ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **"МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІОТ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ГЛОБАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ"**

Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-61
спеціальності 172 Телекомунікації і радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

Коваленко І.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник Руденко Н.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(прізвище та ініціали)

Київ – 2022

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 172 Телекомунікації і радіотехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій
_____ Н.В.Руденко
"____" _____2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Коваленку Ігорю Олександровичу

1.Тема роботи: «Методи підвищення енергоефективності систем IoT на базі технології радіозв'язку глобальної мережі»,
керівник роботи: Руденко Наталія Вікторівна к.т.н., доцент
затверджені наказом вищого навчального закладу від 12.10.2022 року № 122

2. Строк подання студентом роботи 20.12.2022 р.
3. Вихідні дані до роботи:
   1. Технології Інтернет речей;
   2. Енергоефективність систем зв'язку;
   3. Алгоритми підвищення показників якості систем;
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):
   1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технологій зв'язку;
   2. Тестове дослідження енергоефективності мереж LTE-M/NB-IoT;
   3. Дослідження шляхів підвищення енергоефективності систем зв'язку.

.

5. Графічна частина роботи представлена на 12 слайдах презентації

6. Дата видачі завдання 15.10.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	16.10.2022 р.	Викон.
2	Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку енергоефективних технологій зв'язку	26.10.2022 р.	Викон.
3	Дослідження енергоефективності мереж LTE-M/NB-IoT	05.11.2022 р	Викон.
4	Шляхи підвищення ефективності систем зв'язку	22.11.2022 р	Викон.
5	Висновки, вступ, реферат	04.12.2022 р.	Викон.
6	Розробка презентації	15.12.2022 р.	Викон.

Студент _____ Коваленко І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Руденко Н.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 67 стор., 32 рис., 11 табл., 34 дж.

Об'єкт дослідження – процес підвищення експлуатації систем зв'язку

Предмет дослідження – технології сучасного безпроводового зв'язку.

Мета роботи – принципи та методи підвищення енергоефективності експлуатації безпроводової мережі зв'язку.

Методи дослідження – теорія масового обслуговування, теорія імовірності, методи цифрової обробки інформації, методи прогнозування.

В роботі приведено основні відомості еволюції безпроводових мереж зв'язку. Виконано аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технологій які використовуються для підключення різного роду об'єктів. Розроблено рекомендації щодо вибору та застосуванні даних технологій.

Виконано дослідження енергоефективності мереж LTE-M/NB-IoT в залежності від відстані до базової станції, проведено тестування та порівняння в енергоспоживанні між даними технологіями.

Для збільшення енергоефективності системи досліджено та запропоновано алгоритми адаптивного вибору MCS і планування ресурсів що дозволяє мінімізувати потужності передачі у вузлах Інтернет речей.

БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, LTE-M, NB-IoT МОДУЛЬ, ІНТЕРНЕТ ТЕЧЕЙ, M2M, LORAWAN, SIGFOX, СТАНДАРТ, ТЕХНОЛОГІЯ, ДОДАТОК, ОБ'ЄКТ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ.....10
1.1 Дослідження розвитку безпроводового зв'язку.....10
1.2 Аналіз існуючі енергозберігаючих технології IoT.....12
1.3 Аналіз технологій NB-IoT та LTE-M та їх порівняння.....16
1.4 Ринок модулів стільникового Інтернету речей.....25
1.5 Глобальна доступність та перспективи розвитку.....28
1.6 Рекомендації щодо вибору та застосуванні технологій.....30
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖ LTE-M/NB-IoT....31
2.1 Режим функціонування обладнання LTE-M/NB-IoT.....32
2.2 Тестове дослідження впливу на енергоспоживання пристроїв.....36
2.3 Результати тестування.....38
2.3.1 Результати тестування технології LTE-M.....38
2.3.2 Результати тестування технології NB-IoT.....41
2.4 Результати та порівняння технологій.....43
3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ.....50
3.1 Постановка задачі.....50
3.2 Огляд робіт присвячений підвищенню енергоефективності систем...54
3.3 Дослідження проблем енергоефективності для передачі невеликих даних у IoTSP на основі LTE-M.....57
3.4 Огляд досліджуваних алгоритмів підвищення ефективності систем....61
3.5 Оцінка ефективності та результати моделювання.....66
ВИСНОВКИ.....73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....75
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....79

ВСТУП

Актуальність дослідження. Будучи важливою частиною тенденцій розвитку Інтернету речей, технології бездротового датчика були задіяні в багатьох сферах людського життя. У розвитку стільникових мереж розширені мережі довгострокового розвитку (LTE-A), включаючи функції зв'язку машинного типу (MTC) (під назвою LTE-M), забезпечують перспективну інфраструктуру для поширення платформи визначення Інтернету речей (IoT). Однак LTE-M не може бути оптимально використаний для безпосередньої підтримки таких пристроїв з низькою швидкістю передачі даних з точки зору енергоефективності, оскільки він залежить від основних технологій LTE, які спочатку розроблені для послуг з високою швидкістю передачі даних.

Вибір між новими технологіями мобільного зв'язку, LTE-M і NB-IoT, вимагає розуміння ключових відмінностей між ними. LTE-M та NB-IoT є глобально доступними, незалежними від постачальників технологіями, заснованими на відкритих стандартах. Вони стандартизовані, безпечні та керовані оператором у ліцензованому спектрі. Вони розроблені для додатків Інтернету речей, які мають низьку вартість, використовують низькі швидкості передачі даних, вимагають тривалого часу автономної роботи та часто працюють у важкодоступних місцях.

Дані технології стануть очевидним вибором для галузей, які шукають заміну 2G і 3G для пристроїв із тривалим життєвим циклом, які потребують збільшеного терміну служби батареї пристрою та покриття. Обидві технології є хорошим вибором для розгортання з очікуваною тривалістю життя десятиліття або більше, однак між ними існують відмінності, які роблять кожну з них більш придатною для одних програм IoT, а не для інших.

Об'єкт дослідження – процес підвищення експлуатації систем зв'язку.

Предмет дослідження – технології сучасного безпроводового зв'язку.

Мета роботи – принципи та методи підвищення енергоефективності експлуатації безпроводової мережі зв'язку.

Методи дослідження. У роботі використані методи теорія масового обслуговування, теорія імовірності, методи цифрової обробки інформації, методи прогнозування.

Ступінь наукової розробки. У роботі запропоновано алгоритм адаптивної модуляції та вибору кодування (AMCS) для вирішення проблеми споживання енергії в платформі визначення IoT на основі LTE-M. Запропонований алгоритм визначає оптимальну пару MCS і кількість первинних блоків ресурсів (#PRB), при яких розмір транспортного блоку достатній для пакетування даних зондування в межах мінімальної потужності передачі.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає вирішенні завдання підвищення енергоефективності систем IoT, результати моделювання показують, що запропонований підхід значно знижує енергоспоживання вузлів IoT, що надає змогу більш ефективно використовувати пристрої, підключених до мережі.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення і результати магістерської роботи доповідались і обговорювались на двох науково-практичних конференціях.

Публікації. За матеріалами роботи опубліковано одну статтю у науковому журналі.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Дослідження розвитку безпроводового зв'язку

Мобільний зв'язок еволюціонував від інфраструктури для людського спілкування до телеметрії, машинно-машинного зв'язку та додатків Інтернету речей.

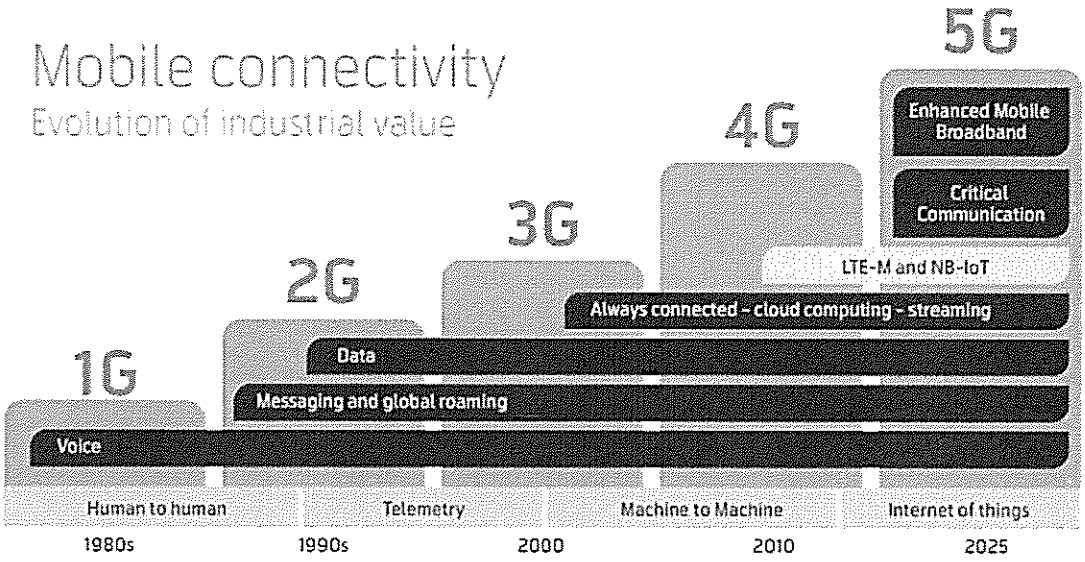


Рис.1.1. Мобільний зв'язок Еволюція промислової вартості

Перша версія мобільного підключення – 1G – представила бездротовий голос.

У 2G було введено роумінг і обмін SMS-повідомленнями, які пізніше були вдосконалені GPRS для передачі даних. SMS-повідомлення та GPRS стали широко використовуватися для базової телеметрії. Роумінг зробив мобільну технологію придатною для розгортання в багатьох країнах. Telenor був одним із перших операторів, який запропонував зв'язок M2M з речами, підключеними через мережу 2G ще в 1990-х роках.

3G став справді глобальним стандартом і об'єднав найкращі конкуруючі технології в одному стандарті. Еволюція 3G в основному була зосереджена навколо високошвидкісних програм передачі даних [1].

4G представила технологію LTE, яка використовується для пристроїв, які постійно підключені до Інтернету. 4G задовольнив потреби споживачів у пропускній здатності та швидкості та представив новий спосіб обробки голосу, замінивши голос 2G.

LTE-M і NB-IoT (Mobile IoT) спеціально розроблені для Інтернету речей. LTE-M і NB-IoT підтримують пристрої, яким потрібен тривалий час автономної роботи, і пристрої, яким потрібен хороший доступ до мережі у важкодоступних місцях.

Мережі 5G використовують поєднання існуючої технології 4G LTE і нової технології 5G New Radio (5G NR). 4G і 5G були розроблені для спільного існування, і можна очікувати, що додатки, розроблені для 4G, включаючи LTE-M і NB-IoT, матимуть дуже тривалий термін служби. Сьогодні більшість мереж, які називаються мережами 5G, насправді використовують 4G LTE.

5G покращує 4G у трьох основних сферах використання, розширений мобільний широкосмуговий зв'язок, критично важливий зв'язок і мобільний Інтернет речей.

Покращений мобільний широкосмуговий доступ наразі орієнтований на споживачів, яким потрібна постійно зростаюча пропускна здатність. Це також дозволяє використовувати нові випадки використання IoT, які вимагають великих обсягів даних, наприклад потокове відео.

Критичні повідомлення вимагають набагато швидшої реакції та підвищеної якості обслуговування та безпеки. 5G представляє нову радіотехнологію 5G, яка використовує вищу радіочастоту [3].

Мобільний IoT - LTE-M і NB-IoT - сумісні з технологією 5G NR, що означає, що технології LTE-M і NB-IoT можна використовувати протягом повного життєвого циклу 5G.

1.2 Аналіз існуючих енергозберігаючих технології IoT

На даний момент існує певна кількість сучасних технологій, які використовуються для підключення різного роду об'єктів. Тому постає питання яку з даних технологій варто обрати. Для відповіді на це питання, у даному підрозділі мною було проаналізовано та виконано найбільш репрезентативні існуючі технології IoT: LoRaWAN, LTE Cat-M1, NB-IOT і Sigfox. Однак цей перелік радіопротоколів не є вичерпним, сьогодні ми представляємо технології, доступні для використання LPWAN (дистанційне зчитування лічильників, моніторинг навколишнього середовища, управління паркуванням, утилізація відходів тощо).

LoRaWAN. Мережі LPWAN — це технології міжміських мереж з низьким енергоспоживанням, розроблені спеціально для обміну даними, що застосовуються в домені IoT. Низьке енергоспоживання цих технологій дозволяє розгортати датчики з автономним живленням протягом кількох років. Тому ці технології призначені для підключених об'єктів, які рисо комунікують і часто не мають доступу до джерела електричної енергії для живлення. Розрізняють нестільникові мережі LPWAN, LoRa і Sigfox, і стільникові мережі, такі як LTE Cat-M1 і NB-IoT.

Протокол LoraWAN дозволяє будь-якій компанії розгортати датчики LoRa як у публічній мережі оператора зв'язку, так і у власній приватній мережі. Таким чином зв'язок є довгостроковим і надійним. Ця двонаправлена технологія дозволяє досягати компромісів між кількістю даних, що передаються, радіусом дії та енергоспоживанням [22].

Наприклад, ми можемо надсилати до 500 повідомлень на день розміром 51 байт залежно від потреби. Також є можливість керувати об'єктами за допомогою повідомлень LoRa.

Sigfox. Завдяки технології, дуже адаптованій до обмежень Інтернету речей (низьке споживання та великий радіус дії), технологія Sigfox забезпечує хороше покриття в міських районах, особливо в прихованих місцях. Ця односпрямована

технологія (від датчика до мережі) дуже підходить для тих випадків, коли потрібно надсилати дуже мало даних (обмежено 144 повідомленнями по 12 байт на день). Тому варто орієнтуватися на такі використання, як дистанційне зчитування лічильників води чи газу, чи датчики відкривання дверей.

LoRaWAN і Sigfox є оптимальними для дуже низької потужності за низькою ціною. Вартість компонентів NB-IOT і LTE-M сьогодні все ще значно вища, ніж компонентів LoRaWAN і Sigfox (див. «порівняльну таблицю LPWAN» внизу статті)

NB-IOT. NB - IOT , який зараз розгортається, спирається на існуючі мережі 4G, доступні за ліцензією та пілотовані операторами. Використана радіотехнологія покращує проникнення всередину будівель або під землю порівняно з покриттям 2G/3G/4G. В Азії є приклади використання технології NB-IOT для розумного сільського господарства.

LTE Cat-M1. LTE Cat-M1 , який також розгортається, є похідною технологією 4G LTE, яка оптимізує споживання енергії цими об'єктами завдяки механізмам очікування. Більш енергоємна, ніж інші LPWAN, вона, тим не менш, забезпечує вищі швидкості, менші затримки та дає можливість передавати фотографії чи голос. На відміну від інших мереж LPWAN, це також дає можливість використовувати відстеження в кількох країнах. Саме в Новій Зеландії з 2017 року Vodafone тестує розгортання мережі LTE Cat-M1 для інтелектуального сільського господарства. Однак роумінгові угоди між операторами відсутні для міжнародних заявок [16].

Ці останні 2 мережі виграють від охоплення технологій LoRa та Sigfox у більш широких географічних зонах, але лише LTE-M забезпечує мобільність. З іншого боку, їх споживання таке, що необхідно уважно вивчати використання, щоб не міняти батарейки датчиків кожні 6 місяців.

На відміну від радіотехнологій, таких як Wifi, Bluetooth, ZigBee, LPWAN мають дуже великий діапазон, легко досягаючи максимальної відстані 10 км між об'єктами.

Теоретично протокол NB-IoT забезпечує кращі діапазони порівняно з іншими LPWAN. Але це робиться на шкоду споживанню, оскільки діапазон виходить за рахунок повторення переданих повідомлень. Це штучно збільшує шанси отримати повідомлення від датчика без кращої чутливості [8].

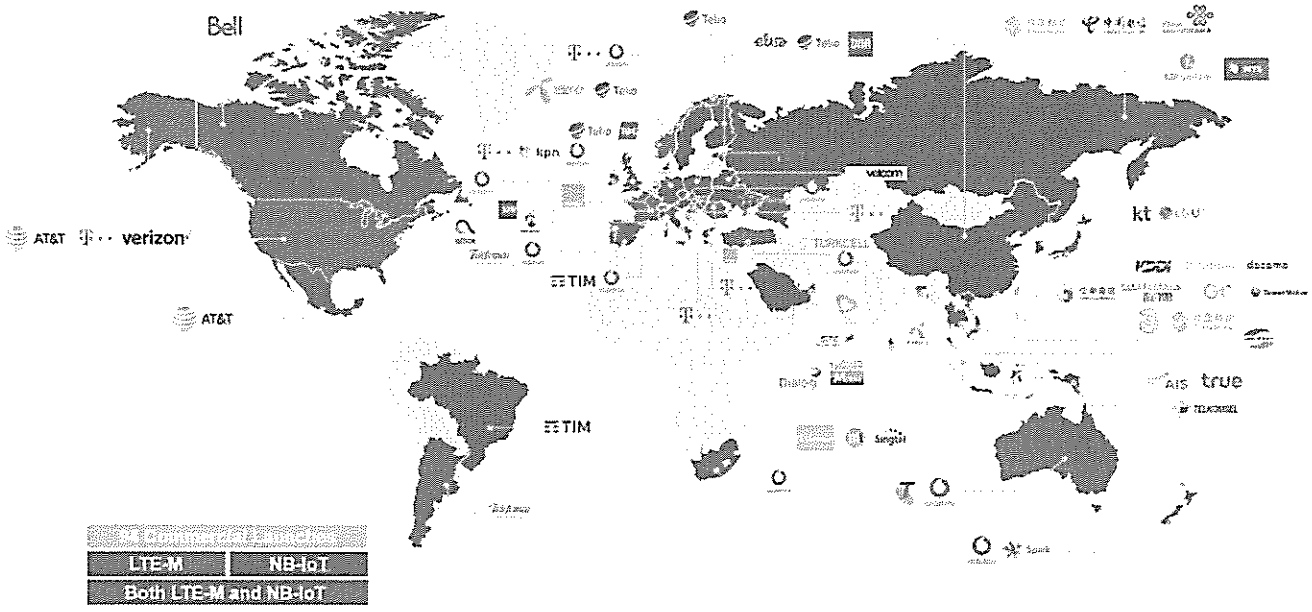


Рис.1.2. Поширення технологій у світі

Sigfox і LoRaWAN можуть передавати дуже невеликі обсяги даних, їх швидкість невисока. Протокол NB-IoT працює на тих же частотах, що й протокол LTE, але в більш вузькому діапазоні. Швидкості вищі, але без можливості передачі зображення. На відміну від інших технологій LPWAN, технологія LTE-M1 має високу пропускну здатність.

