовимірних даних.

Поєднання методів машинного навчання абсолютно можливо і досить перспективно поєднувати кластеризацію, дерева рішень, підсилювальне навчання і RNN для вирішення складних задач в рамках NB-IoT. Кожен з цих методів має свої сильні сторони і може доповнювати інші, забезпечуючи більш точні та надійні результати.

Розглянемо, як можна поєднати ці методи.

Попередню обробку даних краще проводити за допомогою кластеризації, розділивши дані на групи з подібними характеристиками, що спростить подальший аналіз. Потім це дозволить виявити аномалії, які можуть бути важко виявити іншими методами. Дерево рішень або випадкових лісів краще використовувати для інтерпретації кластерів. Це дозволить побудувати модель дерева рішень для кожного кластера, щоб зрозуміти, які саме характеристики найбільше впливають на приналежність до того чи іншого кластера. А підсилувальне навчання застосовувати для покращення точності прогнозування. Можна створити ансамбль моделей (наприклад, градієнтний бустинг), що поєднують в собі кілька дерев рішень, для більш точного прогнозування. RNN використати для моделювання часових рядів. Якщо дані мають часову залежність, RNN можуть бути використані для прогнозування майбутніх значень або виявлення аномалій. Наприклад, можна використовувати RNN для прогнозування енергоспоживання пристрою на основі історичних даних.

Переваги такого підходу буде покращення точності прогнозування, адже поєднання різних методів дозволяє враховувати різні аспекти даних і створювати більш точні моделі. Збільшення інтерпретованості моделей бо дерева рішень допомагають зрозуміти, які фактори найбільше впливають на прогноз. Це збільшить гнучкість системи, дасть можливість адаптації до різних типів даних і завдань.

І важливо що покращить енергоефективність, адже оптимізація роботи сенсорів на основі точних прогнозів дозволяє зменшити загальне енергоспоживання.

РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ NB-IOT

Результати вимірювань, наведені в цьому розділі, виконуються за допомогою nRF9160 DK. Енергоспоживання DK фіксувалось за допомогою Nordic Power Profiler Kit 2 .

nRF9160 DK — попередньо сертифікований одноплатний набір для розробки і тестування. Пристрій має процесор Arm Cortex-M33, повноцінний модем , RF Front End (RFFE) і систему керування живлення. Підтримує функції енергозбереження, включаючи eDRX і PSM, підтримуються як є з підтримкою IPv4/IPv6 до рівня транспортування та безпеки (TCP/TLS).

Nordic Power Profiler Kit 2 - вдосконалений аналоговий вимірювальний блок із широким динамічним діапазоном вимірювання. Це дозволяє точно вимірювати споживання електроенергії для всього діапазону, який зазвичай спостерігається у вбудованих додатках з низьким енергоспоживанням, від одного мкА до 1 А. Роздільна здатність коливається від 100 нА до 1 мА залежно від діапазону вимірювань і є достатньо високою для виявлення невеликих стрибків, які часто спостерігаються в оптимізованих системах з низьким енергоспоживанням.

Також виробник надає доступ до онлайн платформи тестування : Online Power Profiler for Nb-Iot.

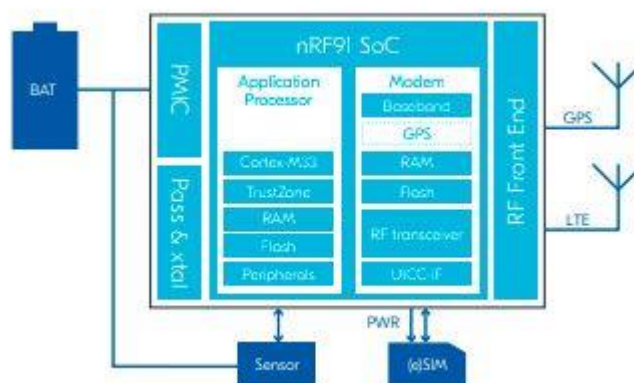


Рис.3.1. Схема застосування

3.1. Енергоєфективні протоколи передачі даних в NB-IoT

Стільниковий зв'язок має 2 рівні підключення: рівень керування і рівень даних (рівень користувача). Для пристроїв IoT з низьким енергоспоживанням, яким потрібно часто або рідко підключатися до мережі, використання стека протоколу IP для доставки даних може бути енергоємним процесом.

NIDD (Non-IP Data Delivery) - це технологія передачі даних в мережах NB-IoT, яка дозволяє обмінюватися інформацією між пристроями IoT та сервером без використання повного стеку IP-протоколів. За рахунок спрощеної структури повідомлень та відсутності необхідності в повному IP-стеку, пристрої IoT можуть працювати довше на одному заряді батареї.

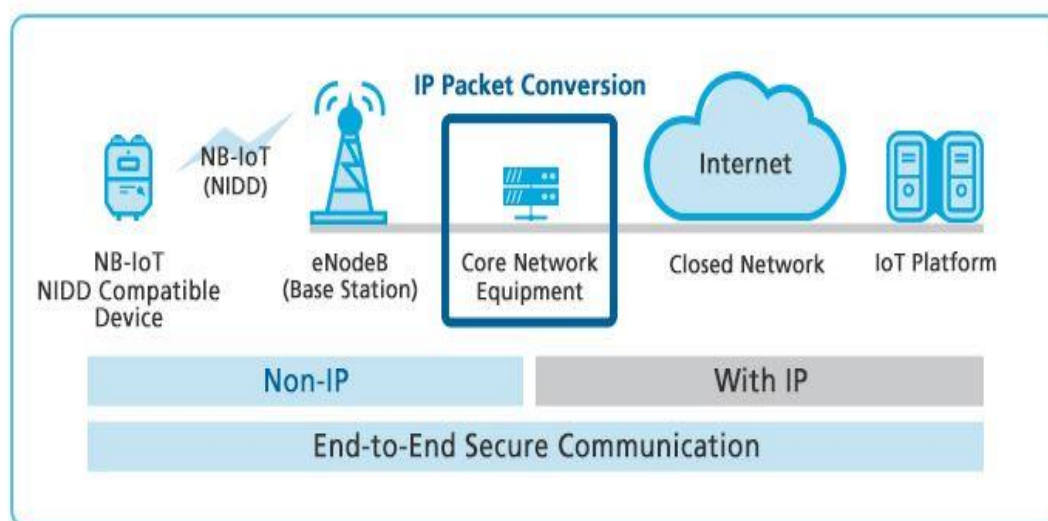


Рис.3.2. Зображення передачі даних за допомогою технології NIDD

Але нажаль NIDD має обмежену функціональність, адже не підтримує всі функції, доступні в традиційних IP-мережах, таких як QoS, безпека та маршрутизація. І вимагає підтримки з боку оператора мобільного зв'язку. NIDD може бути безпечним рішенням для передачі даних в NB-IoT мережах за умови правильного застосування заходів безпеки, наприклад сильних алгоритмів шифрування та аутентифікації для захисту даних.

Поеднання NIDD з SCHC дозволяє досягти більшої ефективності передачі

даних.

SCHC (Static Context Header Compression) – це стандартний протокол, розроблений спеціально для оптимізації передачі даних у мережах з низькою пропускнуою здатністю, таких як LPWAN (Low-Power Wide-Area Networks), включаючи NB-IoT. Його основна мета – зменшити розмір пакетів даних шляхом стиснення заголовків, що дозволяє знизити енергоспоживання пристроїв IoT та підвищити ефективність використання радіоканалу.

На рис.3.3. зображено, як працює SCHC . Через стиснення 80% структури кадру IoT є ідентичними від одного повідомлення до іншого. SCHC видаляє будь-які зайві дані. Після Декомпресії надісланий кадр містить контекст зв'язку та ключові дані для реконструкції вихідного повідомлення.