Якщо ми порівнюємо різні технології за теоретичною максимальною пропускною здатністю, ми можемо класифікувати їх наступним чином:

$$\text{Sigfox} < \text{LoRa} < \text{NB-IOT} < \text{LTE-M}$$

Чим довше датчик може переходити в режим сну без випромінювання, тим кращим буде термін служби батареї . LoRaWAN виділяється тим, що має перевагу в тому, що він може прокидатися раз на день, щоб надіслати повідомлення. Sigfox наближається до нього з можливістю видавати один раз на день, але повідомлення, які потроюються, щоб максимізувати шанси передачі. У NB-IoT і

LTE-M споживання по суті вище, незважаючи на механізми сну, розроблені спеціально для його обмеження [11].

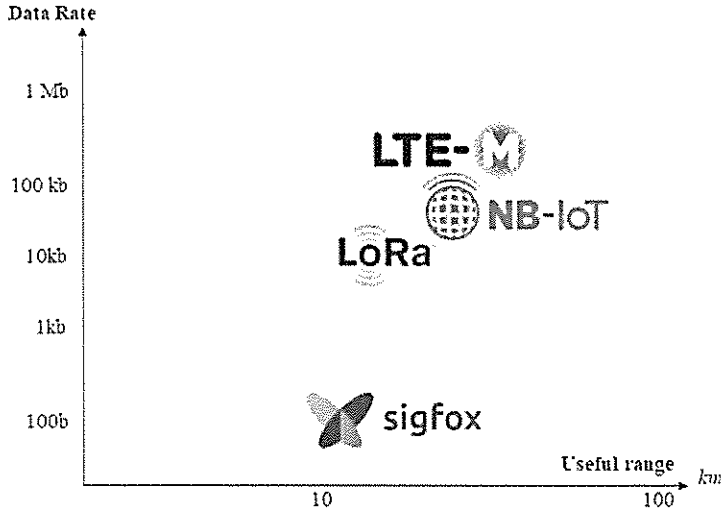


Рис.1.3. Порівняння діапазону та швидкості основних стандартів бездротового підключення

Ось порівняння енергоспоживання різних LPWAN:

LTE-M < NB-IOT < Sigfox < LoRa

Для датчиків, які мають бути мобільними, слід віддавати перевагу використанню LTE-M або LoRaWAN.

Повідомлення Sigfox не дуже стійкі до швидких змін середовища. Протокол NB-IoT не призначений для того, щоб датчик був мобільним.

Ось як ми можемо класифікувати різні технології відповідно до їх мобільності:

NB-IoT < Sigfox < LoRa < LTE-M

Таблиця 1.1.

Порівняння технологій

	LoRaWAN	Sigfox	LTE Cat-M1	NB-IoT
Специфікація	LoRa Alliance	Sigfox	3GPP	3GPP
Частота	Sub-GHz ISM Bande, 868MHz en UE	Sub-GHz ISM Bande, 868MHz en UE	Bandes LTE	Bandes LTE
Внутрішній діапазон (m)	> 100	> 100	> 100	> 100

Portee max (km)	> 10	> 10	> 10	> 10

Продовження таблиці 1.1.

Порівняння технологій

	LoRaWAN	Sigfox	LTE Cat-M1	NB-IoT
Максимальна швидкість передачі даних	11 kbit/s	100 bit/s	up to 375 kbits/s	up to 62.5 kbit/s
Час життя	++++++	+++++++	+++	++++
Ціна модуля	< 5$	< 3$	$3\$ + SIM$	$13\$ + SIM$
Мобільність	Lante	Non	Oui	Non
Розмір повідомлення	243 bytes	12 bytes	-	-
Корисність	Розумна будівля та Розумне місто			

Таблиця 1.2.

Порівняння споживання та діапазон частот

	LoRaWAN	Sigfox	LTE Cat-M1	NB-IoT
Tx current	47 mA (a)	54 mA (b)	190 mA (c)	140 mA (c)
Sleep current	2μA (a)	2μA (b)	8μA (c)	8μA (c)
Typ. Output power	14 (a)	12.5 (b)	23 (c)	23 (c)
Node sensitivity	-135.5 (a)	-127 (b)	-107.5 (c)	-114 (c)
GTW sensitivity	-141 (a)	-142 (e)	-107.5 (c)	-114 (c)
Link budget (Uplink)	155	154.5	156 (w repetitions)	164 (w repetitions)
Link budget (Dnlink)	149.5	139.5	156 (w repetitions)	164 (w repetitions)
REFERENCES	(a) from murata module spec (b) from Wisol module spec (c)f rom Ublox R410 spec		(d) from Kerlink Wirnet iStation spec (e) from Sigfox Network description prezentatiom	

1.3 Аналіз технологій NB-IoT та LTE-M та їх порівняння

LTE-M і NB-IoT розроблені для підтримки пристроїв IoT, яким потрібен тривалий час автономної роботи або які використовуються в місцях, куди важко дістатися за допомогою звичайної технології 4G, наприклад у глибоких приміщеннях [17].

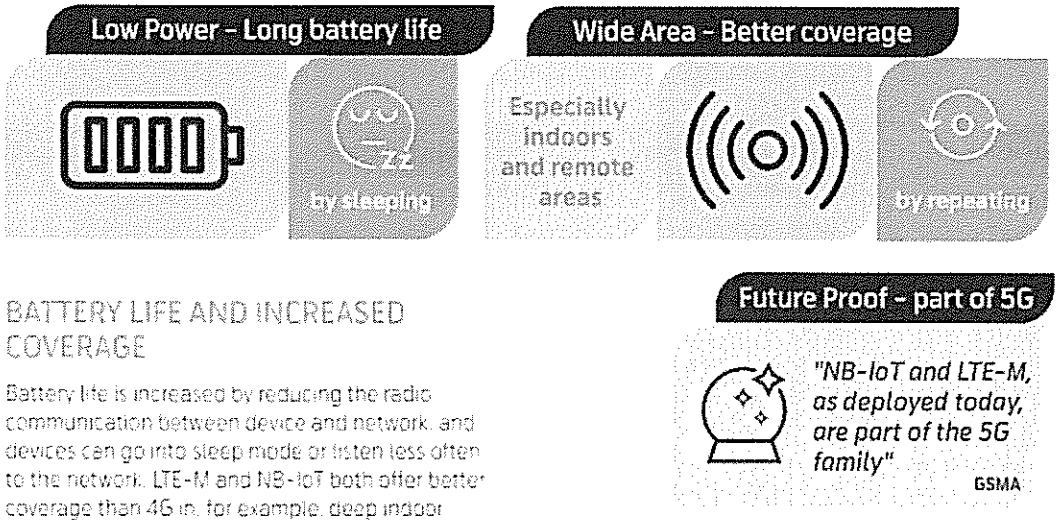


Рис. 1.4. Якісні показники технологій

Отже, чим вони відрізняються і як вплинуть на ринок дані технології:

1. Час терміну батареї та збільшений покриття. Термін служби батареї збільшується за рахунок зменшення радіозв'язку між пристроєм і мережею, і пристрої можуть переходити в режим сну або рідше слухати мережу. LTE-M і NB-IoT забезпечують краще покриття, ніж 4G, наприклад, у закритих або віддалених районах. Однак існує компроміс між часом автономної роботи, зоною покриття та швидкістю відгуку.

Щоб скористатися цим, потрібен доступ до нових типів функціональних можливостей у мережі. Наприклад, випадки використання PSM і EDRX, які потребують швидкої реакції, менш підходять для економії заряду акумулятора та розширеного покриття.

Подібним чином пристрої, термін служби яких становить 10 років, мають розгортатися в зонах із хорошим покриттям.

Для підтримки збалансованого підходу економія заряду акумулятора та розширене покриття застосовуються паралельно. Значного покращення терміну служби батареї та покриття можна досягти за допомогою режиму сну та застосування правильного рівня повторень.

2. Можлива поява нових цінових моделей. Моделі ціноутворення для LTE-M та NB-IoT, ймовірно, відрізнятимуться від традиційних телекомунікаційних цін через інший профіль трафіку, пов'язаний із підключенням IoT. Буде велика кількість підключених пристроїв LTE-M і NB-IoT, але вони надсилатимуть невеликі обсяги даних. Замість споживання даних за ціною моделі пристрою, мережеві провайдери, швидше за все, розглядатимуть можливість стягувати плату за доступ для пристроїв на основі кожного пристрою для LTE-M та NB-IoT або комбінації обох, щоб краще відповідати мережевим ресурсам, які споживають ці пристрої. Пристроїв [6,7].

3. Апаратне спрощення. LTE-M і NB-IoT використовують спрощені версії звичайного 4G, що зменшує складність обладнання та вартість, коли технологія працює в масштабі. GSMA підтримує список модулів, комерційно доступних за адресою: https://www.gsma.com/iot/mobile-iot-modules/, показуючи, що ринок модулів розбитий на три основні категорії: модулі, що підтримують LTE-M або NB-IoT і модулі, які підтримують як LTE-M, так і NB-IoT

Вибір між LTE-M та NB-IOT. На сам перед мною було проаналізовано інформацію про відмінності між технологіями LTE-M і NB-IoT та про різні режими, у яких може працювати стільниковий модем.

Таблиця 1.3.

Різниця між LTE-M і NB-IoT

	LTE-M	**NB-IoT**
Також відомий як	«eMTC», «LTE Cat-M1»	«LTE Cat-NB1» (3GPP rel 13) - «LTE Cat-NB2» (3GPP rel 14)
Пропускна здатність	1,4 МГц	200 кГц
Максимальна пропускна здатність (DL/UL)	300/375 кбіт/с	30/60 кбіт/с (NB1) - 127/169 кбіт/с (NB2)
Діапазон	До 4 разів	До 7 разів
Мобільність/повторний вибір клітини	Так	Обмежений
Частота розгортання	LTE в діапазоні	LTE In-band, guard band and GSM (Global System for Mobile) зміна призначення
Щільність розміщення	До 50 000 на комірку	До 50 000 на комірку

Розмір модуля	Підходить для носіння	Підходить для носіння
Споживання енергії	Термін служби батареї до 10 років	Термін служби батареї до 10 років

Існує кілька істотних відмінностей між LTE-M і NB-IoT, про які варто згадати, перш ніж продовжити. Давайте подивимося на оглядову таблицю порівняння LTE-M та NB-IoT, яку ми взяли «Що таке Cellular IoT» сторінка.

По-перше, різна пропускна здатність в ефірі. LTE-M має 1,4 МГц, тоді як NB-IoT має 200 кГц. Більша смуга пропускання LTE-M призводить до вищої пропускної здатності, тоді як менша смуга пропускання NB-IoT повинна призвести до кращої якості сигналу та довшого діапазону. Це означає, що за тих самих мережевих умов і при надсиланні того самого обсягу даних LTE-M буде рекомендованою технологією для роботи з низьким енергоспоживанням, оскільки вона потребує менше часу, щоб увімкнути радіо через вищу пропускну здатність порівняно з NB- IoT [15].

Отже, які найважливіші фактори компанія повинна враховувати, обираючи між LTE-M і NB-IoT або обома. Далі мною детально описуємо найбільш відповідні міркування та чим вони відрізняються один від одного, щоб зробити оптимальний вибір:

1. Адаптивність до нових випадків використання. Вибираючи технологію підключення, необхідно враховувати повний життєвий цикл підключеного продукту. Підприємствам необхідно вибрати технологію, яка може розвиватися з новими випадками використання. Уявіть собі продукт під назвою «Підключені двері».

Спочатку має бути можливість лише відкривати та закривати двері, і двері мають щовечора надсилати статистику використання в хмару. Типові двері мають термін експлуатації 10 років. Після простого огляду початкового сценарію використання обсяг даних дуже малий, тому фокус зосереджений на технології з найнижчою пропускною здатністю, а двері масово виробляються та успішно запускаються.

Через три роки підприємство хоче монетизувати цей успіх і додати нову цінність – двері мають не просто з'єднуватися, а й взаємодіяти зі службою

доставки посилок. Для випадків використання, коли можна очікувати, що програма буде розвиватися з часом, тому важливо, щоб усе рішення мало потенціал для розвитку. LTE-M забезпечує більший потенціал для зростання з часом.

Завдяки ширшій смузі пропускання LTE-M забезпечує більшу адаптивність до нових варіантів використання, коли варіанти використання рішення IoT розвиватимуться з часом.

NB-IoT є альтернативою, коли вимоги більш статичні та відомі з самого початку.

2. Підходить для заміни 2G/3G. У зв'язку з припиненням роботи мереж 2G і 3G у багатьох частинах світу багато застарілого обладнання, яке потрібно перевести на нові технології підключення.

Більш всього технології 2G залишаться доступними в багатьох частинах світу і переживуть 3G.

Очікується, що в Європі 2G буде доступним до 2025 року через законодавчо обов'язкові екстрені служби в ЄС, які залежать від технології 2G.

Оскільки покриття розгортань LTE-M і NB-IoT може бути недостатньо скрізь на сьогоднішній день, ми рекомендуємо підприємствам більш детально перевірити покриття та/або переконатися, що пристрої сумісні з існуючими технологіями як резервну копію.

Сценарії використання IoT з часом перейдуть від старих до нових технологій. Оскільки LTE-M відповідає або перевищує технічні характеристики послуг 2G/3G, це виглядає природним, еволюційним кроком. NBIoT має нижчу швидкість реагування та обмеження мобільності, і може бути актуальним для випадків використання з нижчими вимогами.

3. Глобальна доступність. На мою думку LTE-M стане першою технологією, яка стане загальнодоступною, оскільки технічно вона була розроблена для роумінгу з самого початку, як і всі інші технології 2G, 3G, 4G і 5G. NB-IoT спочатку був розроблений лише для статичних пристроїв, а роумінг був доданий пізніше, як пізніше.

Оператори будуть більш неохоче підтримувати вхідний роумінг пристроїв NB-IoT, які використовують мережеві ресурси, але навряд чи приносять дохід. Роумінг на NB-IoT, швидше за все, буде обмежений бізнес-підрозділами в групі операторів. Ми очікуємо, що найближчими роками роумінг LTE-M стане доступним у всьому світі, подібно до звичайного роумінгу 4G, і він справді вже доступний сьогодні як найкраща пропозиція за існуючими роумінговими контрактами 4G.

LTE-M був розроблений для роумінгу з самого початку та може використовувати існуючі роумінгові та оптові бізнес-моделі між операторами.

NB-IoT вимагатиме нових бізнес-моделей, щоб стати хорошою альтернативою для глобального підключення [25].

Тому ми очікуємо, що LTE-M стане актуальним для міжнародних рішень IoT раніше, ніж NBIoT.

4. Оновлення програмного забезпечення ТА безпека. Пристрої IoT можуть мати типовий термін служби від 10 до 15 років. Для багатьох випадків використання бажано оновлювати програмне забезпечення пристрою кілька разів протягом життєвого циклу. Тому підприємства повинні вибрати технологію, яка може обробляти оновлення, щоб працювати з сучасними методами розробки програмного забезпечення та підтримувати безпеку пристроїв.

Підприємства зазвичай використовують гнучку розробку програмного забезпечення (невеликі та часті кроки), щоб скоротити час виходу на ринок. Це робить водоспадний підхід до розробки програмного забезпечення, коли розгортається велике програмне забезпечення, до якого ніколи більше не торкаються, – практика минулого.

Характеристики NB-IoT означають, що він не підходить для модернізації великих парків пристроїв IoT. Очікується, що це буде розглянуто в майбутній версії NBIoT під назвою NB2. У цьому різновиді оновлення програмного забезпечення можна керувати за допомогою багатоадресної передачі.

Це означає, що буде доступно два варіанти NB-IoT — NB1 і NB2 (також іноді називаються LTE-cat NB1 і LTE Cat NB2). Однак наразі більшість мереж

підтримує лише NB1, і можуть пройти роки, перш ніж NB2 стане широко доступним.

Покращення безпеки та гнучкі методи розробки програмного забезпечення, які використовуються сьогодні, продовжуватимуть стимулювати оновлення програмного забезпечення. Це має великий вплив на споживання пропускної здатності протягом життєвого циклу пристроїв, яке часто недооцінюється. LTE-M значно краще обробляє оновлення пристроїв, оскільки його вища пропускна здатність може обробляти більше даних [18].

5. Переміщні пристрої. Усі попередні мобільні технології підтримують пристрої, які можуть пересуватися без переривання з'єднання. Пристрої постійно вимірюють радіосигнали найближчих радіовеж (стільників) у мережі та динамічно та плавно налаштовують їх сигналізацію на різні вежі (стільники). Тому видно значні відмінності між NB-IoT і LTE-M.