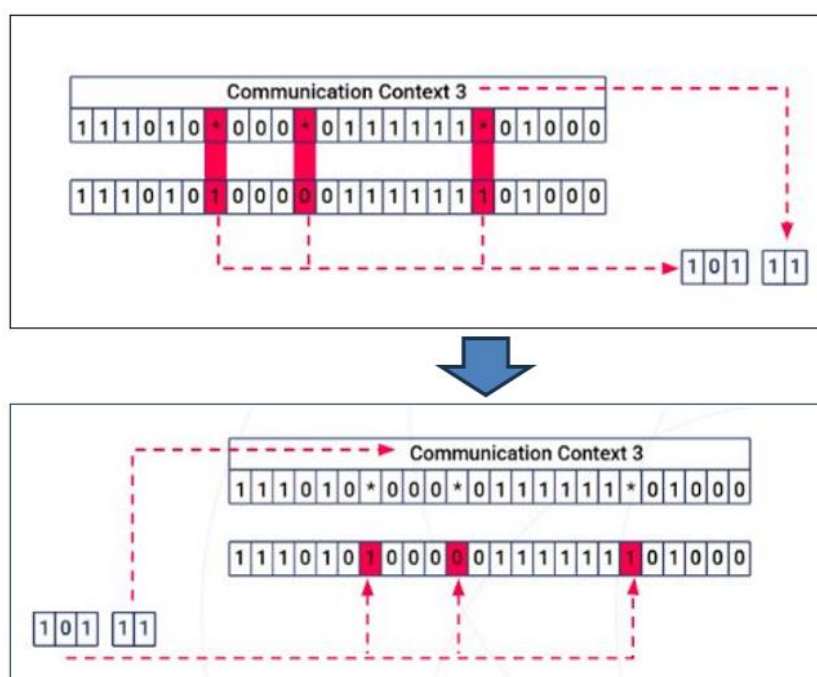


Рис.3.3. Стиснення і декомпресія

У NIDD протокол IP не використовується як транспортний рівень, який усуває велику частину накладних витрат. Практичні тестування застосування SCHC і NIDD у порівнянні зі звичайним зв'язком NB-IoT на nRF9160 SiP, показали 74-відсоткове скорочення трафіку. На рисунку 5 показані результати застосування, при пересиланні пакетів 200 байт. У випадках коли NIDD не використовується або

не підтримується мережею, оптимізований DTLS показав мінімум 64-відсоткове зниження трафіку порівняно зі звичайною мережею NB-IoT.

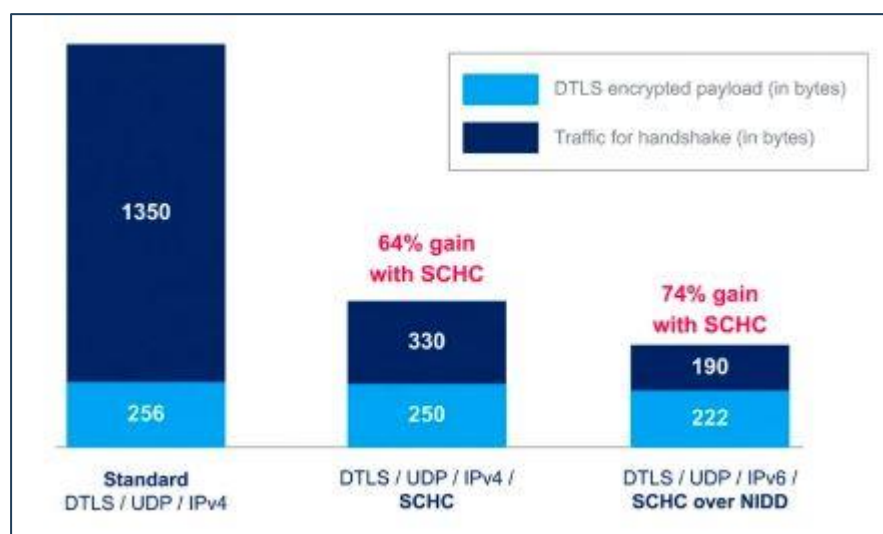


Рис.3.4. Продуктивність SCHC, NIDD

При впровадженні їх у масштабних мережах з мільйона пристроїв, наприклад, інтелектуальних лічильників, скорочення трафіку може становити більше 300 ГБ даних на рік. Така економія означає зниження вартості передплати, нижче енергоспоживання, кращу затримку та покращену пропускну здатність мережі.

3.2 Механізм AS-RAI

Для покращення ефективності передачі даних і управління ресурсами радіомережі в мережах NB-IoT використовується механізм Active Scheduling Radio Access Indication.

У 2017 році для NB-IoT вийшов Release 14 версії, що включав у собі покращення з метою підтримки ширшого спектра IoT пристроїв та сценаріїв використання, що дозволило досягти більшої гнучкості, енергозбереження та розширення діапазону можливих застосувань IoT пристроїв. AS-RAI є частиною протоколів, які забезпечують ефективну передачу даних при низькому

енергоспоживанні для пристроїв Інтернету речей.

Як вже вказувалось раніше, EU працює у трьох режимах, а саме: з'єднання, неактивний і очікування. І незалежно від застосованої техніки енергозбереження, пристрій завжди у режимі з'єднання RRC виконуватиме передачу даних, а потім чекатиме періоду не активності RRC, перш ніж задіяти режим очікування RRC.

Мережа диктує період таймера не активності RRC, і пристрій не може узгодити його. Таким чином, якщо це значення таймера тривале, це може без потреби збільшити споживання електроенергії під час очікування перемикання в режим очікування RRC. Цей таймер може тривати 5 секунд або, в гіршому випадку, до 60 секунд, що може серйозно знизити термін служби батареї, якщо пристрій потрібно вмикати радіо на додаткові 60 секунд щоразу, коли він перебуває в режимі RRC Connected.

AS-RAI дає пристрою можливість інформувати мережу про завершення передачі даних (більше немає даних висхідної лінії зв'язку), і він запитує мережу звільнити радіоресурс (вивільнення RRC), таким чином дозволяючи пристрою перейти в режим очікування RRC раніше. Це означає, що пристрій пропускає період моніторингу пейджингових повідомлень з мережі (RRC Inactivity Timer). Це значно впливає на енергоспоживання, оскільки без використання AS-RAI пристрій довелося б непотрібно тримати своє радіо у таймера бездіяльності RRC.

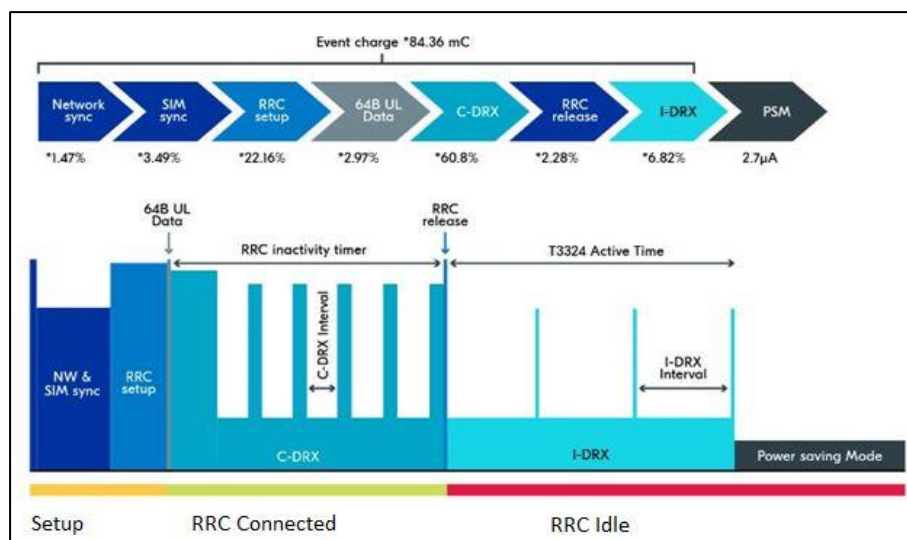


Рис.3.5. Енергоспоживання з увімкненим AS-RAI

Як показано на рис.3.6, за допомогою AS-RAI весь період cDRX пропускається, і пристрій може перейти в режим очікування відразу після завершення передачі даних.

Розглянемо практичні результати вимірювання AS-RAI, мета цього тесту побачити, як AS-RAI заощаджує енергію, порівнюючи час і струм, споживаний UE під час надсилання UDP-пакету з вимкненою AS-RAI та надсилання UDP-пакету з увімкненим AS-RAI. Під час тесту ми будемо вимірювати час і енергію, спожиту протягом усієї події надсилання UDP-пакету.

Це дозволить нам побачити, як RAI впливає на енергоспоживання в NB-IoT. Перевірятимемо у двох станах, перший коли AS-RAI вимкнено, а UE налаштовано на надсилання UDP-пакету. Другий коли AS-RAI увімкнено, потім надсилається ще один UDP-пакет

В результаті тестування ми очікуємо побачити те, що без AS-RAI радіоактивність UE підвищиться, щоб надіслати UDP-пакет, потім радіо залишиться увімкненим протягом періоду таймера неактивності RRC, а потім перейде в PSM.

Однак, коли AS-RAI увімкнено, ми очікуємо побачити, що радіостанція UE перейде безпосередньо в PSM після надсилання пакету UDP, таким чином заощаджуючи електроенергію, яка збільшувалась у випадку коли UE залишався в режимі підключення RRC протягом періоду таймера бездіяльності.

На малюнку 11 ми можемо побачити результати споживання часу та струму під час надсилання UDP-пакету з вимкненим AS-RAI. Подія UDP тут включає налаштування з'єднання, надсилання UDP-пакету, а потім період таймера неактивності RRC. Ми бачимо, що подія тривала 6,4 секунди, а середній струм, спожитий протягом усієї події, становив близько 30 мА, що дає споживання батареї 191 мКл. Як показано на малюнку, після того, як таймер неактивності RRC закінчився, поточне споживання знизилося, коли UE увійшло в PSM.

Тепер ми розглянемо подію пакета UDP із увімкненим AS-RAI та побачимо, чи UE перейде в PSM швидше.