NB-IoT розроблено для статичних пристроїв. Він призначений для збільшення терміну служби батареї шляхом зменшення вимірювання сигналів на найближчі радіовежі (стільники). Коли пристрої NB-IoT переміщуються, сеанси можуть бути перервані або пристроям може знадобитися повторно підключитися. Це може призвести до перебоїв і скоротити термін служби акумулятора. Це робить NB-IoT менш придатним для рухомих пристроїв. З іншого боку, LTE-M розроблений для мобільних пристроїв, як і 2G, 3G, 4G і 5G. LTE-M може підтримувати рухомі пристрої без втрати сеансів даних на швидкості до 200 км/год. LTE-M є кращим вибором для рухомих пристроїв, оскільки він був розроблений для цього з самого початку. Оскільки NB-IoT розроблено для статичних пристроїв, це може призвести до перебоїв у разі переміщення пристроїв.

6. Пристрої дистанційного керування. Якщо пристроями потрібно керувати дистанційно, важлива швидкість реагування.

Пристрої, якими керують люди, потребують швидкої та послідовної реакції. LTE-M забезпечує такий же стабільний час відгуку, як і звичайний 4G, тому люди можуть використовувати його для дистанційного керування пристроями. NBIoT

призначений для надсилання невеликих обсягів даних і не призначений для швидкої відповіді. З NB-IoT іноді може знадобитися до 10 секунд, щоб отримати відповідь від пристрою.

Не всі випадки використання потребують швидкої реакції, і, наприклад, може бути цілком прийнятним почекати 10 секунд на показання датчика.

Коли є людська взаємодія, повільна реакція може бути сприйнята як низька зручність використання, що може зашкодити сприйняттю бренду підприємствами.

LTE-M необхідний для швидкої та узгодженої реакції, тоді як NB-IoT може обробляти випадки використання, коли прийнятна затримка в хвилини.

7. Готовність голосу. LTE-M розроблено для передачі голосу, а специфікація включає передачу голосу через LTE (VoLTE), яку розгортають 194 оператори в 91 країні [9].

Однак сьогодні VoLTE недоступний у всьому світі в мережах LTE-M, і існує не так багато апаратних модулів, які можуть підтримувати VoLTE через LTE-M. Ми очікуємо, що найближчими роками значення VoLTE у LTE-M зросте, як це сталося на споживчому ринку LTE.

Пропускна здатність і особливо швидкість реагування LTE-M також можуть бути використані як альтернатива рішенням для передачі голосу через IP. Пристрої повинні швидко відповідати на дзвінки та мати можливість надсилати й отримувати дані одночасно (повний дуплекс). Лише LTE-M підтримує повнодуплексний зв'язок.

NB2 додає технологію push to talk до NB-IoT, лише одна сторона може розмовляти в будь-який момент часу, оскільки технологія є напівдуплексною, як раніше були рації.

LTE-M розроблено для передачі голосу через LTE, а також може використовуватися для передавання голосу через IP із повним дуплексом. NB2 додає технологію push to talk до NB-IoT, але лише в напівдуплексному режимі.

8. Локалізація Sim-карти – EUICC. Фізична заміна SIM-карти розгорнутих пристроїв може бути дорогим і складним процесом, особливо в середовищі IoT.

SIM-карти з технологією eUICC дозволяють перемикати ідентифікацію по повітрю, без необхідності фізичної заміни SIM-карт [14].

Коли життєвий цикл підключених пристроїв довший за комерційну угоду з оператором, технологія eUICC робить можливим зміну оператора. eUICC також можна використовувати для пристроїв, розгорнутих у місцях, де неможливий роумінг. Хоча сьогодні eUICC все ще знаходиться на ранній стадії, вона стане життєво необхідною технологією для великих і міжнародних розгортань пристроїв IoT.

Не всі оператори підтримують поєднання NB-IoT і SMS, що означає, що eUICC не можна ініціювати в багатьох мережах. Пропускна здатність LTE-M також більше підходить для передачі SIM-профілів, як і оновлення програмного забезпечення. Підприємства, які розглядають eUICC, повинні також розглянути LTE-M.

9. Час виходу на ринок. Час виходу на ринок важливий для запуску нових продуктів. Технологія підключення – це лише один аспект продукту. Доступ до людей з належною компетенцією є життєво важливим для забезпечення часу виходу на ринок, тому багато підприємств обирають звичайні технології замість спеціалізованих. Загальні технології роблять розробку продукту швидшою, а технічне обслуговування продукту економічнішим, оскільки легше отримати доступ до розробників та інших спеціалістів.

Інтернет побудований на таких технологіях, як IP, TCP, UDP і TLS. Ці протоколи знайомі та прості у використанні для розробників, оскільки вони приховують велику складність мережі та їх легко масштабувати без централізованого контролю.

NB-IoT розроблений для роботи в локальних розгортаннях, наприклад, для підключення вуличних ліхтарів у місті. Тут необов'язково використовувати стандартні інтернет-технології, такі як IP.

Підприємства можуть отримати доступ до своїх пристроїв за допомогою функції Service Capability Exposure Function (SCEF), наданої оператором мережі.

SCEF спрощує доступ до пристроїв, приховуючи складність мережі оператора, роблячи доступ до пристроїв звичним для розробників програм.

Сьогодні SCEF доступний у деяких мережах для локального розгортання. Підприємства, які хотіли б використовувати NBIoT без IP, повинні підключатися до всіх окремих операторів NB-IoT, які підтримують SCEF.

Роумінг і взаємодія SCEF стандартизовані, але знадобиться кілька років, перш ніж SCEF буде широко розгорнуто і роумінг стане доступним.

LTE-M використовує стандартні IP-протоколи, що спрощує розробку програм. NB-IoT використовує індивідуальні протоколи, що вимагають спеціальної розробки додатків і компетенції.

1.4 Ринок модулів стільникового Інтернету речей

2021 рік був насиченим для індустрії модулів стільникового Інтернету речей. Попит на стільниковий модуль швидко зріс, хоча дефіцит поставок напівпровідників спричинив обмеження поставок модулів. Ринок модулів стільникового Інтернету речей досягне значного зростання обсягів у 2021 році. Виходячи з поточної ситуації з пропозицією, значне зростання ринку продовжиться у 2022 році. Однак існує занепокоєння щодо надмірної пропозиції, у 2023 році можливе сповільнення зростання ринку [30] .

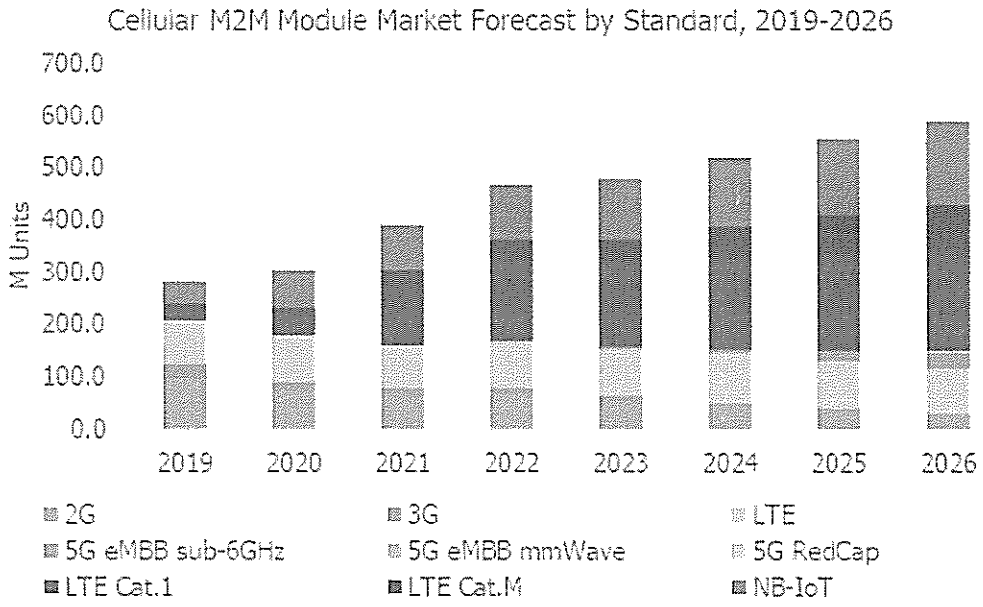


Рис. 1.5. Прогноз ринку стільникового модуля M2M за стандартом

Після слабкого 2020 року, за нашими оцінками, у 2021 році буде поставлено 391 мільйон одиниць модулів стільникового зв'язку IoT (для промислових і автомобільних пристроїв, за винятком стільникового модуля для комп'ютерів, споживчих і широкосмугових пристроїв), що становить 28,6% значного зростання порівняно з минулим роком. Оскільки багатомісячне відставання замовлень у кількох постачальників модулів залишається, очікується, що значне зростання ринку продовжиться у 2022 році. За нашими оцінками, у 2022 році зростання становитиме майже 20% порівняно з попереднім роком. З іншого боку, дефіцит пропозиції спричинив можливе надлишок запасів і надмірне бронювання в каналі та кінцеві клієнти, кілька постачальників стурбовані скасуванням замовлення, корекцією запасів найближчим часом.

Враховуючи історичне зростання ринку, зростання ринку в 2021-2022 роках виглядає надто сильним. Ми припустили низьке однозначне зростання у 2023 році, а потім повернемося до історичного високого однозначного річного зростання після 2024 року.

Щодо стандарту стільникового зв'язку, багато промислових додатків IoT не вимагають високої пропускної здатності даних, але потребують широкого географічного охоплення. У 2020-2021 роках близько 80% поставок модулів

становили 2G/3G або LTE/LPWA низької категорії. Ринок застарілих мереж 2G і 3G постійно скорочується, стільниковий LPWA (LTE Cat.M/NB-IoT) і LTE Cat.1 становлять майже 60% у 2021 році.

У 2021 році ми спостерігали:

- стрімке зростання ринку LTE Cat.1 у азіатському регіоні, але помірне зростання за його межами. Оператори ЄС виявляють інтерес до недорогого модема LTE Cat.1 для міграції 2G/3G.

- ринок модулів LTE Cat.M досягне 70% потужного зростання в 2021 році, головним чином у Північній Америці та Японії. Попит на LTE Cat.M/NB-IoT також спостерігається в Європі та Азіатсько-Тихоокеанському регіоні для покриття мережі з кількома операторами в одному SKU.

- у 2021 році зростання ринку NB-IoT у Китаї сповільнилося. Ринок NB-IoT виріс за межами Китаю, але обсяг все ще невеликий.

У 2021 році поставки LTE Cat.1 зросли більш ніж утричі порівняно з аналогічним періодом минулого року, перевищивши поставки NB-IoT і ставши найбільшим стандартом. LTE Cat.1 стрімко зростає на китайському ринку в 2020-2021 роках, замінюючи 2G і частину LTE Cat.4.

Спочатку говорилося, що NB-IoT призначений для широкого використання. Однак його основні застосування залишаються незмінними, для інтелектуального вимірювання та датчиків диму. LTE Cat.1 став основним стандартом стільникового зв'язку для відстеження активів, логістики, телематики, розумних платежів та економіки спільного використання.

У 2021-2022 роках ринок широкосмугового зв'язку LTE і модулів 5G становив близько 20%. Основним випадком використання широкосмугового модуля є OEM-телематика, промисловий шлюз, камера спостереження, моніторинг на основі камери, інтелектуальна оплата високого класу, ідентифікація обличчя, безпілотник, AGV, робот... багато програм пов'язані з камерою, попит на розумний модуль є. зростаючий. Смарт-модуль використовує SoC смартфона, інтегрує ОС Android, камеру AI, обробку медіа в модуль [24].

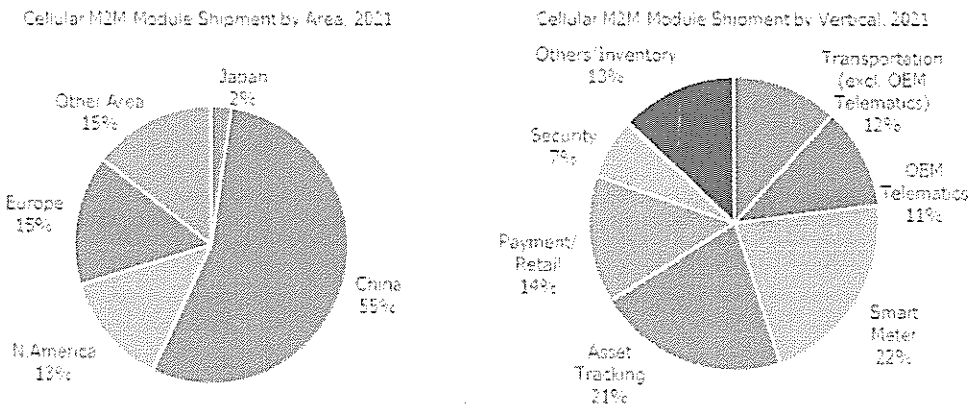


Рис. 1.6. Поставки модулів стільникового зв'язку M2M за територіями та вертикалями

З точки зору географії, завдяки урядовій цифровізації Китай стає найбільшим ринком стільникових модулів протягом багатьох років. Китай також створив кілька нових варіантів використання стільникових промислових модулів. Тільки на Китай припадає понад 50% ринку, за ним йдуть Європа та Північна Америка. Ринок стільникових модулів відносно невеликий у багатьох країнах, що розвиваються.

Що стосується додатків, ми оцінюємо, що інтелектуальний лічильник/комунальні послуги та відстеження активів становлять понад 20% у 2021 році, за якими йдуть роздрібна торгівля/оплата, транспорт і телематика OEM для автомобілів. Запровадження LPWA у лічильниках води та газу підтримує зростання ринку інтелектуальних лічильників стільникового зв'язку. Ринок відстеження активів продемонстрував значне зростання у 2021 році завдяки зростанню попиту на логістику та управління ланцюжками поставок, відновленню ринку пристроїв у Китаї. Ринок телематики OEM також стрімко зріс у 2021 році, незважаючи на те, що глобальні продажі автомобілів залишалися млявими [9].

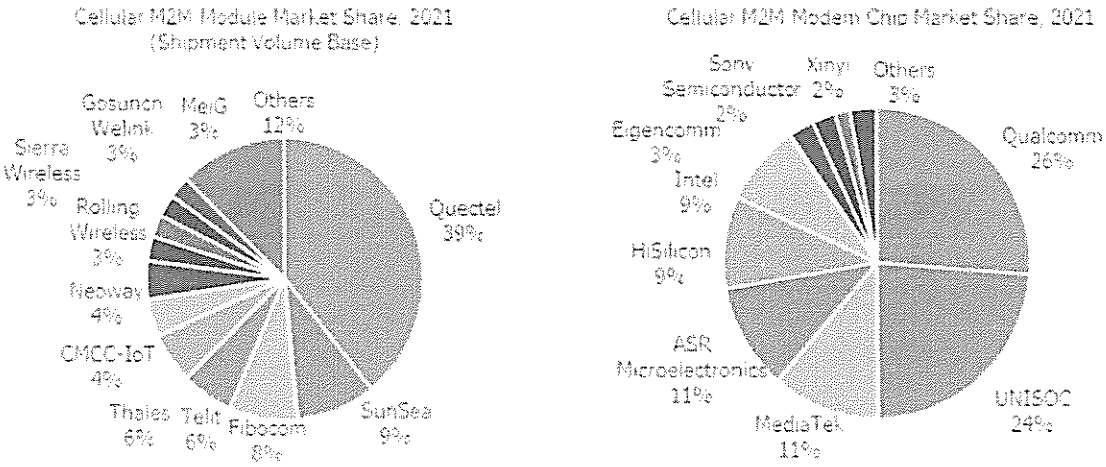


Рис.1.7. Частка ринку стільникового модуля M2M і модемного чіпа

Завдяки високому попиту більшість постачальників модулів стільникового зв'язку збільшили продажі у 2021 році. Однак темпи зростання кожного постачальника модулів відрізняються залежно від закупівлі напівпровідників.

1.5 Глобальна доступність та перспективи розвитку

Для глобального розгортання пристроїв підприємства повинні брати до уваги життєвий цикл технології.

Глобальне розгортання потребує глобальної доступності, але нові технології спочатку доступні локально, як правило, у міських районах або з розгортанням по всій країні. Отже, коли ми можемо очікувати глобальної доступності LTE-M і NB-IOT?

Сьогодні статус LTE-M та NB-IoT полягає в тому, що вони обидва доступні локально та на шляху до того, щоб стати глобально доступними.

Ми бачимо, що іноді один оператор у регіоні починає зосереджуватися на LTE-M або NB-IoT, після чого його конкуренти в тому ж регіоні часто пропонують альтернативу.

Очікується, що через кілька років як LTE-M, так і NB-IoT будуть локально доступні в усіх країнах [19].

допомоги водіям, які потрапили в аварію, у будь-якій точці Європейського Союзу. З квітня 2018 року eCall став обов'язковим для всіх нових схвалених автомобілів, що продаються в Європейському Союзі. Оскільки eCall вимагає голосового зв'язку 2G, оператори в Європейському Союзі не можуть просто відмовитися від 2G.

Ми очікуємо, що більшість європейських операторів підтримуватимуть 2G до 2025 року. У Північній Америці 2G менш доступний, а деякі країни Азії та Тихоокеанського регіону вже відмовилися від 2G.

LTE-M і NB-IoT починають ставати глобально доступними, починаючи з LTE-M. Ми очікуємо, що LTE-M і NB-IoT будуть доступні протягом повного життєвого циклу 5G [21].

1.6 Рекомендації щодо вибору та застосуванні технологій

Вибір правильної технології підключення є одним із найважливіших рішень під час впровадження рішення IoT. Правильний вибір має важливе значення для розгортання ефективного та економічно ефективного рішення, яке може розвиватися з часом. Нові стандарти підключення до Інтернету речей для мобільних пристроїв, LTE-M і NB-IoT, відкривають нові й удосконалені сценарії використання, пропонуючи краще покриття, тривалішу роботу акумуляторів і/або меншу вартість пристрою. Крім того, вони пропонують перспективний шлях, оскільки мережі 2G і 3G поступово заходять у світ.