Як ми бачимо на рис.3.7., AS-RAI змусив UE пропускати таймер неактивності

RRC, що зменшило загальний час події з 6,4 секунди до 1,4 секунди, в середньому споживаючи лише 17,75 мА струму, зменшуючи споживання батареї. від 191 мС до 24,3 мС.

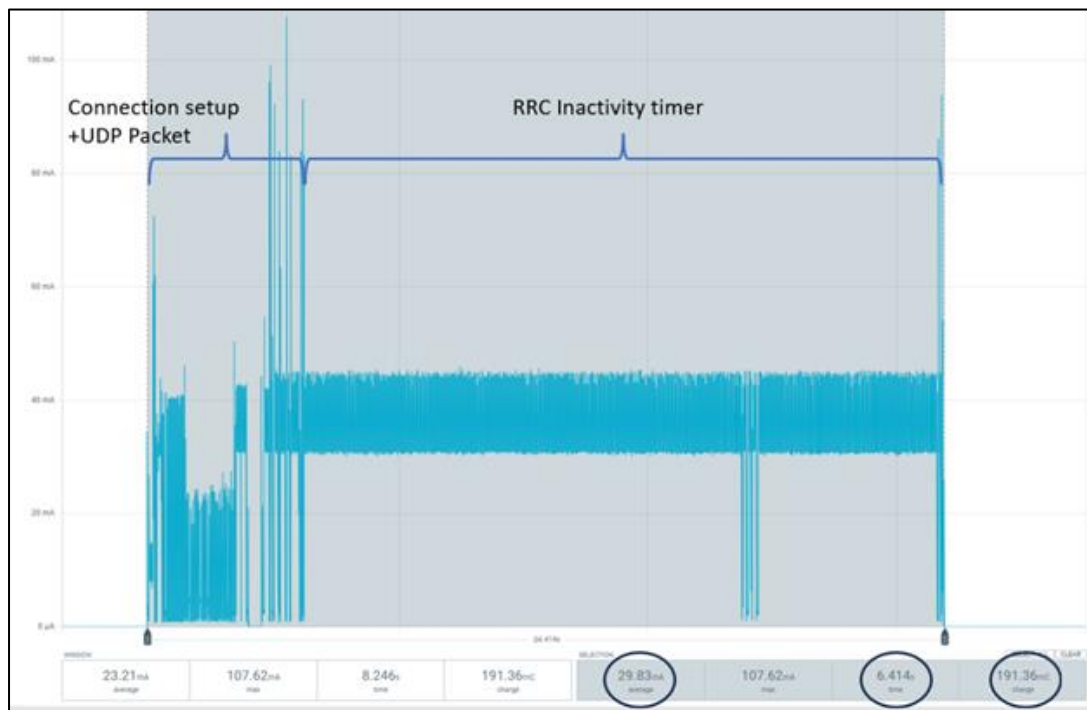


Рис.3.6. Подія UDP з вимкненим AS-RAI



Рис.3.7. Подія UDP з увімкненим AS-RAI

Ці результати показують, що AS-RAI зменшив час і потужність, споживану для події UDP-пакету, зменшивши заряд, який споживає UE для надсилання UDP-пакету, на 87,3%, що в довгостроковій перспективі може істотно максимізувати час

роботи батареї, залежно від того, як часто йому потрібно перейти в режим RRC Connected.

3.3 Дослідження енергоефективних функцій

Discontinuous Reception чи DRX є однією з основних форм енергозбереження, який просто означає, що радіо можна короткочасно вимикати між прослуховуванням. Існує кілька форм DRX, у яких може працювати UE.

Перша це cDRX, у якій в режимі підключення RRC після передачі даних UE, має залишатися в режимі підключення RRC, доки не закінчиться таймер неактивності RRC. Протягом цього періоду UE може ненадовго вимкнути своє радіо та натомість прослуховувати вхідну радіоактивність через проміжки часу, на відміну від постійного прослуховування.

iDRX є основною функцією енергозбереження, і працює наступним чином.

UE у режимі очікування RRC не очікує великої радіоактивності, тому він вимикає своє радіо, щоб заощадити енергію, і прослуховує вхідні радіоповідомлення низхідної лінії зв'язку через певні проміжки часу.

Режим Extended Discontinuous Reception (eDRX) - розширений режим стандартного циклу переривчастого прийому DRX. Цикли DRX зазвичай короткі і використовуються для підтримки стабільнішого з'єднання при частіших перевірках.

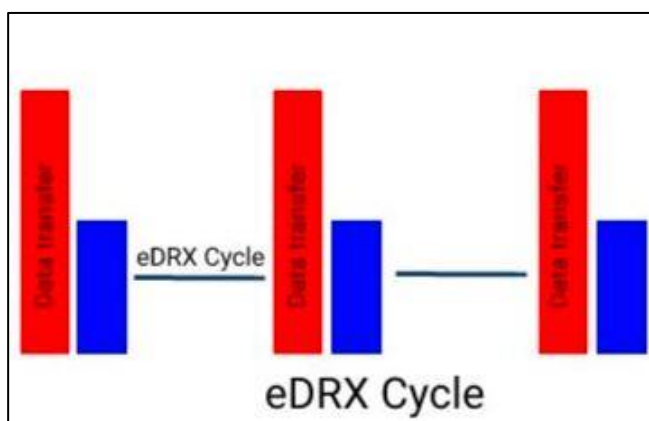


Рис.3.8. eDRX цикли

eDRX дозволяє гнучко налаштовувати тривалість циклів сну (від 5.12 секунд до 40 хвилин), що дозволяє балансувати між економією енергії та частотою передачі даних.

Якщо пристрій більше не отримує повідомлень до того, як закінчиться таймер неактивності RRC, пристрій переходить у режим очікування RRC і знову працює в eDRX.

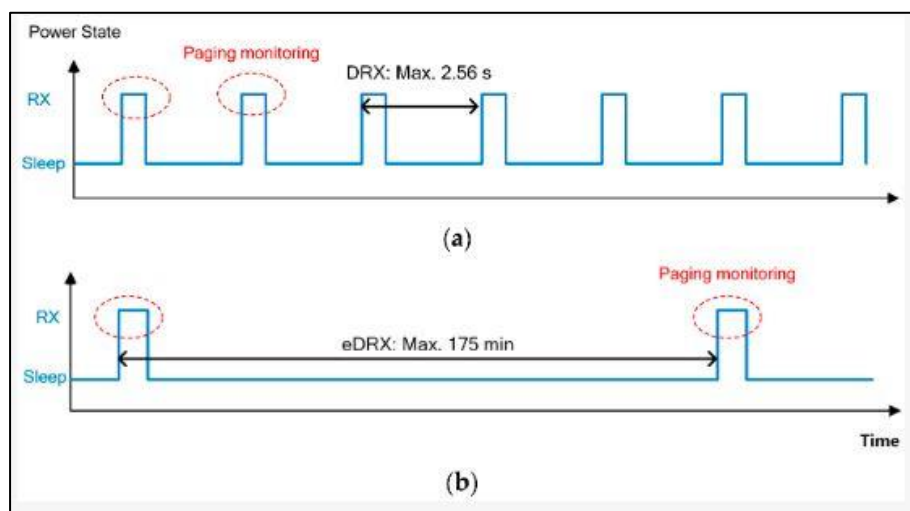


Рис.3.9. Стан живлення обладнання користувача (UE)

На рис.3.10. показано стан живлення обладнання користувача (UE), де а – це переривчастий прийом (DRX), b - розширений переривчастий прийом (eDRX).

Для ефективного використання eDRX необхідно налаштувати безліч параметрів, таких як інтервали пробудження, тривалість активних вікон та ін. Неправильна конфігурація може призвести до неефективного використання енергії або втрати даних. До недоліків також можна віднести, те що якість сигналу та навантаження мережі можуть впливати на точність синхронізації пристрою і призводити до пропусків повідомлень. Зміни в конфігурації мережі можуть вимагати перенастроювання параметрів eDRX, а якщо в мережі працює багато пристроїв, що використовують eDRX, можуть виникати конфлікти за доступ до мережі. Хоча eDRX дозволяє знизити енергоспоживання, він також може призводити до збільшення затримки передачі даних, що може бути неприпустимо для деяких застосувань.

Розглянемо практичні результати вимірювань ефективності eDRX, мета цього тесту показати, як eDRX впливає на енергоспоживання пристрою.

У тестовому сценарії використання NB-iot з інтервалом пейджингового вікна = 2,52 секунди.

Тест 1: Виміряти споживану потужність, коли eDRX вимкнено, за допомогою звичайного iDRX з інтервалами = 640 мс.

Тест 2. Виміряти споживану потужність між двома подіями eDRX, коли інтервал eDRX встановлено на 81,2 секунди

Тест 3. Виміряти споживану потужність між двома подіями eDRX, коли інтервал eDRX встановлено на 163,64 секунди

В тесті 1 коли eDRX вимкнено, UE має працювати в режимі iDRX, часто відстежуючи пейджинг RX, встановлено кожні 640 мс, таким чином споживаючи більше енергії.