Для більшості міжнародних рішень Інтернету речей LTE-M буде кращим стандартом підключення, оскільки очікується, що він стане доступним у всьому світі швидше та буде більш простим під час розробки та підтримки програм. NB-IoT все ще може бути кращим вибором для деяких додатків, наприклад, для дуже великих сенсорних мереж, де вимоги відомі під час розгортання, і найкраще можливе покриття всередині приміщень є абсолютно важливим.

На сьогодні ні LTE-M, ні NB-IoT не розгорнуті настільки широко, щоб на них можна було покладатися виключно для міжнародних парків пристроїв. Наразі

рекомендується використовувати апаратне забезпечення, яке може використовувати LTE-M або NB-IoT, а також мережі зі зрілими відбитками, наприклад, 2G та/або 4G. Статус розгортання мережі мобільного Інтернету речей швидко розвивається, тому правильне налаштування з часом змінюватиметься [24].

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖ LTE-M/NB-IoT

В Інтернеті є багато джерел, які намагаються охарактеризувати технології LTE-M (Cat-M1) і NB-IoT (Cat-NB1). На жаль, багато з цих характеристик містять ідеальні числа, які не застосовуються в реальному світі. У контексті енергоспоживання нам також потрібно враховувати мережеві конфігурації, які мають великий вплив на загальне енергоспоживання обладнання користувача (UE). Саме тому мною було виконано дослідження тестування, використовуючи систему nRF9160 Nordic Semiconductor в упаковці (SiP) як UE для дослідження цих областей рис.2.1.[17].

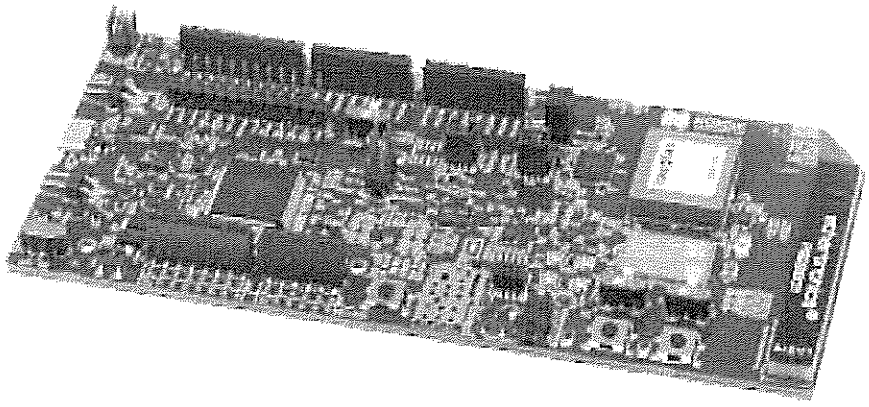


Рис.2.1. SiP малої потужності з вбудованим модемом LTE-M/NB-IoT і GNSS

У даному дослідженні мною було зафіксовано кілька параметрів даних, а саме енергоспоживання пристрою та використано скандинавську функцію оцінки з'єднання , щоб оцінити мережеве з'єднання перед надсиланням даних Uplink

(UL) за допомогою UDP (протокол дейтаграм користувача). Це було знято за допомогою технологій LTE-M і NB-IoT з інтервалом 1 км від базової станції (технічний термін «eNB»). Вимірювання проводилися, коли пристрої були статичними та після холодного запуску в кожному місці.

2.1 Режим функціонування обладнання LTE-M/NB-IoT

У даному підрозділі мною було розглянуто різні режими, в яких може працювати модем LTE-M/NB-IoT.

Існує три основних режими:

1. Режим підключення RRC (Контроль радіоресурсів). У цьому режимі радіостанція активна, а модем має залишатися в синхронізації з мережею, для чого потрібно ввімкнути високоточні таймери в UE. Цей режим споживає найбільше електроенергії, і для пристроїв із низьким енергоспоживанням ви бажаєте перебувати в цьому режимі якомога рідше залежно від потреб вашої програми.

2. Режим очікування RRC. У цьому режимі вам не потрібно підтримувати синхронізацію з мережею. Трансивер вимкнено, і ви використовуєте інтервали eDRX для сну між вікнами пейджингового зв'язку, коли ви вмикаєте приймач, щоб перевірити, чи є дані з мережі, які ви можете отримати. Якщо мережа має деякі дані для UE, модем повернеться в режим підключення RRC. UE може запитувати інтервал eDRX, але мережа вирішує, дозволити вона вам цей інтервал чи ні. Зазвичай ми бачимо, що мережі частіше схвалюють подовження цього інтервалу, ніж його скорочення [16].

3. Режим енергозбереження (PSM). У цьому режимі радіо вимикається, і UE недоступне з боку мережі. UE все ще зареєстровано в мережі, тому, коли воно виходить із режиму сну та переходить у режим RRC Connected, йому не потрібно шукати мережу та реєструватися знову, що має зробити модем, якщо ви вимкнете його замість використання PSM. UE може залишатися в PSM протягом приблизно

бажаєте перебувати в цьому режимі якомога рідше залежно від потреб вашої програми.

2. Режим очікування RRC. У цьому режимі вам не потрібно підтримувати синхронізацію з мережею. Трансивер вимкнено, і ви використовуєте інтервали eDRX для сну між вікнами пейджингового зв'язку, коли ви вмикаєте приймач, щоб перевірити, чи є дані з мережі, які ви можете отримати. Якщо мережа має деякі дані для UE, модем повернеться в режим підключення RRC. UE може запитувати інтервал eDRX, але мережа вирішує, дозволити вона вам цей інтервал чи ні. Зазвичай ми бачимо, що мережі частіше схвалюють подовження цього інтервалу, ніж його скорочення [16].

3. Режим енергозбереження (PSM). У цьому режимі радіо вимикається, і UE недоступне з боку мережі. UE все ще зареєстровано в мережі, тому, коли воно виходить із режиму сну та переходить у режим RRC Connected, йому не потрібно шукати мережу та реєструватися знову, що має зробити модем, якщо ви вимкнете його замість використання PSM. UE може залишатися в PSM протягом приблизно 6 хвилин, до кількох тижнів залежно від мережі. ПРИМІТКА. Деякі мережі не надають пристроям у роумінгу функції PSM або eDRX, це визначено угодами між роумінговою SIM-карткою та місцевим оператором мережі.

Слід зазначити, що пристрій nRF9160 у режимі PSM може прокинутися, коли забажає, і перейти в режим RRC Connected, якщо йому потрібно надіслати дані, наприклад, будильник.

Струм PSM становить 2,7 мкА для nRF9160 SiP.

Програма може використовувати комбінацію режимів залежно від того, що вам потрібно у вашій програмі. Чудове емпіричне правило для малопотужних пристроїв — надсилати багато даних якомога рідше. Таким чином ви уникаєте частого входу та виходу з режиму підключення RRC і можете, наприклад, отримати користь від перебування в PSM протягом більшої частини часу, щоб мінімізувати споживання енергії.

Програма зазвичай використовує одну з таких конфігурацій:

- RRC підключено, RRC не працює та PSM

- RRC підключено та RRC не працює рис.2.2.

- RRC підключений і PSM рис.2.3.

Давайте спочатку подивимося на режими RRC Connected і RRC Idle із формою хвилі, отриманою з онлайн-профайлера живлення , який використовується для оцінки споживання електроенергії на nRF9160 SiP [15].

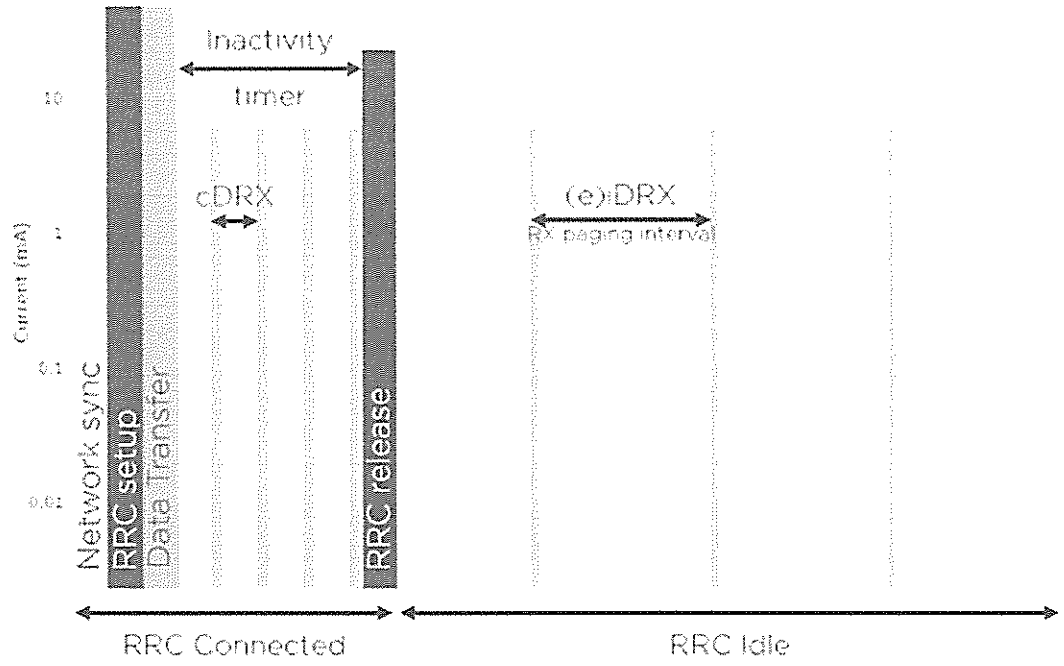


Рис. 2.2. RRC Connected і режим очікування RRC

На рис. 2.2. показано, як nRF9160 SiP підключається до мережі, надсилає деякі дані UDP, а потім переходить у режим очікування RRC, який прослуховує вхідні повідомлення з мережі через інтервали, які називаються інтервалами iDRX. Це інтервал, який згадується, коли ви читаєте типові маркетингові матеріали щодо eDRX, але визначення eDRX – це «інтервали понад 5,12 с», тому він можетакож можна використовувати в контексті cDRX, але це рідко. Інтервал cDRX є «connected-DRX» у режимі RRC Connected і налаштовується мережею та не може бути змінений UE. Ось чому ми будемо звертатися до eDRX як до iDRX у цьому блозі, щоб бути точним і уникнути плутанини. Як ви можете бачити на малюнку 1, у вас є інтервал у режимі RRC Connected, який називається cDRX. Цей інтервал встановлюється мережею, і його не можна змінити в UE. На відміну від

цього, ми маємо інтервал iDRX, коли UE може запитати мережу на інший інтервал iDRX за допомогою AT-команди « +CEDRXS » або через нашу бібліотеку LTE Link Controller у nRF Connect SDK. Інтервали cDRX зазвичай набагато коротші, ніж типові інтервали iDRX. cDRX може бути між інтервалами від 0,01 с до 10,24 с, тоді як інтервали iDRX можуть бути від 0,16 с до ~44 хв. Це означає, що під час використання режиму підключення RRC і режиму очікування RRC інтервали iDRX потенційно мають більш значний вплив на загальне енергоспоживання, ніж cDRX.

Іншим важливим параметром у режимі RRC Connected є «таймер бездіяльності», більш точно відомий як «RRC таймер бездіяльності». Як і cDRX, цей таймер також налаштовується мережею. Призначення таймера бездіяльності RRC полягає в тому, щоб мережа підтримувала зв'язок UE у разі надходження будь-яких додаткових даних, оскільки мережа не знає, коли надіслано останній пакет. Однак цей додатковий час перебування в режимі RRC Connected може завдати шкоди бюджету електроенергії, якщо мережа налаштувала цей таймер на надто довгий час, оскільки ви повинні чекати цього таймера кожного разу, коли ви хочете вийти з режиму RRC Connected. У деяких мережах цей таймер бездіяльності RRC може бути встановлений на 4 секунди, а в інших – на 18 секунд, і це потенційно може скоротити час автономної роботи вдвічі [12].

Тепер давайте розглянемо комбінацію RRC Connected Mode та PSM, яка використовується в нашому польовому тесті.

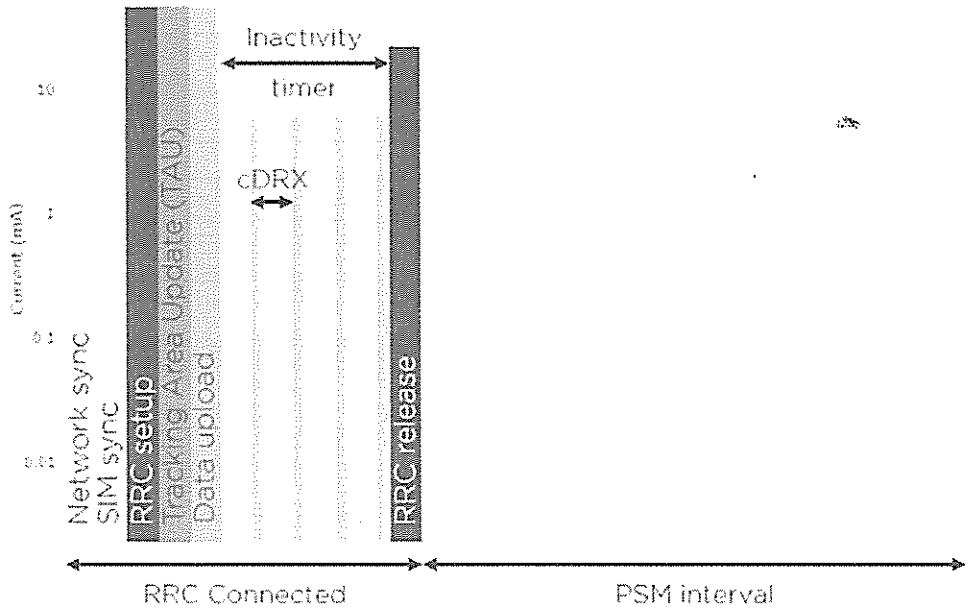


Рис.2.3. Режим підключення RRC і PSM

На рис.2.3. показано, як nRF9160 SiP виходить із режиму PSM і знову підключається до мережі, надсилає деякі дані UDP, а потім повертається в режим енергозбереження. У PSM UE все ще зареєстровано в мережі, але може вимкнути модем на затверджений мережею інтервал (це виконується модемом автоматично). Це означає, що в режимі PSM UE недоступний для мережі, але може вийти з режиму сну в будь-який час для надсилання даних. Інтервал PSM (також відомий як періодичний таймер TAU або T3412) теоретично може складати від 10 хвилин до 413 днів (приблизно 1 рік 1,5 місяці) і може бути запитаний командою AT « +CPSMS » або LTE Link Бібліотека контролера. Цей інтервал визначає, як часто UE має виходити з PSM, щоб виконати оновлення зони відстеження (TAU). Пояснено просто, це просто для того, щоб мережа знала, де знаходиться UE, тобто зона відстеження. Якщо ви прокидаєтеся з PSM для передачі даних (або будь-якої іншої діяльності, яка вимагає підключення UE до мережі), він завжди виконуватиме процедуру TAU, і, отже, періодичний таймер TAU скидається [13].

2.2 Тестове дослідження впливу на енергоспоживання пристроїв

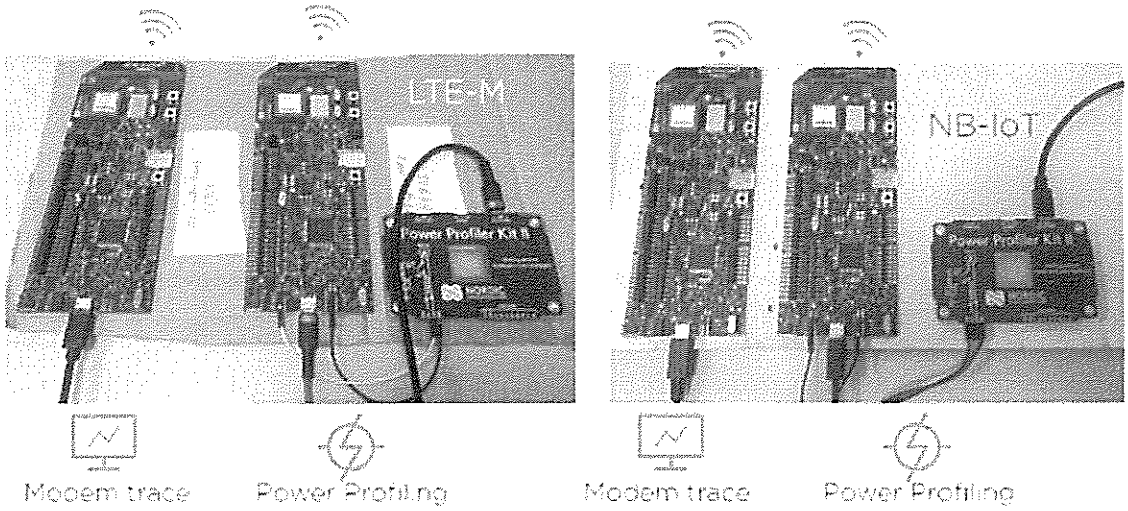


Рис.2.4. Тестове налаштування для випробування з використанням nRF9160 DK і PPK2

Для тесту був використаний стандарт (v1.0.1) разом із SIM-картками мобільного оператора. Ми також використовували щоб виміряти енергоспоживання двох вибраних nRF9160 DK, як показано на рис. 2.4. Під час тестування використовувалась мікропрограма модему v1.3.1. Використано 4 різні DK nRF9160 із 4 різними версіями зразка UDP у nRF Connect SDK із дещо різними конфігураціями [20].