У той час як eDRX увімкнено, ми повинні спостерігати менш частий моніторинг підкачки RX, що супроводжується зменшенням споживання енергії. Ми також очікуємо споживання менше електроенергії, коли UE налаштовано на триваліші інтервали eDRX.

Результати тесту 1 показано на рис.3.11, коли eDRX вимкнено, UE часто відстежує радіо для вхідних повідомлень, використовуючи звичайний iDRX.

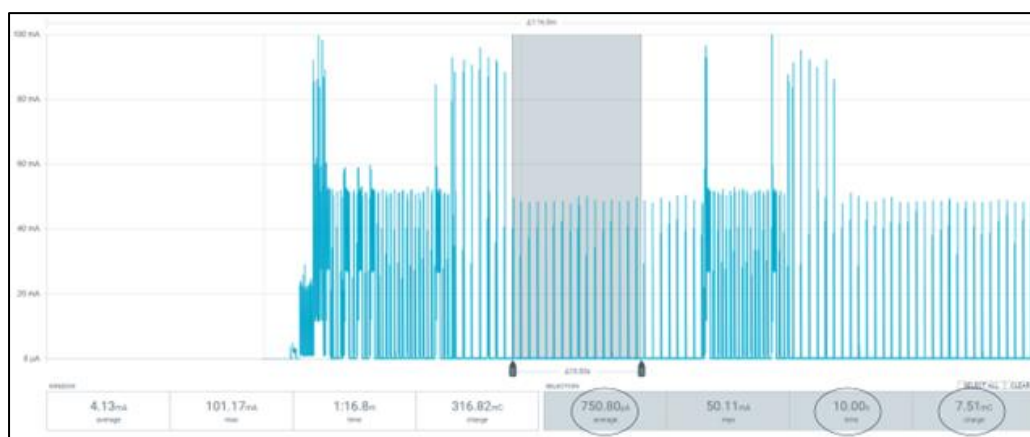


Рис.3.10. Енергоспоживання в iDRX

Ми бачимо, що коли eDRX вимкнено, у режимі очікування UE все ще регулярно відстежує радіоканал на наявність вхідних повідомлень, що призводить до споживання в середньому 750 мкА за 10 секунд.

Однак, в іншому тесті коли eDRX в статусі увімкнено та встановлений на 81,2 секунди, на рис.3.11. ми можемо побачити, що, незважаючи на те, що радіо також перебуває в періоді бездіяльності, eDRX змушує UE монітор RX пейджингувати рідше, зменшуючи суттєво його енергоспоживання.

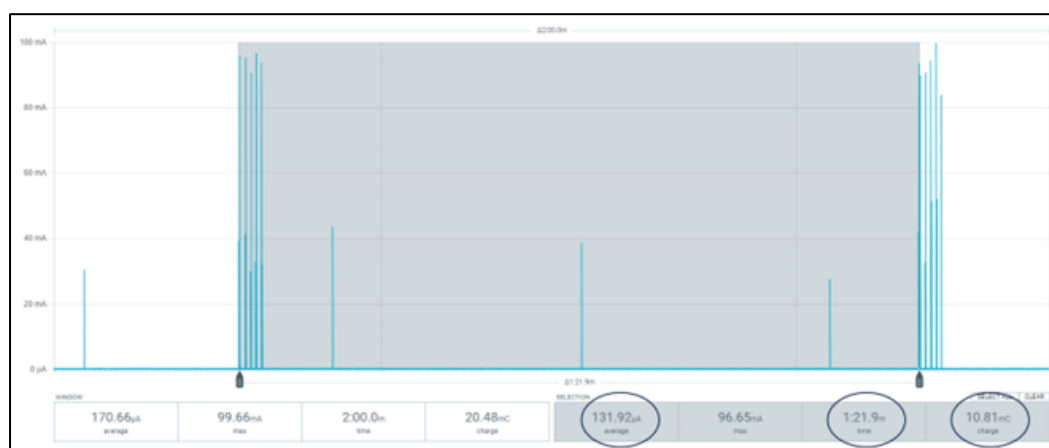


Рис.3.11. eDRX увімкнено та інтервал=81,2 с з PTW=2,56 с

Також ми вже бачимо, що на відміну від споживання 750 мкА середнього струму за 10 секунд, eDRX змушує UE споживати лише 132 мкА за 81,2 секунди. Потрібно також враховувати що ці вимірювання включають струм зупинки годинника SIM-карти, який у цьому випадку є додатковим середнім значенням ~40 мкА. Струм зупинки SIM-карти - це мінімальний електричний струм, який необхідний для підтримки SIM-карту в робочому стані та забезпечувати її нормальне функціонування.

Також потрібно зауважити, що на початку кожної події eDRX можна бачити 4 випадки пейджингового виклику (PO) і стрибок мережевої синхронізації. Ці цифри можуть відрізняються залежно від мережі, до якої підключений пристрій.

Продовжимо і тепер розглянемо ефект подальшого збільшення інтервалу eDRX від 81,2 секунди до 163,64 секунди (2 хвилини 43 секунди).

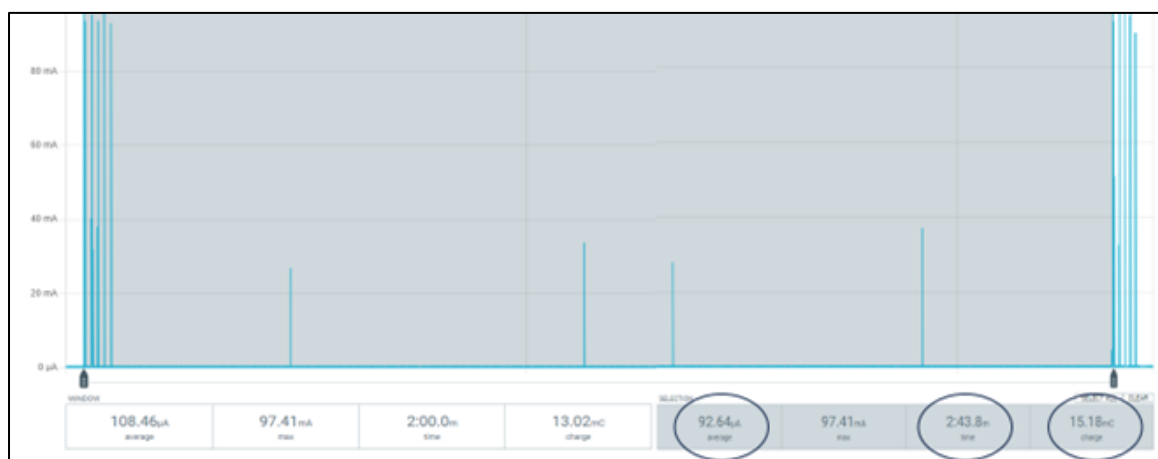


Рис.3.12. eDRX увімкнено та інтервал=81,2 с з PTW=2,56 с

Як ми можемо побачити на рис.3.12., збільшення інтервалу eDRX спричиняє подальше зниження енергоспоживання. Попердне досягнуте споживання складало 132 мкА за 81,2 секунди, а налаштування eDRX на 163,64 секунди вже показує споживає на рівні 92,64 мкА. Такі результати призводять до значного зниження споживання електроенергії що значно подовжує термін служби батареї у стільниковому пристрої протягом тривалого часу. Знову ж таки, ці вимірювання включають струм зупинки годинника SIM-карти ~40 мкА, оскільки він не підтримував функцію призупинення/відновлення. Якщо сім карта буде підтримувати функцію призупинення, результати будуть ще кращі.

PSM (Power Saving Mode) один з механізмів зниження енергоспоживання. У цьому режимі пристрій може вимкнути більшість функцій і перейти в глибокий сон між сесіями передачі даних, зберігаючи підключення до мережі без необхідності повторного реєстрування.

Подивимось на алгоритм роботи PSM:

1. Пристрій ініціалізує передачу даних.
2. Після завершення передачі, пристрій переходить в PSM, коли всі сеанси з мережею завершені. У цьому стані споживання енергії мінімізується, оскільки пристрій не перевіряє сигнали від базової станції.
3. Пробудження відбувається відповідно до налаштованого таймера або коли потрібно знову передати дані.

Оптимізація роботи відбувається через налаштування Active Timer та TAU (Tracking Area Update) Timer для оптимізації періоду між активними сесіями. У режимі PSM пристрій залишається зареєстрованим у мережі та підтримує конфігурації підключення.