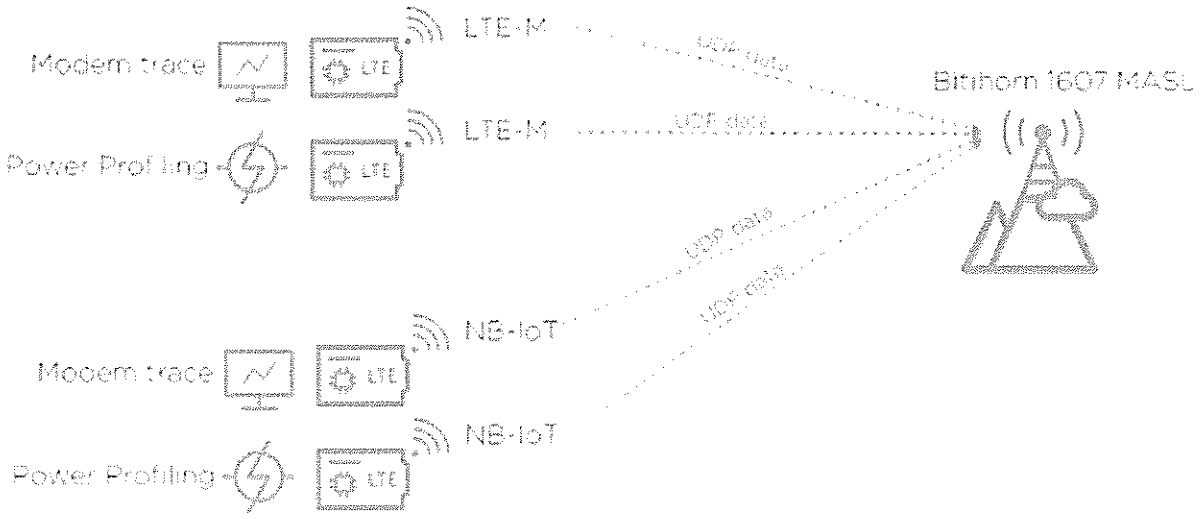


Рис. 2.5. Повна тестова установка

Налаштування, яке показано на рис.2.5. описано нижче:

- 1×nRF9160 DK із запущеним зразком UDP із увімкненим трасуванням модему та ввімкненим LTE-M;

- 1×nRF9160 DK із запущеним зразком UDP з вимкненим трасуванням модему та ввімкненим LTE-M із вимірюванням енергоспоживання;

- 1×nRF9160 DK із запущеним зразком UDP із увімкненим трасуванням модему та ввімкненим NB-IoT;

- 1×nRF9160 DK із запущеним зразком UDP з вимкненим трасуванням модему та ввімкненим NB-IoT із вимірюванням енергоспоживання;

Вимыряно споживання електроенергії на nRF9160 SiP DK, для яких не було ввімкнено трасування модему, оскільки ця функція споживає додатковий струм і може вплинути на вимірювання потужності.

Ця різниця особливо важлива в цьому тесті, оскільки ми не можемо на 100% співвіднести дані трасування модему з даними вимірювання потужності за допомогою тієї самої мережевої технології, оскільки дані були отримані на двох окремих DK. Однак це має дати нам хорошу загальну картину того, що впливає на енергоспоживання з огляду на трасування, які ми взяли з інших DK [28].

Він базується на зразку UDP із нашого nRF Connect SDK , але ми збільшили « CONFIG_UDP_DATA_UPLOAD_SIZE_BYTES » до 300 байт і ввімкнули трасування модему в двох зразках, в одному з яких увімкнено «

CONFIG_LTE_NETWORK_MODE_LTE_M», а в другому — «CONFIG_LTE_NETWORK_MODE_NBIOT». Ми також включили кілька AT-команд для зчитування різних параметрів, які, на нашу думку, було б цікаво відстежувати. Ці команди були +CGMR , %XMONITOR , +CESQ , %XSNRSQ , %XTEMP , +CEINFO і %CONEVAL .

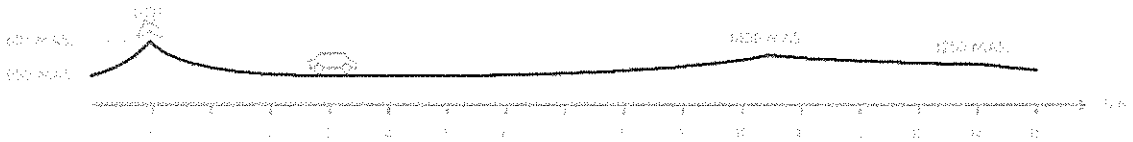


Рис. 2.6. Демонстрація нашого від'їзду від eNB

Початок вимірювання виконано за 3 км від базової станції (eNB), що знаходиться на вершині гори. Виміряно енергоспоживання для двох DK під час підключення до мережі та зафіксовано трасування модемів на інших двох DK від завантаження до їх підключення до PSM. Далі було виконано переміщення на північ на 1 км від першої тестової точки на відстані 3 км зроблено той самий процес вимірювання даних і потужності від завантаження, поки пристрої не перейшли до PSM. Цей процес тривав, доки не було втрачено з'єднання на всіх пристроях. Усі вимірювання проводилися, коли прилади були статичними.

2.3 Результати тестування

2.3.1 Результати тестування технології LTE-M

Почнемо з даних, які було зыбрано на DK, підключених до мережі LTE-M.

Спочатку розглянуто конфігурації мережі табл.2, які ми отримали від базової станції (eNB) на вершині гори. Ці значення можна зчитати з форми хвилі, отриманої за допомогою Power Profiler Kit II.. Підвищені значення, які ми бачимо червоним кольором для NB-IoT у табл. 2.1, повинні мати негативний вплив на загальне енергоспоживання, а те, що ми бачимо зеленим кольором, має зменшити

енергоспоживання. Ви можете скористатися Online Power Profiler і перевірити це самостійно.

Таблиця 2.1.

Спеціальні конфігурації мережі для LTE-M і NB-IoT на eNB

опис	LTE-M	NB-IoT	Різниця в NB-IoT
Таймер бездіяльності RRC (мс)	11000	18000	7000
Інтервал cDRX (мс)	320	2048	1728
Тривалість увімкнення cDRX (мс)	40	60	20
Таймер бездіяльності cDRX (мс)	100	50	-50

Нижче ми можемо побачити табл.2.2, у якій показано багато різних параметрів, отриманих із AT-команд, які ми надіслали та зчитали за допомогою трасування модему (можна також зчитати з журналу послідовного виведення програми). Ви можете натиснути на заголовок опису, щоб перевірити, яка саме AT-команда використовувалася для різних параметрів. Сині числа залишаються незмінними на кожному кілометрі від базової станції. Ми не змогли підключитися до мережі LTE-M через 12 км (приблизно 7,46 милі).

Таблиця 2.2.

Дані, отримані з трасування модему в мережі LTE-M

опис	**3 км**	**4 км**	**5 км**	**6 км**	**7 км**	**8 км**	**9 км**	**10 км**	**11 км**	**12 км**
Вихідна потужність (дБм)	23	8	15	15	15	15	15	16	23	23
RSRP (дБм)	-101	-82	-75	-95	-94	-94	-89	-92	-102	-105
Енергетична оцінка	7 - Норм.	8 - Добре	8 - Добре	7 - Норм.	7 - Норм.	7 - Норм.	7 - Норм.	7 - Норм.	7 - Норм.	7 - Норм.
Час підключення (с)	3,4	4,5	3,5	4,8	4,2	4,2	3,8	4	4,2	3,5
SNR (дБ)	5	16	19	12	12	11	16	12	7	4
Коефіцієнт повторення висхідної лінії зв'язку	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Коефіцієнт повторення низхідної лінії зв'язку	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
TX повтори	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
RX	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4

повторення										
CINR (дБм)	5	15	18	13	10	11	15	12	7	4

На рис.6 висвітлюється кореляція між вихідною потужністю TX та RSRP для кожного кілометра від базової станції, а також оцінки енергії, які видно з табл.2.2.

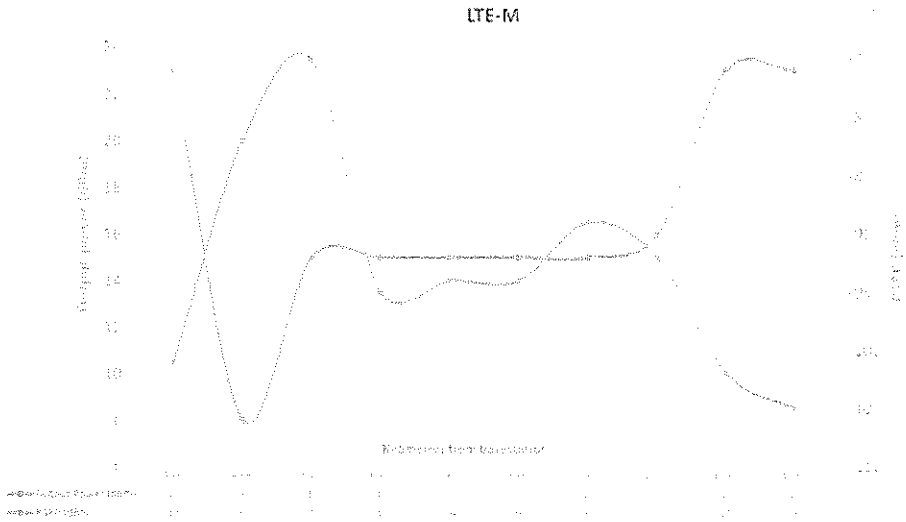


Рис.2.7. Кореляція вихідної потужності та RSRP на LTE-M

На рис.2.7. показано вихідну потужність на лівій осі та RSRP на правій осі. У нижній таблиці показано кілометри від базової станції (eNB) із фактичними вимірюваннями. Як правило, чим вище RSRP, тим краща якість сигналу, наприклад, -75 дБм є кращою якістю сигналу, ніж -105 дБм. Кольори фону представляють оцінки енергії з табл. 2.2, тому ми бачимо, що на відстані 4 км це оцінено як «хороші умови».

Далі проаналізовано як збільшення відстані між eNB і UE впливає на енергоспоживання на рис.2.8.

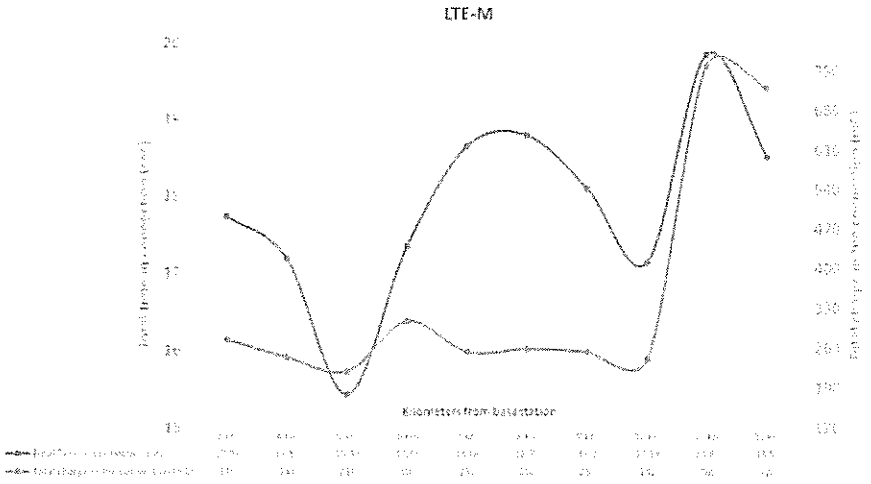


Рис.2.8. Загальний час і загальний заряд, зафіксовані під час підключення в LTE-M

На рис.2.8. ми можемо побачити кореляцію між загальним часом підключення та загальним зарядом підключення, який вимірюється від завантаження nRF9160 SiP до переходу в режим енергозбереження. Ви можете використовувати ці числа, щоб обчислити середнє загальне споживання електроенергії та використати це для розрахунку терміну служби акумулятора. Це може дати вам загальне уявлення про те, як відстань (або перешкоди) від eNB впливає на енергоспоживання пристрою [28].

2.3.2 Результати тестування технології NB-IoT

У табл. 2.3. представлені всі різні параметри, отримані з AT-команд, які надісилались для UE за допомогою мережі NB-IoT.

Сині числа залишаються незмінними на кожному кілометрі від базової станції. Демонструються результати від 3 до 12 км (приблизно 7,46 милі), оскільки після 12 км пристрій NB-IoT підключається до іншого eNB.

Таблиця 2.3.

Дані, отримані з трасування модему на NB-IoT

опис	3 км	4 км	5 км	6 км	7 км	8 км	9 км	10 км	11 км	12 км
Вихідна потужність (дБм)	21	4	3	2	8	4	10	14	21	22

RSRP (дБм)	-90	-66	-66	-65	-70	-73	-74	-76	-88	-90
Енергетична оцінка	7 -Норм.	8 - Добре	7 – Норм.	8 - Добре	7 – Норм..	8 - Добре	7 – Норм.	7 – Норм.	7 – Норм.	6 – Зле
Час підключення (с)	19	22,6	19,2	26,2	21,6	22,8	27,5	25	17,6	17,1
SNR (дБ)	33	43	48	46	46	42	45	43	43	41
Коефіцієнт повторення висхідної лінії зв'язку	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Коефіцієнт повторення низхідної лінії зв'язку	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
TX повтори	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2
RX повторення	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CINR (дБм)	8	18	23	22	21	17	20	18	18	16

На рис.2.9. висвітлюється кореляція між вихідною потужністю TX та RSRP для кожного кілометра від eNB, а також оцінки енергії, показані в табл.2.3. Слід зазначити, що пристрої NB-IoT фактично підключалися після 12 км, однак це було до інших базових станцій (eNB), ніж на вершині гори. Тому вирішено не включати ці результати, оскільки це призведе до недійсності прямого порівняння з використанням технологій LTE-M і NB-IoT, підключених до тієї самої базової станції [10].

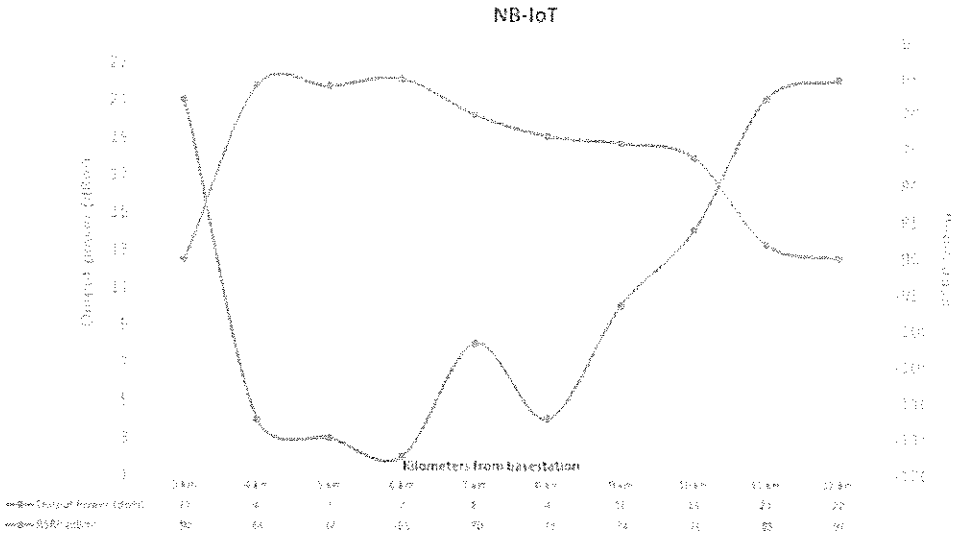


Рис.2.9. Кореляція вихідної потужності та RSRP на NB-IoT

На рис.2.9. показано вихідну потужність на лівій осі та RSRP на правій осі. У нижній таблиці показано кілометри від базової станції (eNB) із фактичними

вимірюваннями. Кольори фону представляють оцінки енергії з табл.2.3., тому видно, що на відстані 12 км це оцінюється як «погані умови».

Давайте тепер подивимося, як збільшення відстані між базовою станцією та UE та впливає на енергоспоживання на рис.2.10.

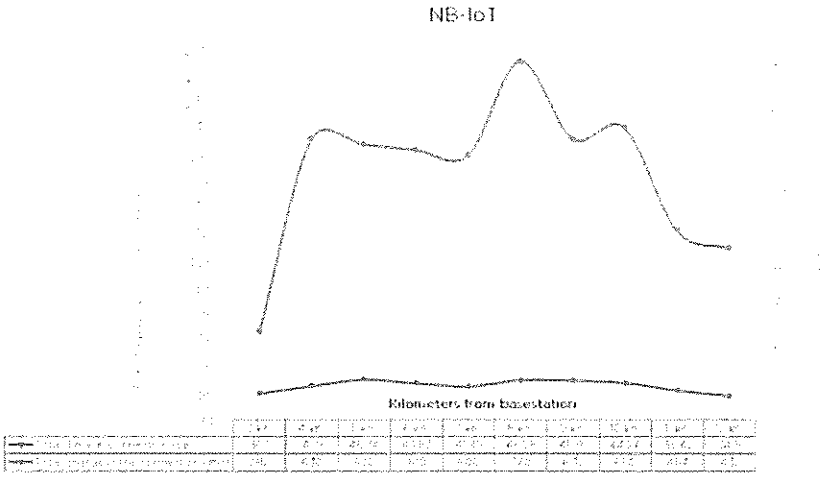


Рис.2.10. Загальний час і загальний заряд, зафіксовані під час з'єднання в NB-IoT

На рис. 2.10 ми можемо побачити кореляцію між загальним часом підключення та загальним зарядом підключення, який вимірюється від завантаження nRF9160 SiP до переходу в режим енергозбереження. Це може дати вам загальне уявлення про те, як на енергоспоживання пристрою впливає відстань (або перешкоди) від базової станції.

2.4 Результати та порівняння технологій

Давайте об'єднаємо дані з рисунків 6 і 8 в один графік, щоб порівняти вихідну потужність і RSRP на рис.2.11.

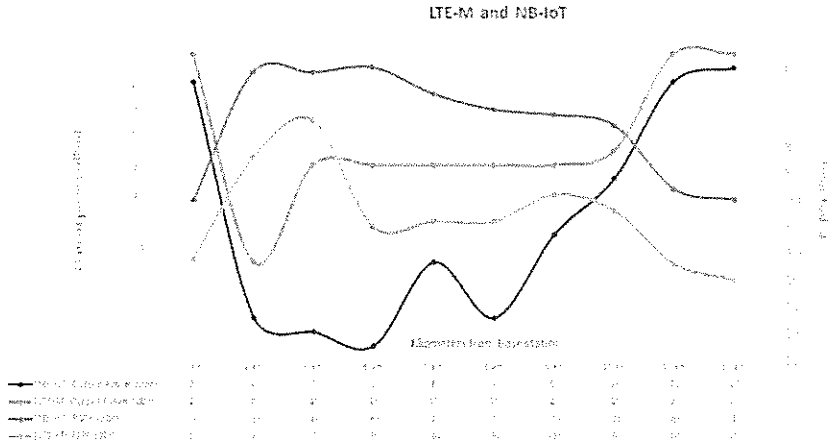


Рис.2.11.Кореляція вихідної потужності та RSRP на LTE-M та NB-IoT

На рис.2.11. видно, що NB-IoT має більший RSRP і меншу вихідну потужність, ніж LTE-M, від 3 км до 12 км. Після цього пристрої LTE-M не могли підключитися до мережі, а пристрої NB-IoT втратили з'єднання з базовою станцією на Bitihorn. Однак пристрої NB-IoT фактично підключилися до іншої базової станції в іншому місці, тож протягом усього шляху від 3 км до 17 км він міг підключитися, але не для вихідної базової станції після 12 км [4].

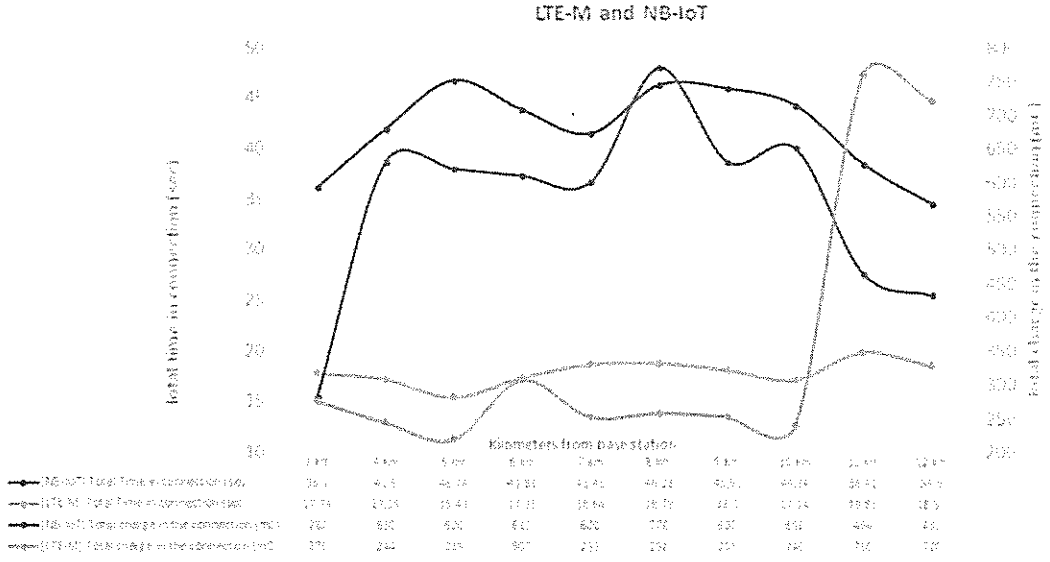


Рис.2.12. Загальний час і загальний заряд, зафіксовані під час підключення в NB-IoT і LTE-M

На рис.2.12. мною порівнюється загальний час підключення та загальний заряд підключення для LTE-M і NB-IoT.

Обговорення. Спеціальні конфігурації мережі. У табл.2.1 представлено різні мережеві конфігурації, призначені для мереж LTE-M і NB-IoT, які UE не може запитати змінити. Зверніть увагу, що таймер бездіяльності RRC на 7 секунд довший для NB-IoT порівняно з LTE-M. Довший таймер — це те, що мережа змушує UE залишатися в режимі RRC Connected як захід безпеки, оскільки мережа не знає, коли було надіслано останній пакет, і в результаті пристрій буде спалювати більше енергії. Однак, якщо мережа підтримує це, цього таймера можна уникнути за допомогою функції Release Assistant Indication (RAI) (команда %RAI AT). RAI використовується для вказівки мережі, що останній пакет було надіслано, і що вона може безпечно вивести UE з режиму підключення RRC. Це не було перевірено під час цього польового тесту через поточну відсутність підтримки з боку мережі.

Інші три значення конфігурації мережі «інтервал cDRX», «тривалість cDRX» і «таймер бездіяльності cDRX» також впливатимуть на загальне енергоспоживання, і ми можемо показати це за допомогою Online Power Profiler для оцінки. Давайте порівняємо, використовуючи мережеві конфігурації в табл.2.1. і вимкніть режим очікування RRC, увімкніть PSM і ввімкніть передачу даних для 300 байт з інтервалом в 1 годину. Ми будемо використовувати той самий мережевий режим «LTE-M» для простоти, змінюючи конфігурацію мережі, щоб побачити прямий вплив. Використовуючи мережеві конфігурації для розділу LTE-M, загальний середній струм дорівнює 30,97 мкА, а використання мережевих конфігурацій NB-IoT призводить до загального середнього струму 18,3 мкА. Це зменшення41% загального середнього струму лише завдяки різним конфігураціям мережі! Це серйозна причина, чому вам потрібно перевірити свою мережу в польових умовах, щоб перевірити, які мережеві конфігурації ви отримуєте в цій зоні, оскільки ці конфігурації не можуть бути змінені UE, і вони матимуть значний вплив на загальне енергоспоживання. Якщо вони погані, ви повинні натиснути на це свого оператора мережі та пояснити, як це впливає на пристрої з низьким енергоспоживанням, що працюють від акумулятора. Ці конфігурації можуть бути довільними, якщо мережа не знає, наскільки це може вплинути на

час автономної роботи обмежених пристроїв. Це потенційно може скоротити роки роботи вашої батареї залежно від вашої програми [19].

Щоб уточнити, рекомендовані мережеві конфігурації для пристроїв із низьким енергоспоживанням: вищий «інтервал cDRX» (до певної точки), нижчий «cDRX on duration» і нижчий «cDRX inactivity timer». Все це детально описано в документі GSMA « Підвищення енергоефективності для мобільного Інтернету речей ».

Відстань і вплив на силу сигналу для LTE-M і NB-IoT. Давайте подивимося на можливу різницю відстані між nRF9160 SiP (UE) і базовою станцією (eNB) за допомогою LTE-M проти NB-IoT. З табл.2.2. для LTE-M і табл.2.3. для NB-IoT ми можемо побачити, що ми маємо надійне з'єднання на відстані від 3 км до 12 км, використовуючи як технологію LTE-M, так і технологію NB-IoT. Той факт, що пристрої LTE-M не могли підключитися, тоді як пристрої NB-IoT могли підключитися, хоча й інші базові станції, можна пояснити меншою пропускною здатністю технології NB-IoT.

Результат на відстані 3 км (найближче до eNB) як для LTE-M, так і для NB-IoT , рис.2.7 та рис 2.9. Це пояснюється невеликою гірською перешкодою, яку видно в червоному колі на рис.2.13, де синє коло це місце, звідки були зроблені наші вимірювання. Це також чітко видно на рис.2.14. (взято з карт Google), де синя піктограма автомобіля вказує на те, де ми проводили вимірювання, а жовте коло — це eNB.



Рис.2.13. Вимірювання на відстані 3 км від eNB



Рис. 2.14. Точка вимірювання (3 км), що показує перешкоду eNB

Стосовно відстані, коли ми досягли 11-12 км на пристрої NB-IoT, ми бачимо на малюнку 8, що потужність сигналу (RSRP) значно зменшується, а вихідна потужність збільшується для компенсації. Це впливає на

енергоспоживання, яке вперше видно у відповідях функції «Оцінка параметрів підключення» (%CONEVAL) у табл.2.3. Ми бачимо, що на 12 км оцінка енергії є «поганими умовами» для NB-IoT, що відповідає «Налаштування підключення може вимагати повторних спроб і більшої кількості повторень для даних», як зазначено в документації . Зауважте, що %CONEVAL більш вигідно використовувати в режимі очікування RRC порівняно з тим, як він використовується в цьому польовому тесті (у RRC Connected) щодо потенційної економії енергоспоживання.

Давайте тепер подивимося, як відстань впливає на силу сигналу та вихідну потужність на nRF9160 DK з використанням технології LTE-M. Ми бачимо схожі очікувані результати на рис.2.7. RSRP є високим на початку та зменшується зі збільшенням відстані від eNB, а також із збільшенням вихідної потужності.

Як для пристроїв LTE-M, так і для пристроїв NB-IoT ми бачимо різке зниження RSRP і збільшення вихідної потужності на 11 км і 12 км на малюнку 10. Це можна пояснити тим фактом, що точки даних беруться після пагорба в краєвид, як показано на рис.2.6.

Порівняння LTE-M і NB-IoT щодо енергоспоживання. По-перше, нам потрібно розглянути табл.2.1. Різниця між LTE-M і NB-IoT і табл. 2.2 Спеціальні мережеві конфігурації для LTE-M і NB-IoT на eNB, які впливають на енергоспоживання на основі порівняння цих мережевих конфігурацій за допомогою Онлайн Power Profiler. Пропускна здатність NB-IoT нижча, що означає, що модем повинен довше залишатися в режимі RRC Connected, щоб виконати той самий обсяг роботи [12].

На рис.2.12 показано порівняння загального часу підключення та загального заряду підключення для пристроїв LTE-M і NB-IoT. Ми бачимо, що пристрій LTE-M має в середньому на 61% коротший загальний час у з'єднанні порівняно з пристроєм NB-IoT, що означає менший проміжок часу використання радіо, що, знову ж таки, має відобразитися на меншому енергоспоживанні, якщо вони використовують однакові конфігурації мережі. Як ми бачили, у цьому випадку

існують відмінності в мережевих конфігураціях, але вони все ще недостатньо великі, щоб мати вплив.

З цього ж рисунку ми бачимо, що на коротких відстанях (від 4 км до 10 км) технологія LTE-M використовує набагато менше заряду під час з'єднання порівняно з пристроєм NB-IoT за такого ж обсягу роботи. Лише в гірших умовах, на відстані 3 км (через гірську перешкоду, рис.2.13) і 11 км і 12 км (через спуск за невеликою вершиною, рис.2.6), NB-IoT використовував менше заряду під час з'єднання порівняно з LTE-M. Знову ж таки, це можна пояснити нижчою пропускною здатністю та вищими властивостями проникнення технології NB-IoT. Це показує, що за звичайних умов використання LTE-M споживатиме в середньому менше енергії, ніж NB-IoT, але якщо у вас є пристрої, розташовані на великій відстані від eNB або з великою кількістю перешкод ,тоді технологія NB-IoT буде кращою. На щастя, використовуючи nRF9160 SiP, ви можете змінити мережеву технологію під час виконання, що означає, що ви можете оптимізувати свою програму для різних випадків використання, коли одна технологія буде більш підходящою, ніж інша. Доречним прикладом цього є оновлення мікропрограми по повітрю (FOTA), де настійно рекомендується використовувати LTE-M через вищу пропускну здатність. Також зауважте, що коли відстань від eNB збільшується, як показано на рис.2.10, до пристрою можуть виникнути проблеми з підключенням до мережі, і пошук мережі може застрягти на тривалий час. Щоб запобігти цьому, ви можете запровадити запобіжний захід у своїй програмі або скористатися іншими функціями, наприклад %MDMEV , які повідомлять вам на ранній стадії, що ви, швидше за все, не знайдете мережу, і що ви можете припинити пошук мережі.

Обмеження висновків. Обмеження полягає в тому, що відсутня можливість з повною точністю порівняти дані вимірювання потужності та дані, отримані безпосередньо з трасування модему, оскільки вони були отримані на двох різних пристроях. Тому викликає занепокоєння те, що пристрої отримували різні параметри мережі або використовували різну кількість часу для пошуку та підключення до мережі. У цьому аналізі ми припустили, що пристрої, які

використовують ту саму мережеву технологію, отримували схожі параметри мережі, а отже, і результати. Це припущення підкріплюється тим фактом, що ми бачимо схожість у поведінці та тенденції впливу на зменшення потужності сигналу зі збільшенням вимірювань енергоспоживання [18].

Іншим обмеженням було те, що не отримано однаково точних параметрів мережі від мережі NB-IoT і мережі LTE-M, але це також показує реальність і важливість тестування пристрою в реальній мережі. Навіть якщо мережі походять від однієї базової станції та від одного оператора, параметри мережі можуть відрізнятися, і це важливо помітити, оскільки це матиме вплив на споживання електроенергії

3 ПЛАНУВАННЯ РЕСУРСІВ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LTE-M

3.1 Постановка задачі

Такі організації зі стандартизації стільникового зв'язку, як 3GPP (партнерський проект третього покоління), активно працюють над наступними етапами стандарту довгострокової еволюції (LTE), щоб підтримувати зв'язок машинного типу (MTC), також відомий як LTE-M. MTC визначає передачу даних між пристроями без допомоги людини, що в основному стосується пристроїв або речей з низькою швидкістю передачі даних і низькою потужністю. Згідно з цим, MTC розглядається як перспективний підхід для поширення платформ зондування Інтернету речей (IoT), які, як правило, включають передачу невеликих даних [1]. Використовуючи переваги інфраструктури LTE-M, очікується, що платформи зондування IoT (IoTSP) охоплять більшу географічну територію з економічно обґрунтованою вартістю, оскільки MTC має тісний зв'язок із пристроями IoT. У рамках цього документу термін платформа зондування IoT еквівалентний терміну система зондування IoT. Як наслідок, IoTSP на основі LTE-M забезпечують віддалену централізовану обробку та зберігання даних,

географічно незалежне групування та логічно досить плоску структуру мережі, де можна підключати вузли зондування LTE-M за допомогою бездротового з'єднання через eNB. На рис.3.1 зображено типову архітектуру платформи визначення IoT на основі LTE-M. На нижньому рівні сенсорні вузли та головки кластеризації портативно зв'язуються з вузлами LTE-M eNodeB через бездротовий інтерфейс.

Використовуючи інфраструктуру LTE-M, вузли зондування спілкуються один з одним і підключаються як до віддалено централізованих серверів, так і до сховища даних, щоб використовувати дані зондування. Варто зазначити, що зв'язок між вузлами зондування та між вузлом зондування та серверами/сховищем встановлюється опосередковано без проблем із розташуванням. Як абстраговано на верхньому рівні, усі сенсорні вузли з'єднані в рамках логічно досить плоского макета, включаючи віддалено централізовані сервери та сховища даних.

Окрім багатьох переваг використання інфраструктури LTE-M для IoTSP, також є значні проблеми, особливо з точки зору енергоефективності. Незважаючи на те, що в стільникових мережах запропоновано велику різноманітність енергоефективних технологій, існує лише обмежена кількість схем для LTE-M. Ці існуючі енергоефективні методи на основі LTE-M можна класифікувати за такими категоріями: керування потужністю [3], планування [5] та скорочення даних [10,15]. Безпосередньо вирішуючи споживання енергії, методи керування потужністю [3, 4] зосереджені на адаптації рівнів потужності передачі до умов каналу, що змінюються в часі.

Ці адаптації можна виконати за допомогою процедури звіту про вимірювання каналу. Для порівняння, підходи до планування [9] перепланують операції на основі часу, які узгоджуються між пристроями та мережею щодо режимів сну/пробудження, періодів відстеження для звіту про положення пристрою та періодів вимірювання каналів для моніторингу навколишнього середовища.

потужністю [3, 4] зосереджені на адаптації рівнів потужності передачі до умов каналу, що змінюються в часі.

Ці адаптації можна виконати за допомогою процедури звіту про вимірювання каналу. Для порівняння, підходи до планування [9] перепланують операції на основі часу, які узгоджуються між пристроями та мережею щодо режимів сну/пробудження, періодів відстеження для звіту про положення пристрою та періодів вимірювання каналів для моніторингу навколишнього середовища.

Ці операції динамічно оптимізуються на основі функцій мобільності пристроїв. Підхід до скорочення даних [15] спрямований на економію енергії шляхом зменшення кількості непотрібних даних і накладних витрат. Агрегація/стиснення даних (тобто коефіцієнт передачі даних) і ефективне кодування/маршрутизація (тобто зменшення накладних витрат) є яскравими прикладами скорочення даних Відповідно до таксономії запропонований нами метод підпадає під підходи до зменшення даних. Що стосується рівня MCS, наша схема розглядає розмір даних передачі як важливий фактор для адаптації до висхідної передачі для зменшення потужності передачі.

Незважаючи на те, що 3GPP вже представив деякі нові розширені режими живлення та більш ефективні методи сигналізації для кращої підтримки MTC безпосередньо через інфраструктуру LTE [17], розмір даних передачі не розглядався в процесі узгодження схеми модуляції та кодування (MCS), що може призвести до втрати електроенергії. Загалом, MCS реалізує якість каналу (наприклад, рівень перешкод, потужність прийому та співвідношення сигнал/перешкода плюс шум). Іншими словами, якщо якість каналу хороша, призначається вищий рівень MCS, або навпаки. Для вищого рівня MCS більший транспортний блок (ТБ) передається в LTE-M [18]. Однак ТБ може бути завеликим для передачі маленької сенсорної інформації, типової для IoTSP. Ця проблема спричиняє значне енергоспоживання на пристроях LTE-M. Таким чином, адаптація розміру даних передачі для процесу узгодження MCS має вирішальне значення.