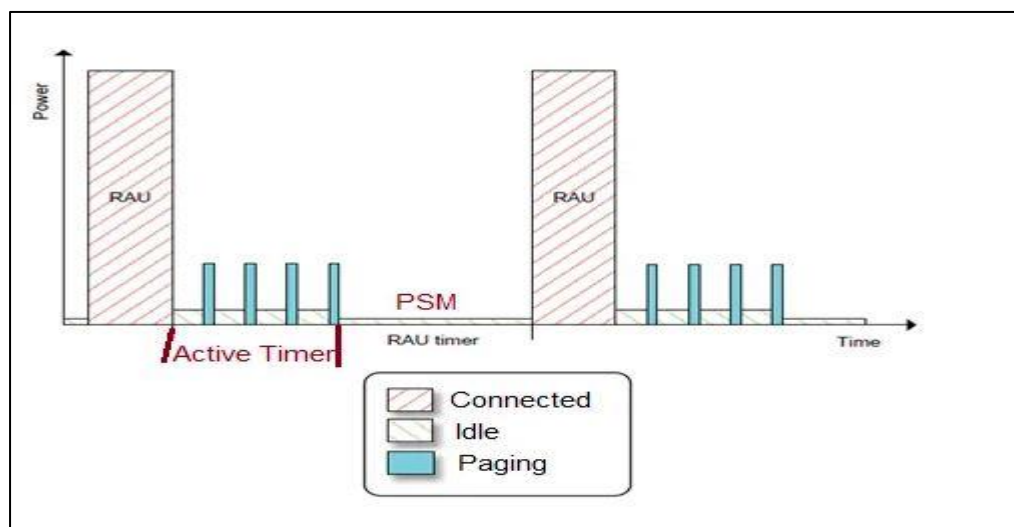


Рис.3.13. Режим роботи PSM

PSM дозволяє налаштовувати дуже тривалі інтервали між активностями (кілька днів або навіть тижнів), що дозволяє суттєво знижувати витрати енергії, адже під час роботи в режимі PSM радіомодуль пристрою вимкнений. Але такі налаштування не підходять для пристроїв, які вимагають швидкого реагування, наприклад, системи моніторингу в реальному часі. Налаштування періодичності передачі даних, можуть призвести до значних затримок у доставці критично важливої інформації. Пристрій може навіть не пробудитися в точно визначений час, через різноманітні фактори, такі як перешкоди, проблеми з мережею або збої в роботі самого пристрою. Тому оптимальна конфігурація параметрів PSM (частота пробудження, тривалість сплячого режиму) залежить від багатьох факторів і вимагає детального аналізу. Неправильна конфігурація може призвести до неефективного використання енергії або втрати даних.

Розглянемо результати вимірювань PSM, мета цього тесту показати, як PSM економить енергію шляхом порівняння потужності, споживаної за 10 секунд між

передачами, коли PSM вимкнено, і коли PSM увімкнено.

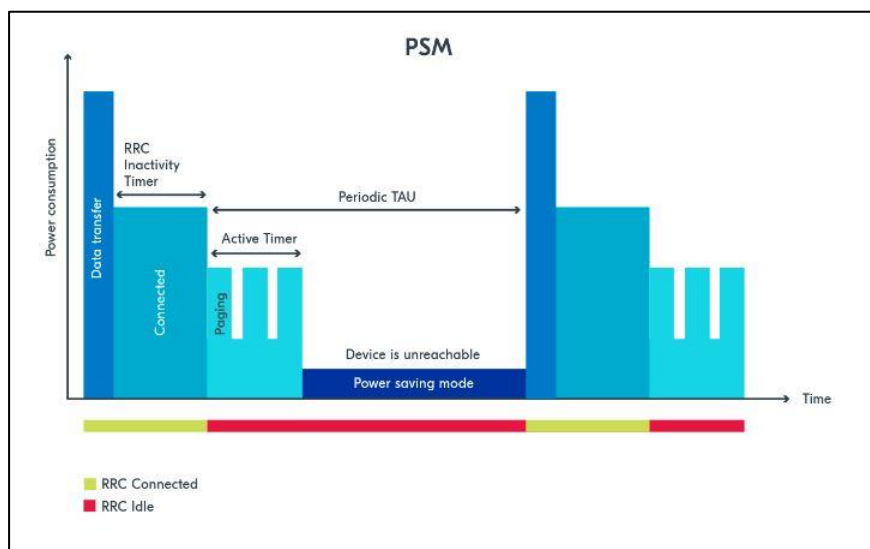


Рис.3.14. Ілюстрація, що показує активний таймер, PSM і періодичні TAU

У тестовому сценарії щоб перевірити, як PSM допомагає зменшити енергоспоживання, ми встановили такі тести за допомогою NB-Iot.

Тест 1. Виміряти споживану потужність протягом 10-секундного періоду між передачами з вимкненим PSM. У цьому випадку ввімкнено лише iDRX.

Тест 2: Виміряти споживану потужність протягом 10-секундного періоду між передачами з увімкненим PSM.

В першому тесті ми очікуємо побачити значне зниження споживання електроенергії протягом 10-секундного періоду, коли PSM увімкнено, оскільки PSM має переводити UE у стан глибокого сну, при цьому залишаючись синхронізованим із мережею, таким чином уникаючи потужності, яка інакше б споживалася, у випадку коли пристрій регулярно вмикає радіо для перевірки подій пейджингового виклику RX.

Результати тестування показано на рис.15, ми бачимо коли PSM вимкнено, радіостанція UE регулярно прослуховує вхідні події пейджингового виклику RX. Це пояснює поточні стрибки споживання, які ми бачимо в заштрихований період часу між двома основними подіями передачі, зображеними на рис.3.16.

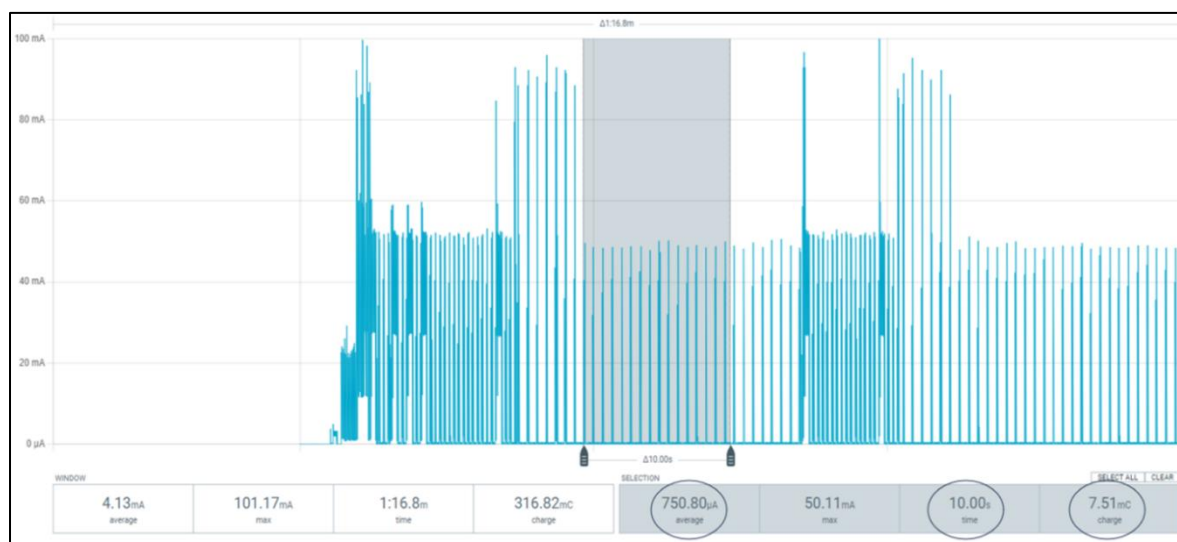


Рис.3.15. 10 секунд, коли PSM вимкнено

Як показано на нижній панелі, середній струм, який споживається протягом цього 10-секундного періоду, становить приблизно 750 мкА, що забезпечує заряд приблизно 7,5 мКл.

З іншого боку, на рис.3.16. показано споживання електроенергії за аналогічний 10-секундний період, коли PSM увімкнено. Ми чітко можемо побачити різницю з рис.16, оскільки PSM спричиняє значне зниження споживання струму, оскільки UE зараз перебуває в режимі глибокого сну.

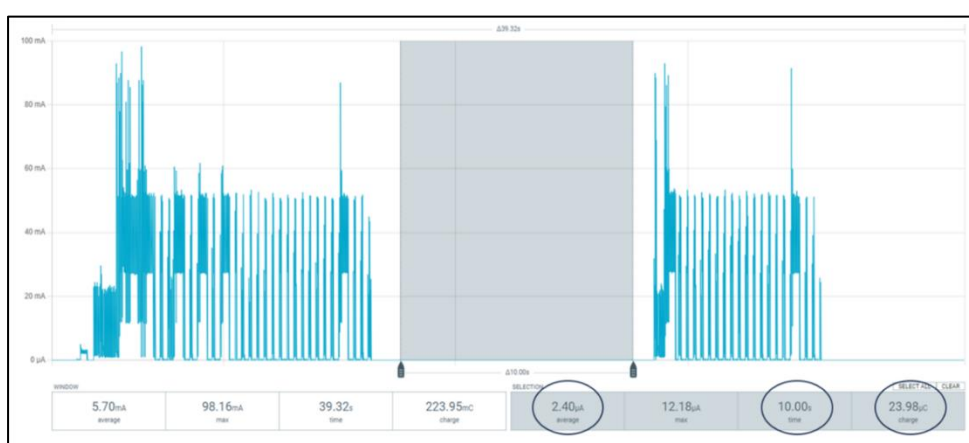


Рис.3.16. 10 секунд, коли PSM увімкнено

Середній струм споживання зменшився з приблизно 750 мкА до 2,4 мкА, внаслідок чого споживаний заряд суттєво зменшився з 7,51 мКл до приблизно 24

Підводячи певний ітог тестування потрібно зазначити, AS-RAI ефективно працює разом з режимами енергозбереження, такими як eDRX (extended Discontinuous Reception) або PSM (Power Saving Mode), що дозволяє збільшити тривалість роботи пристроїв IoT від батареї. Но незважаючи на те, що PSM і eDRX можуть співіснувати, це не завжди оптимальний випадок. У деяких випадках використання лише однієї з цих двох функцій є більш вигідним для конкретного випадку використання. Наприклад:

- Для додатків, де UE не очікує отримання даних DL, але має надсилати дані UL або TAU з інтервалами щогодини або раз на день, тоді використання PSM є найбільш вигідним.
- Для додатків, де UE не очікує отримання даних DL і має надсилати дані UL лише дуже рідко, наприклад через день, тоді вимикання модему між цими повідомленнями UL є найбільш вигідним.
- Для програм, де UE очікує отримання даних DL, тоді UE потрібно часто відстежувати пейджинг RX, тоді eDRX є більш вигідним. Це можна оптимізувати, встановивши для інтервалу eDRX максимальну затримку, яку може вмістити програма.

Використання PSM або eDRX залежить від програм. Відповідно до аналізу та оцінки, для заданого інтервалу запуску eDRX працює краще, ніж режим PSM, коли потрібна коротша доступність. PSM працює краще, ніж eDRX, коли вимога досяжності знаходиться в тому ж діапазоні, що й інтервал запуску.

ВИСНОВКИ

Відповідно завдання, в першому розділі ми розглянули стан розвитку IoT пристроїв станом на 2024 рік, саме в цьому році аналітиками були переглянуті перспективи розвитку ринку. Наразі очікується, що до 2030 року кількість підключених пристроїв IoT зросте до 40 мільярдів.

В роботі ми порівняли NB-IoT з іншими технологіями, оцінили її переваги і оцінили подальші перспективи розвитку. В другому розділі ми проаналізували, як працює технологія NB-IoT, її архітектуру і енергоспоживання. Ми розглянули одне з найбільш перспективних і найбільш обговорюваних напрямлень розвитку NB-IoT у 2024 році, це інтеграція NB-IoT з технологіями ШІ. Розглянули, як таке поєднання реалізується, приклади застосування, складнощі впровадження і подальші перспективи. Очевидно що поєднання технології NB-IoT зі штучним інтелектом відкриває широкі перспективи для розвитку Інтернету речей. Така інтеграція дозволяє створювати розумні, самонавчальні системи, які зможуть приймати самостійні рішення та адаптуватися до змін у навколишньому середовищі. ШІ може розробляти оптимальні стратегії управління енергоспоживанням, і вивести енергоефективність NB-IoT на новий рівень. Незважаючи на великі перспективи, наразі це інтеграція має і значні недоліки. Один з основних це вартість, впровадження систем, що поєднують NB-IoT та ШІ, все через необхідність придбання обладнання, програмного забезпечення та послуг. Для розробки і обслуговування таких систем потрібні фахівці з різних областей, включаючи IoT, ШІ, безпеки даних. Тому в третьому розділі ми розглянули існуючі рішення енергозбереження і їх ефективність. Як показують результати тестувань, вони насправді ефективні для підвищення енергоефективності. PSM дозволяє пристроям перебувати в глибокому сні більшу частину часу, знижуючи енергоспоживання на 70-80%. eDRX оптимізує перевірку вхідних повідомлень, що дозволяє зменшити споживання енергії до 50%. NIDD знижує накладні витрати на передачу даних, дозволяючи зменшити енергоспоживання до 50% для пристроїв, що передають малі обсяги даних. AS-RAI зменшив час і потужність, споживану для події UDP-

пакету, зменшивши заряд, який споживає UE для надсилання UDP-пакету, на 87,3%. Хоча PSM і eDRX вважаються універсальними методами підвищення енергоефективності, потрібно розуміти що вони не можуть бути впроваджені у всіх 100% випадках, адже можуть призвести до протилежного ефекту. Запропоновані рішення можуть працювати разом, так і окремо, вибір найкращого методу для підвищення енергоефективності в мережах NB-IoT залежить від конкретних вимог проекту, бюджету та інших факторів. Важливо розуміти, що енергоефективність є комплексною проблемою, і для її вирішення необхідно враховувати взаємодію всіх компонентів системи: пристроїв, мережі та програмного забезпечення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Patel, K.K.; Patel, S.M. Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges. *Int. J. Eng. Sci. Comput.* 2016, 6, 6119–6130.
2. Physical Layer Procedures (Release 14, v14.9.0). Technical Report, 3GPP; 3GPP TS 36.213; 3GPP: Alpes-Maritimes, France, 2019.
3. Ikpehai, A.; Adebisi, B.; Rabie, K.M.; Anoh, K.; Ande, R.E.; Hammoudeh, M.; Gacanin, H.; Mbanaso, U.M. Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things: A Comparative Review. *IEEE Internet Things J.* 2019, 6, 2220–2235
4. Yu, Y.-J.; Li, L.-X. Offset-Aware Resource Allocation in NB-IoT Networks. *IEEE Internet Things J.* 2022
5. Elgarhy, O.; Reggiani, L.; Malik, H.; Alam, M.M.; Imran, M.A. Rate-Latency Optimization for NB-IoT With Adaptive Resource Unit Configuration in Uplink Transmission. *IEEE Syst. J.* 2021, 15, 265–276.
6. Andres-Maldonado, P.; Ameigeiras, P.; Prados-Garzon, J.; Navarro-Ortiz, J.; Lopez-Soler, J.M. An Analytical Performance Evaluation Framework for NB-IoT. *IEEE Internet Things J.* 2019, 6, 7232–7240.
7. Ghasempour, A.; Moon, T. Optimizing the Number of Collectors in Machine-to-Machine Advanced Metering Infrastructure Architecture for Internet of Things-based Smart-Grid. In *Proceedings of the IEEE Green Technologies Conference*, Kansas City, MO, USA, 7–8 April 2016.
8. Ugwuanyi, S.; Paul, G.; Irvine, J. Survey of IoT for Developing Countries: Performance Analysis of LoRaWAN and Cellular NB-IoT Networks. *Electronics* 2021, 10, 2224.
9. Foni, S.; Pecorella, T.; Fantacci, R.; Carlini, C.; Obino, P.; Di Benedetto, M.G. Evaluation methodologies for the NB-IOT system: Issues and ongoing efforts. In *Proceedings of the AEIT International Annual Conference*, Cagliari, Italy, 20–22 September 2017.

10. Miao, Y.; Li, W.; Tian, D.; Hossain, M.S.; Alhamid, M.F. Narrowband internet of things: Simulation and modeling. *IEEE Internet Things J.* 2018, 5, 2304–2314.
11. E. Rastogi, M. Kumar Maheshwari, A. Roy, N. Saxena, and D. Ryeol Shin, “Energy efficiency analysis of narrowband Internet of Things with auxiliary active cycles for small data transmission,” *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 33, no. 1, Jan. 2022, Art. no. e4376
12. Bima, I.W.K.; Suryani, V.; Wardana, A.A. A Performance Analysis of General Packet Radio Service (GPRS) and Narrowband Internet of Things (NB-IoT) in Indonesia. *Kinet. Game Technol. Inf. Syst. Comput. Netw. Comput. Electron. Control* 2020, 5, 10–19.
13. Jambek, A.B.; Khairi, N.A. Performance comparison of Huffman and Lempel-Ziv Welch data compression for wireless sensor node application.
14. Ratasuk, R.; Vejlgaard, B.; Mangalvedhe, N.; Ghosh, A. mNB-IoT: Concurrent Uplink Transmission for Multiple User Equipments in NB-IoT. In *Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, Qatar, 3–6 April 2016*; pp. 1–4.
15. Wan, L.; Zhang, Z.; Wang, J. Demonstrability of Narrowband Internet of Things technology in advanced metering infrastructure. *J. Wirel. Commun. Netw.* 2019, 2.
16. Martinez, B.; Adelantado, F.; Bartoli, A.; Vilajosana, X. Exploring the Performance Boundaries of NB-IoT. *IEEE Internet Things J.* 2019, 6, 5700–5710.
17. Chen, L.; Chung, W.; Chen, I.; Kuo, S. Adaptive Repetition Scheme with Machine Learning for 3GPP NB-IoT. In *Proceedings of the 23rd IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC), Taipei, Taiwan, 4–7 December 2018*; pp. 248–255
18. Michelinakis, F.; Al-Selwi, A.S.; Capuzzo, M.; Zanella, A.; Mahmood, K.; Elmokashfi, A. Dissecting Energy Consumption of NB-IoT Devices Empirically. *IEEE Internet Things J.* 2021, 8, 1225–1243.
19. Haider A. H; Alobaidy.; Mandeep Jit Singh.; Rosdiadee Nordin.; Nor Fadzilah Abdullah.; Cheong Gze Wei.; Marvin Liong Siang Soon.; "Real-World Evaluation of

Power Consumption and Performance of NB-IoT in Malaysia", IEEE Internet of Things Journal, vol.9, no.13, pp.11610-11631, 2022.