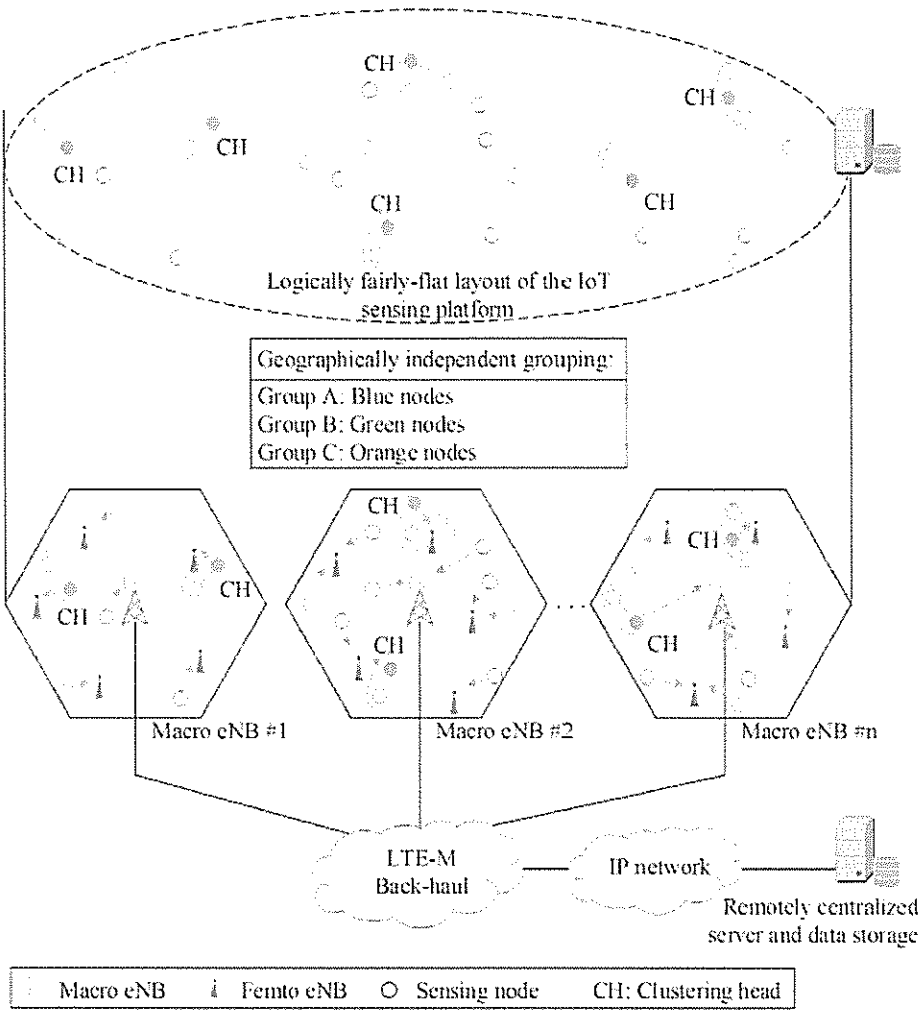


Рис. 3.1. Архітектура платформи IoT-сенсору на основі LTE-M

Завдяки аналізу видно, що споживання енергії можна мінімізувати за допомогою оптимальної пари MCS і кількості первинних блоків ресурсів (#PRB) для кожного заданого розміру даних передачі. По-перше, пропонується механізм адаптивного вибору MCS (AMCS), у якому сенсорний вузол адаптивно оновлює індикатор якості каналу (CQI) і звіт про запас потужності (PHR) у фемто eNB (FeNB) відповідно до розміру даних зондування, щоб щоб отримати оптимальну пару MCS і #PRB. Оптимальні MCS і #PRB визначаються мінімальним рівнем MCS і #PRB, при якому розмір транспортного блоку достатній для пакетування даних зондування в межах мінімальної потужності передачі. Це призводить до оптимальної MCS, яка завжди нижчої якості або дорівнює типовій MCS на основі LTE.

Якщо досягається менш оптимальний MCS, чутливий вузол може працювати при нижчих умовах каналу. Тому ми додатково пропонуємо техніку кількісно-орієнтованого планування ресурсів (QORP), яка використовує ці оптимальні рівні MCS вузлів зондування як критерії для перепланування доступних каналів між сусідніми FeNB замість безпосереднього розгляду перешкод каналу між ними.

Оскільки оптимальна MCS відповідно представляє вимоги чутливого вузла для успішної передачі даних, запропонована схема планування ресурсів краще адаптується до вимог чутливого вузла. Інтенсивний аналіз і оцінка показують, що коефіцієнт повторного використання каналу значно збільшується серед FeNB, що призводить до збільшення #PRB.

Наші внески в цьому документі описані таким чином:

- алгоритм адаптивного вибору MCS (AMCS) переглядає оптимальні значення рівня MCS і #PRB для чутливого вузла, щоб зменшити споживання енергії в каналі висхідної лінії без негативного впливу на вимоги до передачі;

- базуючись на цілеспрямованому розгляді цих оптимальних рівнів MCS, алгоритм кількісно-орієнтованого планування ресурсів (QORP) краще адаптується до вимог сенсорного вузла та досягає вищого коефіцієнта повторного використання каналу серед FeNB;

- крім того, перешкоди, спричинені вузлами зондування, також зменшуються, оскільки потужність передачі висхідної лінії зв'язку зменшується завдяки оптимальному MCS. В результаті покращується якість висхідного каналу та пропорційно збільшується пропускна здатність.

3.2 Огляд робіт присвячений підвищенню енергоефективності систем

По-перше, ми коротко резюмуємо існуючі методи, стандартизовані 3GPP для пристроїв MTC. Починаючи з випуску 12, 3GPP стандартизував розширений режим енергозбереження (PSM), який визначає відповідну процедуру, яка дозволяє підключеним пристроям залишатися зареєстрованими в мережі, щоб

зменшити сигнал, необхідний для пробудження модему. У PSM пристрої можуть вимикати свої трансивери, щоб уникнути споживання енергії під час простою [20]. Максимальний цикл сну, прийнятий у мережах LTE, становить 2,56 секунди, що дуже коротко порівняно з більшістю схем MTC. Щоб усунути цю неефективність, було запроваджено розширений переривчастий прийом (DRX) [21], щоб подовжити цикли сну до кількох хвилин, щоб усунути непотрібні сигнали, а також забезпечити подовжений термін служби батареї для пристроїв. З іншого боку, менш часті оновлення зони відстеження та вимірювання використовуються, щоб зменшити оновлення місцезнаходження та повідомлення про вимірювання каналу на стороні пристрою. На додаток до різноманітності загальних методів управління ресурсами, які використовуються в мережах LTE-A для енергоефективності (наприклад, пом'якшення перешкод між сотами, планувальники PRB або частотне планування) [22], 3GPP визначив канал довільного доступу без підключення (RACH) [23], що дозволяє підключеним пристроям передавати дані через загальний канал для більш ефективного переходу між станами передачі даних і сигналізації.

На основі таксономії, згаданої раніше, гібридний планувальник, запропонований Lauridsen et al. [3] підпадає під підхід керування потужністю, який регулює потужність передачі пристрою шляхом планування PRB висхідної лінії зв'язку як у частотній, так і в часовій областях, щоб визначити, чи буде низька потужність передачі протягом тривалого часу передачі або висока потужність передачі протягом короткого часу. час передачі буде найбільш енергоефективною стратегією. У [4] Yang та ін. запропонував розподілене керування потужністю, яке змінює потужність передачі пристрою, щоб задовольнити рівновагу Байєса Неша, де споживання електроенергії в мережі є мінімальним. Рівновага визначається за допомогою некооперативного аналізу теорії ігор.

Базуючись на планувальнику 3GPP DRX, Balasubramanya et al. запропонований DRX із швидким переходом у режим сну [5], де індикація швидкого переходу в режим сну (QSI) вказує, чи можуть пристрої MTC

переходити в режим передчасного переходу в режим сну, що може статися лише за відсутності дійсної вхідної сторінки з мережі. Використовуючи функцію покращення покриття (CE), QSI, включений у сигнал синхронізації, передається через фізичний широкомовний канал, якщо CE підтримується. В іншому випадку ряд виділених ресурсів на фізичному загальному каналі низхідної лінії зв'язку призначається для доставки QSI.

У [6] енергоефективний графік сну, запропонований Liang et al. балансує вплив між параметрами якості обслуговування (QoS) і конфігураціями DRX, щоб максимізувати періоди сну пристроїв MTC, щоб заощаджувати енергію, одночасно задовольняючи їхні вимоги до QoS щодо швидкості трафіку, затримки пакетів і втрати пакетів швидкість. З іншого боку, Jin et al. запропонував активний механізм DRX [7], який впливає на керування передачею по низхідній лінії зв'язку, коли система переходитиме в сплячий режим лише тоді, коли кадр даних не прийде протягом попередньо визначеного таймера затримки сну. У [8] Wang та ін. запровадив правило перемикання, засноване на тому, що довгий цикл DRX добре підходить для енергоефективної роботи в періоди низької активності пристрою, і навпаки. Таким чином, короткий цикл DRX підходить для низької затримки та пристроїв, які активно передають дані. У [9] Zhou et al. запропоновано ефективний розподіл ресурсів у хмарній мережі радіодоступу між віддаленими радіоголовками для досягнення енергоефективності за допомогою некооперативної моделі теорії ігор.

Використовуючи скорочення даних для цілей енергоефективності, Кім та ін. [10] покращив продуктивність керування потужністю висхідної лінії зв'язку шляхом адаптації звіту про запас потужності щодо можливостей живлення пристрою для досягнення належних #PRB з мережі. Оскільки #PRB ефективно розподіляються, енергія передачі на співвідношення PRB значно збільшується, що призводить до менших витрат на передачу. У роботі [11] Андрєєв та ін. запропонував механізм передачі LTE на основі конкуренції (COBALT), який дозволяє пристроям передавати невеликі пакети даних безпосередньо через фізичний спільний канал висхідної лінії зв'язку (PUSCH) замість того, щоб

витрачати додаткові накладні витрати на сигналізацію на загальних виділених каналах керування LTE (тобто фізичному каналі керування висхідній лінії зв'язку та фізичний канал довільного доступу). Aghili та ін. [12] запропонував пристрій бездротової передачі/приймання (WTRU), який автономно розблоковує з'єднання невеликих даних, доданих до повідомлення площини керування, без будь-яких додаткових сигналів керування з мережі. Використовуючи модель соціального шаблону користувача, Zhang et al. [13] охарактеризував загальну поведінку користувачів, моделі та правила груп користувачів у соціальній манері як параметри оптимізації для підвищення ефективності спектральної енергії. У [14] Huang et al. розглянула топологію підключення для оптимізації енергоспоживання у великому масштабі з акцентом на пристроях IoT. З іншого боку, Arouk et al. запропоновано подальше вдосконалення – розсіювання трафіку для групового пейджингу (FI-TSFGP), яке має на меті покращити продуктивність групового пейджингу, коли кількість пристроїв MTC велика. Цей метод групування значно зменшує затримку доступу до каналу та споживання енергії [15].

Хоча 3GPP Rel. 12 і 13 вже стандартизовано численні методи, щоб задовольнити пристрої IoT, розмір даних передачі не розглядався в процесі узгодження схеми модуляції та кодування (MCS). Враховуючи розмір даних передачі, запропонована нами схема краще адаптується до вимог до вузла зондування IoT. У результаті енергія передачі та кількість призначених PRB для вузлів зондування IoT значно зменшуються. Варто зазначити, що запропоновані алгоритми можуть бути реалізовані з більшістю існуючих методів незалежно від процесів узгодження MCS PHR.

3.3 Дослідження проблем енергоефективності для передачі невеликих даних у IoTSP на основі LTE-M

У мережі LTE-M пристрої передають дані через фізичний спільний канал висхідної лінії зв'язку (PUSCH), використовуючи контроль потужності висхідної

лінії зв'язку (UPC) із потужністю передачі P_{tx}, що відповідає 3GPP стандарт [18] як:

$$P_{tx} = min\begin{cases} P_{max}, \\ 10log_{10}(N) + P_0 + \alpha L + \Delta_{MSC} + \gamma \end{cases} \quad (3.1)$$

де P_{max} — допустима максимальна потужність передачі пристрою, N - миттєва смуга пропускання, виміряна PRBs, призначеними для пристрою, P_0 - бажана отримана потужність на FeNB для належної демодуляції та декодування отриманого сигналу в межах заданої надійності, L — втрати на трасі низхідної лінії зв'язку, оцінені пристроєм, і α є коефіцієнтом компенсації втрат на трасі ($0 \leq \alpha \leq 1$). Частина $P_0 + \alpha L$ утворює розімкнуте керування потужністю. Залишок пов'язаний із керуванням потужністю із замкнутим контуром, включаючи Δ_{MCS} і γ, де Δ_{MCS} є залежним від MCS зсувом потужності, який представляє різницю в потужності між цільовою MCS і основною MCS. Це означає, що якщо пристрій використовує більш високу цільову MCS, ніж базова, значення Δ_{MCS} є позитивним, і відповідна потужність передачі повинна зрости, або навпаки. Нарешті, γ описує команду керування потужністю передачі (TPC), видану FeNB, щоб регулювати потужність передачі висхідної лінії зв'язку.

MCS використовується для адаптації до змінних у часі умов каналу висхідної лінії зв'язку. У 3GPP Rel. 12, використовуються три схеми модуляції, тобто квадратурна фазова маніпуляція (QPSK), 16-квадратурна амплітудна модуляція (QAM) і 64 QAM. Якщо якість каналу дуже хороша, можна використовувати 64 QAM, щоб модулювати 6 біт інформації в 1 символ для передачі. В іншому випадку 16 QAM або QPSK будуть використовуватися для виконання 4 бітів або 2 бітів інформації на символ. Крім того, схеми канального кодування також вибираються на основі умов каналу, щоб гарантувати належну продуктивність демодуляції та декодування прийнятого сигналу на FeNB. FeNB в основному визначає цільове значення MCS, використовуючи CQI, який повідомляється з пристрою. Деталі таблиць відображення $f(\cdot)$ і $g(\cdot)$ від співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR) до CQI та від CQI до MCS, відповідно, були представлені в [24, 25]. Ми узагальнили їх наступним чином:

$$CQI = f(SINR) \tag{3.2}$$

$$MSC = g(CQI) \tag{3.3}$$

Якщо ресурсів висхідної лінії зв'язку, узгоджених між FeNB і пристроєм, недостатньо для передачі необхідної кількості даних, пристрій обчислює свій запас потужності (PH) і повідомляє результат FeNB для запиту більшого #PRBs [21]. PH виводиться з P_{max} шляхом віднімання розрахованої потужності передачі таким чином:

$$PH = P_{max} - (10log_{10}(N) + P_0 + \alpha L + \Delta_{MSC} + \gamma \tag{3.4}$$

У даному розділі я розглянув загальні дані рівня MAC як необхідні дані для передачі. рис.3.2 ілюструє передачу даних від рівня керування доступом до середовища (MAC) до фізичного (PHY) рівня.

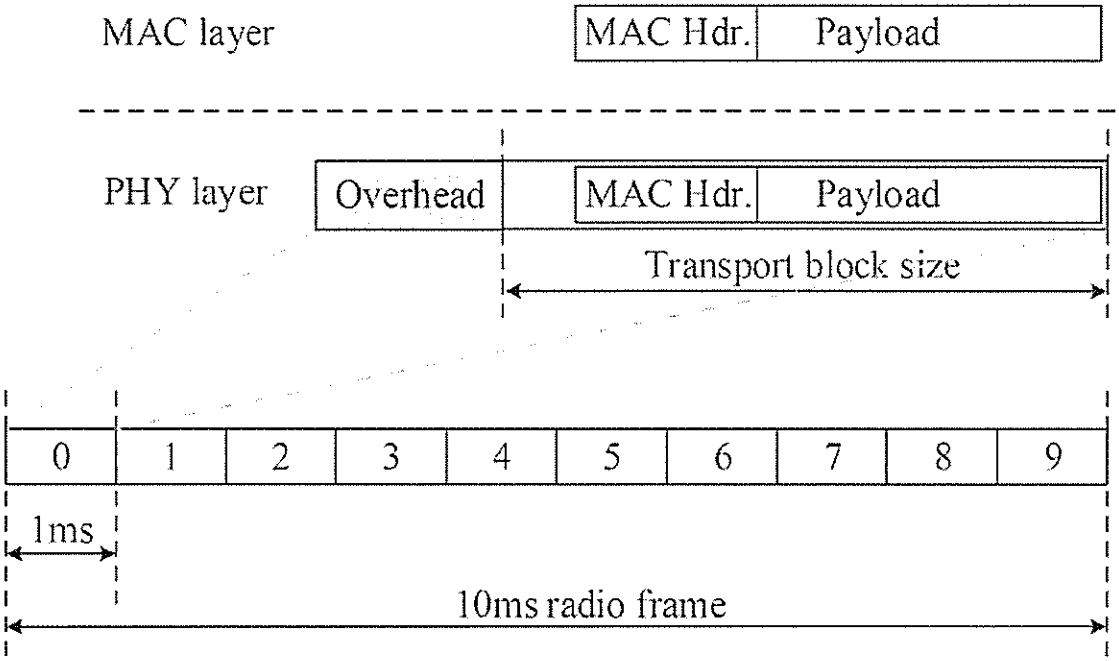


Рис.3.2. Зв'язок між необхідними даними передачі та розміром транспортного блок

Необхідні дані передачі модулюються та кодуються у фізичний ТВ протягом кожної 1 мс. Розмір транспортного блоку (TBS) залежить від обраних MCS і #PRB [6].

Вищезазначений механізм розподілу ресурсів підходить для звичайних пристроїв LTE, які передають величезний обсяг даних на високій швидкості. Однак механізм за замовчуванням може бути неоптимальним для вузлів зондування, які потребують невеликих передачі даних і операцій з низьким енергоспоживанням.