20. D. Petrov.; K. Kroschewski.; I. Mwammenywa.; G. M. Kagarura and U. Hilleringmann, "Low-Cost NB-IoT Microgrid Power Quality Monitoring System", 2021 IEEE Sensors, pp. 1-4, 2021.

21. Natthaphong Kotsuep.; Kidsanapong Puntsri, Energy Consumption Analysis of NB-IoT for Very Large Sensors, 2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON), 06-08 March 2024.

22. E. Kadusic.; N. Zivic; C. Ruland.; N. Hadzajlic, A smart parking solution by integrating NB-IoT radio communication technology into the core IoT platform Future Internet, 2022, p. 219

23. X. Xiong,; K. Zheng,; R. Xu,; W. Xiang and P. Chatzimisios, "Low power wide area machine-to-machine networks: Key techniques and prototype", IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 9, pp. 63-70, Sep. 2015.

24. G.-H. Dai and J.-H. Yu, "Research on NB-IoT background standard development characteristics and the service", Mobile Commun., vol. 40, no. 7, pp. 30-35, 2016. NB-IoT system for M2M communication

25. A.T. AbuSabah,; M. A. Rahman,; R. Oliveira and A. Flizikowski, "The Importance of Repetitions in Ultra-Dense NB-IoT Networks", IEEE Communications Letters, vol. 26, no. 5, pp. 1188-1201, May 2022.

26. R. Singh, J. H.; Jepsen, K. D. Ballal,; S. Nwabuona,; M. Berger and L. Dittmann, "An Investigation of 5G LTE LTE-M and NB-IoT Coverage for Drone Communication Above 450 Feet", 2023 IEEE 24th International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), pp. 355-365, 2023.

27. S.E. Collier, "The emerging enernet: convergence of the smart grid with the Internet of Things", IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 23, pp. 11-15, December 2017.

28. Lombardo, S,; Parrino, G,; Peruzzi and A. Pozzebon, "Lorawan versus Nb-IOT:Transmission Performance Analysis Within Critical Environments", IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 2, pp. 1067-1080, Jan. 2022.

29. H. Bello et al., "Energy-delay evaluation and optimization for nb-iot psm with periodic uplink reporting", IEEE Access, vol. 7, pp. 3073-3080, 2018.
30. F. Michelinakis et al., "Dissecting energy consumption of nb-iot devices empirically", IEEE Internet Things J., 2020.
31. B. Hagler, "How the internet of things is transforming 21st-century manufacturing", Forbes Technology Council forbes.com, April 2020. Experimental Evaluation of NB-IoT
32. Lin Xiaonong, "Big Data Mining System of Indoor Ambient Intelligence Monitoring Based on Internet of Things[J]", Journal of Shenyang Engineering College (Natural Science dition), vol. 17, no. 04, pp. 62-66, 2021.
33. A Haridas,; V S Rao,; V Prasad R et al., "Opportunities and challenges in using energy-harvesting for NB-IoT[J]", ACM Sigbed Review, vol. 15, no. 5, pp. 5-13, 2018.
34. S You, JK Eshraghian,; HC Iu et al, "Low-power wireless sensor network using fine-grain control of sensor module power mode[J]", Sensors, vol. 21, no. 9, pp. 3197, 2021

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)

ПРЕЗЕНТАЦІЯ

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: “МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ
NB-IOT”



Виконав: студент 6 курсу, групи ІСДМ-63
Козак В.О.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Слайд 2

Мета роботи – підвищення енергоефективності пристроїв технології NB-IoT.
Об’єкт дослідження – процес підвищення енергоефективності пристроїв IoT.
Предмет дослідження – методи підвищення енергоефективності

Завдання магістерської роботи:

- огляд сучасного стану розвитку та принципи функціонування NB-IoT;
- дослідження особливостей застосування штучного інтелекту в NB-IoT;
- підвищення енергоефективності стільникових мереж NB-IoT.

Аналіз технологій та їх порівняння

Слайд 3

Характеристика	LoRa	Sigfox	LTE-M	Wi-Fi HaLow	NB-IoT
Частотний спектр	(ISM)	(ISM)	Ліцензійний (LTE)	Безліцензійний (Wi-Fi)	Ліцензійний (LTE)
Швидкість передачі даних	0.3-50 Kbit/c	100 bit/c-600 bit/c	10-1000 Kbit/c	До 100 Mbit/c	1-250 Kbit/c
Дальність зв'язку	До 15 км у сільській місцевості	До 50 км	До 11 км	До 1 км (у приміщенні)	До 10 км
Енергоефективність	Дуже висока	Дуже висока	Середня	Низька у порівнянні з іншими	Висока
Смислові мережі	Висока	Обмежена (до 140 повідомлень/день)	Дуже висока	Висока	Дуже висока

Табл. 1. Порівняння технологій Iot

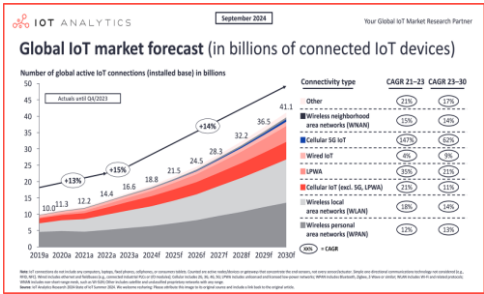


Рис.1. Прогнози розвитку ринку Iot станом на 2024 рік

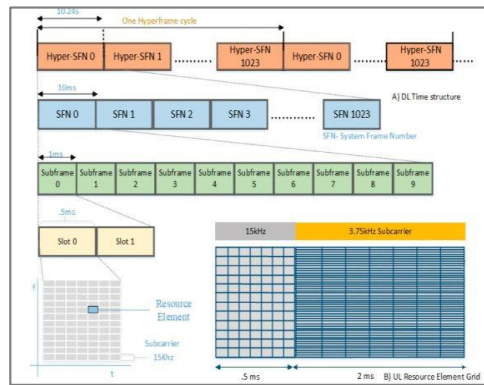


Рис. 2. Робота Nb-IoT в мережі LTE

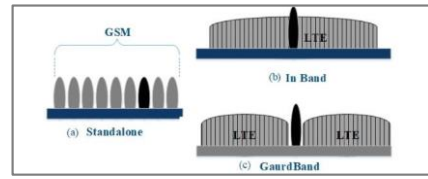


Рис.3. Режими роботи

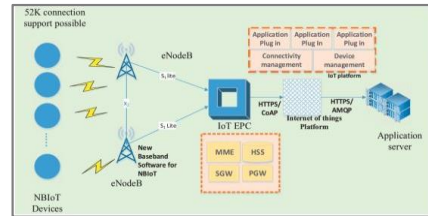


Рис.4. Архітектура NB-IoT

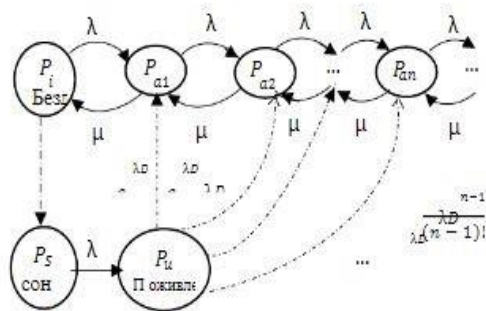


Рис. 5. Процес народження і смерті задач процесора.

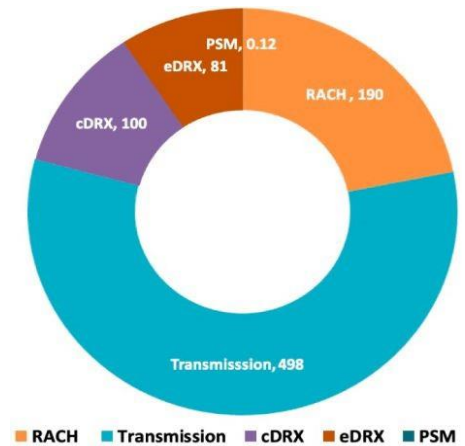


Рис.6. Відносне споживання електроенергії (mW) серед різних робочих станів радіо в NB-IoT.

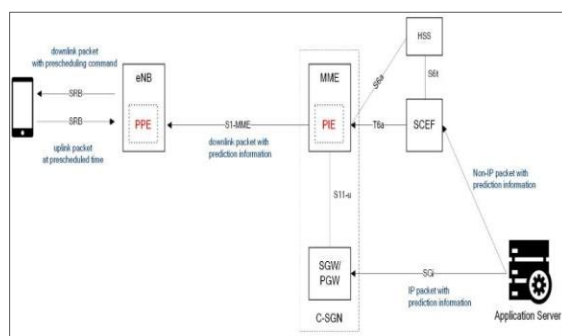


Рис. 7. Архітектура мережі з механізмом енергозбереження на основі прогнозування (PBESM).

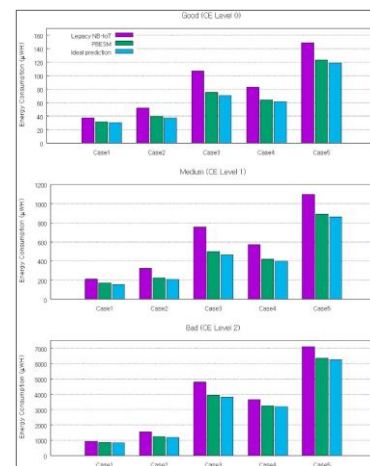


Рис.8. Алгоритм 2. Планування ресурсів, орієнтоване на кількість

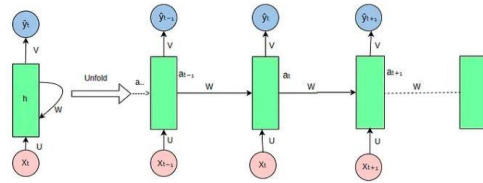


Рис.9. RNN у розгорнутому вигляді.

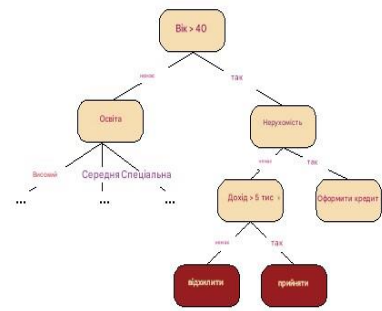


Рис.10. Дерево рішень



Рис.11. Принцип роботи Reinforcement Learning

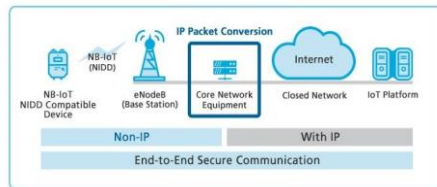


Рис.12. Зображення передачі даних за допомогою технології NIDD

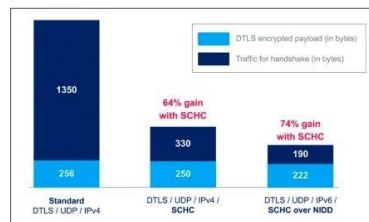


Рис 13 Продуктивність SCHC, NIDD

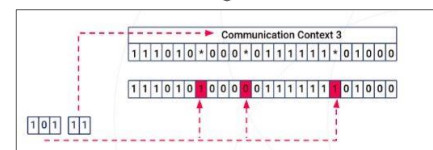
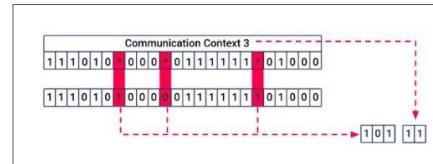


Рис. 14. Стиснення і Декомпресія

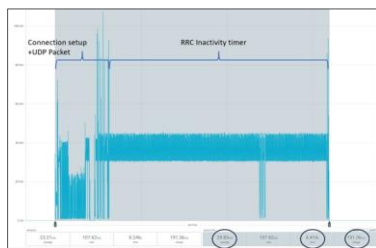


Рис.15. Подія UDP з вимкненим AS-RAI

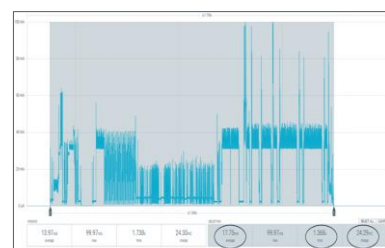


Рис.16. Подія UDP з увімкненим AS-RAI

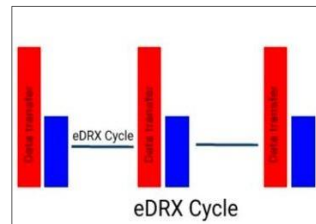


Рис. 17. eDRX цикли

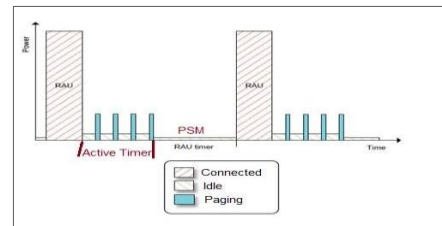


Рис. 19. Режим роботи PSM



Рис.18. eDRX увімкнено та інтервал=81,2 с з PTW=2,56 с

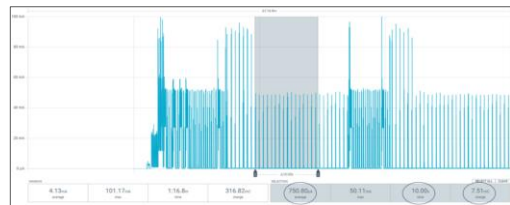


Рис.20. 10 секунд, коли PSM вимкнено

Оцінка ефективності та результати енергоефективності

Табл. 2. Ефективність

Стан мережі	Середнє споживання електроенергії	% зміни
iDRX @ 640 мс	750,80 мкА	
eDRX @ 81,2 с	131,92 мкА	82,4 % зниження порівняно з iDRX
eDRX @ 163,64 с	92,64 мкА	87,7 % зниження порівняно з iDRX
PSM увімкнено	2,40 мкА	Зниження на 99,7 % порівняно з iDRX
AS-RAI вимкнено	29,83 мА	
AS-RAI увімкнено	17,75 мА	Зменшення на 40,5 % порівняно з вимкненим AS-RAI

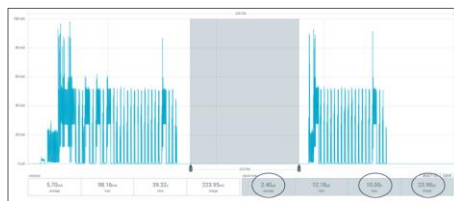


Рис. 21. 10 секунд, коли PSM увімкнено



Рисунок 22. eDRX увімкнено та інтервал=81,2 с з PTW=2,56 с

Висновки по роботі

В роботі ми порівняли NB-IoT з іншими технологіями, оцінили її переваги і подальші перспективи розвитку, проаналізували, як працює технологія NB-IoT, її архітектуру і енергоспоживання. Ми розглянули одне з найбільш перспективних і найбільш обговорюваних напрямів розвитку NB-IoT у 2024 році, це інтеграція NB-IoT з технологіями ШІ. Розглянули, як таке поєднання реалізується, приклади застосування, складності впровадження і подальші перспективи. Очевидно що поєднання технології NB-IoT зі штучним інтелектом відкриває широкі перспективи для розвитку Інтернету речей.

Така інтеграція дозволяє створювати розумні, самонавчальні системи, які зможуть приймати самостійні рішення та адаптуватися до змін у навколишньому середовищі. ШІ може розробляти оптимальні стратегії управління енергоспоживанням, і вивести енергоефективність NB-IoT на новий рівень. Незважаючи на великі перспективи, наразі це інтеграція має і значні недоліки.

розділі ми розглянули існуючі рішення енергозбереження і їх ефективність. Як показують результати тестувань, вони насправді ефективні для підвищення енергоефективності. PSM дозволяє пристрою перебувати в глибокому сні більшу частину часу, знижуючи енергоспоживання на 70-80%. eDRX оптимізує перевірку вхідних повідомлень, що дозволяє зменшити споживання енергії до 50%. NIDD знижує накладні витрати на передачу даних, дозволяючи зменшити енергоспоживання до 50% для пристроїв, що передають малі обсяги даних. AS-RAI зменшив час і потужність, споживану для події UDP-пакету, зменшивши заряд, який споживає UE для надсилання UDP-пакету, на 87,3%. Хоча PSM і eDRX вважаються універсальними методами підвищення енергоефективності, потрібно розуміти що вони не можуть бути впроваджені у всіх 100% випадках, адже можуть призвести до протилежного ефекту. Запропоновані рішення можуть працювати разом, так і окремо, вибір найкращого методу для підвищення енергоефективності в мережах NB-IoT залежить від конкретних вимог проекту, бюджету та інших факторів. Важливо розуміти, що енергоефективність є комплексною проблемою, і для її вирішення необхідно враховувати взаємодію всіх компонентів системи: пристроїв, мережі та програмного забезпечення.