Наприклад, дані прикладного рівня детектора диму містять лише один біт двійкової інформації, яка вказує, чи виявлено дим. Ця інформація пакетується з додатковим заголовком і трейлером від прикладного рівня до фізичного рівня, що призводить до 280-бітного кадру MAC [26]. Якщо призначити найвищий доступний рівень MCSĐ28 і 1 PRB (тобто TBS дорівнює 712 біт, див. таблицю 1), 280-бітний кадр MAC займає лише 39,33% призначеного 712-бітного ТБ, спричиняючи 60,67% накладних витрат, за винятком заголовка і надлишковість кодування каналів.

Табл.3.1 показує, що використання нижчої потужності передачі в результаті рівня 16 MCS і 1 PRB (тобто TBS, що дорівнює 280 бітам), є найкращим вибором для цієї передачі даних, де кадр MAC займає 100% призначеного ТВ. Оскільки в цьому випадку використовується нижчий MCS, чутливий вузол споживає менше енергії (1).

Без втрати загальності з точки зору енергоефективності, оптимальні MCS і #PRBs (позначені MCS^* і N^* відповідно) для чутливих вузлів можна виразити таким чином:

$$(MSC^*, N^*) = argmin(10log_{10}(N)) + \Delta_{MSC} \tag{3.5}$$

За умови

$$\begin{cases} TBS(MSC^*, N^*) \geq D \\ MSC^* \leq MSC^c \end{cases} \tag{3.6}$$

де D і MCS^c позначають дані передачі в бітах і поточний рівень MCS відповідно.

Наприклад, якщо припустити, що D і MCS^c становлять 100 байтів (тобто 800 бітів) і 22 відповідно, TBS-кандидати повинні бути більшими або дорівнювати 800, як зазначено в табл.3.1.

Через обмеження $MCS^* \leq MCS^c$ червоні позначені числа ігноруються, в результаті чого застосовуються лише жовті та блакитні позначені. Серед решти позначених кольором чисел оптимальна пара (MCS^*, N^*) виходить із тієї, яка споживає мінімальну потужність передачі $10\log_{10}(N) + \Delta_{MCS}$, тобто ($MCS^*$, N^*) = (21, 2), що відповідає 840-бітному TBS (позначено блакитним). Як результат, рис. 3 представляє оптимальний (MCS^*, N^*) залежно від змінного розміру даних D із поточним рівнем MCS 22. Спостерігається, що кількість PRB_s (N^*) збільшується пропорційно розміру даних D, тоді як оптимальний MCS^* змінюється залежно від D і N^*.

Таблиця 3.1.

Зразок розміру транспортного блоку в бітах, визначений у 3GPP TS 36.213 [18].

MCS	TBS Index	#PRB						
		1	2	3	4	5	6	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…
7	7	104	224	328	472	584	712	…
8	8	120	256	392	536	680	808	…
9	9	136	256	456	616	776	936	…
10	9	136	296	456	616	776	936	…
11	10	144	296	504	680	872	1032	…
12	11	176	328	584	776	1000	1192	…
13	12	208	376	680	904	1128	1352	…
14	13	224	440	744	1000	1256	1544	…
15	14	256	552	840	1128	1416	1736	…
16	15	280	600	904	1224	1544	1800	…
17	15	280	600	904	1224	1544	1800	…
18	16	328	632	968	1288	1608	1928	…
19	17	336	696	1064	1416	1800	2152	…
20	18	376	776	1160	1544	1992	2344	…
21	19	408	840	1288	1736	2152	2600	…
22	20	440	904	1384	1864	2344	2792	…
23	21	488	1000	1480	1992	2472	2984	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…
27	25	616	1256	1864	2536	3112	3752	…
28	26	712	1480	2216	2984	3752	4392	…

Як правило, споживана потужність E, яка використовується для передачі даних, визначається за формулою:

$$E = P_{tx} \times T \tag{3.7}$$

де T — тривалість часу в секундах для передачі даних, а P_{tx} — потужність передачі (рівняння 1). З рівнянь 1 і 5 енергія E виводиться як:

$$E = 10^{\frac{P_{tx}(MSC^*,N^*)}{10}} \times T \tag{3.8}$$

Отже, енергоефективність (χ), яка показує, скільки енергії E споживається для успішної передачі заданого розміру даних D, визначається як:

$$x = \frac{D}{E} \tag{3.9}$$

У наступному підрозділі пропонується відповідне рішення для отримання оптимального (MCS^*, N^*) і його використання для кращої енергоефективності χ в $IoTSP_s$ на основі LTE M.

3.4 Огляд досліджуваних алгоритмів підвищення ефективності систем

Адаптивний алгоритм вибору MCS-PHR. У підрозділі 3.3 досліджувалось, як рівень MCS, який FeNB призначає чутливому вузлу на основі CQI, не завжди є оптимальним для передачі невеликих даних. Тому мною було досліджено оптимальну пару рівня MCS і #PRB (MCS^*, N^*), щоб мінімізувати споживання енергії для даних спосіб передавання. У цьому розділі представлено адаптивний алгоритм вибору MCS (AMCS), щоб використовувати доступні вільні ресурси FeNB для задоволення оптимальної пари (MCS, N) алгоритм 1 рис.3.4.

Коли сенсорний вузол має дані для передачі, вузол обчислює власне оптимальне значення (MCS^*, N^*). Якщо MCS дорівнює поточному MCS^c (тобто поточний MCS^c є оптимальним), пристрою не потрібно змінювати це значення. Згодом чутливому вузлу потрібні N PRB для успішної передачі даних D.

```
Algorithm 1: Adaptive MCS-PHR selection.
1 D ← the required transmission data;
2 MCS^c, N^c ← the current MCS and #PRBs;
3 MCS*, N* ← the optimal MCS and #PRBs;
4 foreach MCS renegotiation do
5   if has D bits data to transmit then
6     Find (MCS*, N*) by Eq 5;
7     if MCS* = MCS^c then                                  /*Current MCS is optimal*/
8       if N* = N^c then                                    /* Current #PRBs are enough*/
9         Modulate and encode the data D into the TBS;
10      else                                                /* Current #PRBs are not enough*/
11        Calculate PH by Eq 4;
12        Send PHR to the FeNB;
13        Modulate and encode the data D into the TBS;
14      end
15    else                                                  /* Current MCS is not optimal*/
16      Send CQI update to the FeNB;
17      Calculate PH by Eq 4;
18      Send PHR to the FeNB;
19      Receive N^a from the FeNB;
20      Modulate and encode the data D into the TBS;
21      if N^a < N* then                                    /* The FeNB has insufficient #PRBs*/
22        Return to LTE-M based MCS selection;
23        Set the timer to τms;                             /* Stop the algorithm in τms*/
24      end
25    end
26  end
27 end
```

Рис.3.4. Алгоритм 1 адаптивний алгоритм вибору MCS

Якщо поточна кількість PRB N^c дорівнює N^* (тобто #PRB є достатньо великим), чутливий вузол модулює та кодує дані D у TBS. В іншому випадку чутливий вузол повинен обчислити свій запас потужності PH і повідомити FeNB, щоб запросити більше #PRB.

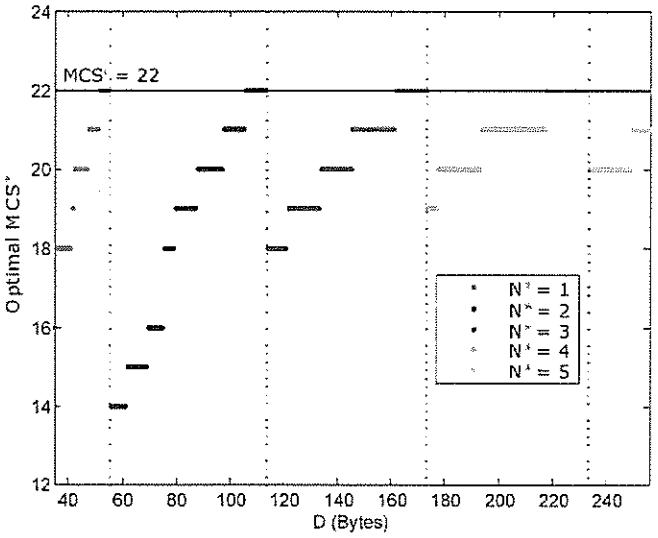


Рис. 3.3. Досяжна оптимальна пара (MCS*, N*), обмежена MCSc 22.

Якщо поточний MCS^c не дорівнює MCS^*, то чутливий вузол надсилає повідомлення CQI-оновлення до FeNB для повторного узгодження оптимального MCS^*. Після отримання відповідного MCS^* чутливий вузол продовжує надсилати повідомлення звіту PHR, щоб попросити FeNB запитати #PRBs N. На основі звіту PHR FeNB виділить #PRB до вузла визначення, якщо доступні вільні ресурси. Однак, якщо доступних ресурсів недостатньо для призначення вузлу зондування відповідно до вимог (позначте Na як призначені #PRB), вузол зондування повинен повернутися до загальної процедури вибору MCS на основі LTE-M для успішної передачі даних у наступний інтервал часу передачі (TTI) 1 мс. Запропонований алгоритм AMCS призупиняється на τ мс для передачі всіх буферизованих даних у межах загального MCS на основі LTE-M.

Алгоритм кількісно-орієнтованого планування ресурсів. Згідно з алгоритмом AMCS, перешкоди, спричинені вузлами зондування, також зменшуються, оскільки потужність передачі висхідної лінії зв'язку зменшується в результаті отримання оптимального MCS.

З точки зору прийняття рішень щодо планування ресурсів, якщо підканал здатний підтримувати заданий рівень MCS для чутливих вузлів (тобто відображений SINR), ми можемо припустити, що підканал достатньо чіткий, і, отже, перешкоди на підканалі не значні.

Таким чином, цей підканал може бути одночасно призначений сусіднім FeNB. Використовуючи переваги оптимальних рівнів MCS, ми запропонували алгоритм кількісно-орієнтованого планування ресурсів (QORP), який краще адаптується до вимог сенсорного вузла та досягає вищого коефіцієнта повторного використання каналу серед FeNBs. Визначимо заданий рівень MCS як поріг MCS, позначений MCS_{thres} наступним чином:

$$MSC_{thres} = \left[\frac{1}{N_s}\sum_{i=1}^{N_s} MSC_i^* + \delta\right] \tag{3.10}$$

де N_s — загальна кількість чутливих вузлів, які обслуговуються FeNBs, а δ — поправочний коефіцієнт.

У цій статті ми припускаємо, що 5G HetNets використовують типове оптимальне часткове повторне використання частоти (OFFR) для планування ресурсів MeNB [27]. Метою OFFR є оптимізація загальної пропускної здатності мережі. Серед FeNB передбачається, що взаємозв'язок між кожною парою з двох FeNB створює значні перешкоди, якщо середнє значення MCS чутливих вузлів у зоні покриття двох FeNB є меншим за порогове значення MCS_{thres}. Відповідний стан описується так:

$$\frac{1}{N_s}\sum_{i=1}^{N_s} MSC_i \leq MSC_{thres} \tag{3.11}$$

Щоб спланувати розподіл ресурсів для FeNB, ми спочатку перетворюємо позиції FeNB у модель графа, де кожен FeNB є вершиною. Виходячи з рівняння 11, якщо інтерференція між двома сусідніми FeNB є значною, ми використовуємо неорієнтоване ребро для з'єднання двох відповідних вершин. Для кожного підканалу використовується метод максимального незалежного набору (MIS) [28] для ідентифікації максимального набору FeNB, де FeNB не заважає. Пропонований метод кількісно-орієнтованого планування ресурсів (QORP) описаний в Алгоритмі 2 наступним чином:

- Крок 1. Система FeNB перетворюється на неорієнтований граф G(V, E), де V - набір FeNB, а E - набір інтерференційних країв, визначених (3.11).

- Крок 2. Для кожного підканалу s2S (S є множиною всіх підканалів) ми малюємо відповідний граф $G_s(V_s, E_s)$, який містить усі FeNB, які, можливо, призначені підканалу s.

- Крок 3. Метод MIS застосовується до графіка Gs(Vs, Es) для ідентифікації максимального набору незалежних FeNB на підканалі s.

- Крок 4. Алгоритм повторюється з Крок 2 для всіх підканалів у наборі S. Кінцевим результатом є матриця суміжності оптимальних підканалів S і FeNB V.

Наприклад, розглянемо систему 10-FeNB і набір із 4 можливих підканалів {A, B, C, D}, як показано на рис. 4A. Система FeNB перетворюється на модель неорієнтованого графа, де вершини представляють FeNB, а ребра представляють інтерференцію між двома відповідними FeNB. У матриці суміжності FS,V

можливих призначень підканалів для FeNB стовпці представляють 10 FeNB з іменами від 1 до 10, а рядки представляють 4 підканали з іменами A, B, C і D. Записи мають значення 1, якщо відповідний FeNB (індексований назвою стовпця) можливо присвоєно відповідному підканалу (індексований назвою рядка); інакше записи мають значення 0.

На рис. 3.5*B* та з огляду на підканал A запропонований алгоритм QORP показує, що набір незалежних вершин {2, 4, 7, 8} є максимальним незалежним набором графа GA(VA,EA); отже, підканал A повинен бути одночасно призначений для FeNB 2, 4, 7 і 8 без перешкод.

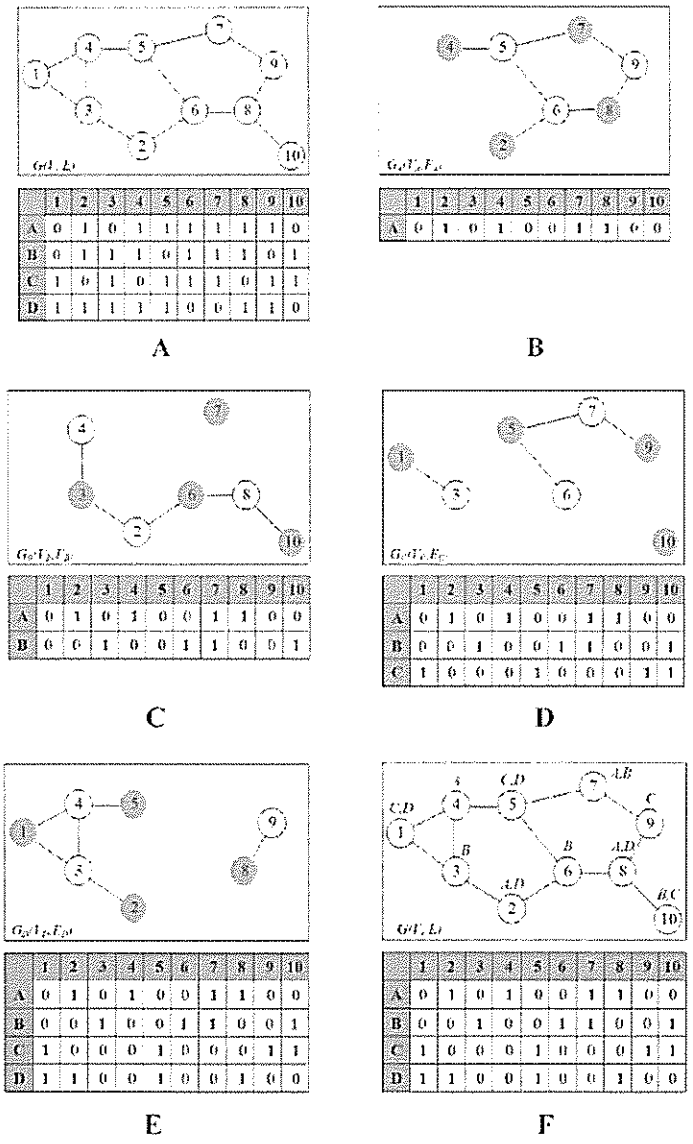


Рис. 3.5. Приклад кількісно-орієнтованого алгоритму планування ресурсів

```
Input: A set of FeNBs' position V, a set of all sub-channels C, and an adja-
cency matrix Φ_{C,V} resulting from OFFR.
Output: An adjacency matrix Ψ_{C,V} represents the optimal assigned sub-
channels to FeNBs.
1 Initialize a graph G(V, E);
2 foreach a pair of V_i and V_j; i ≠ j; 1 ≤ i, j ≤ N_v do      /* Calculate graph model
                                                                G(V, E)) */
3   if the E_{i,j} == TRUE then
4     E_{i,j} = 1;
5   else
6     E_{i,j} = 0;
7   end
8 end
9 Initialize Ψ_{C,V};
10 foreach s ∈ C do                          /* Calculate the adjacency matrix Ψ_{C,V} */
11   foreach v ∈ V do                                          */ Calculate G_s(V_s, E_s) */
12     if Φ[s][v] == 1 then
13       G_s(v, E_s) = G(V, E);
14     else
15       G_s(v, E_s) = (0, 0);
16     end
17   end
18   Apply MIS algorithm for G_s(V_s, E_s);
19   Append the output to Ψ_{C,V}
20 end
```

Рис.3.6. Алгоритм 2. Планування ресурсів, орієнтоване на кількість.

Виконуючи ті самі процеси для підканалів B, C і D, ми отримуємо відповідні результати на рис.3.5*C*, рис.3.5*D* і рис.3.5*E* відповідно. На рис. 3.5*F* показано остаточну матрицю суміжності CS,V оптимального призначення підканалу для графіка G(V, E).

3.5 Оцінка ефективності та результати моделювання

Налаштування моделювання. Мною було досліджено мережу моделювання, що включає 5 добре спланованих MeNB без значних перешкод між клітинками. Кількість FeNB на MeNB випадковим чином розгортається в діапазоні [20, 300], щоб визначити вплив щільності FeNB на ефективність запропонованого алгоритму.

У табл. 3.2 наведено детальні параметри, які використовуються для оцінки продуктивності мережі. Значення параметрів відповідають стандартам 3GPP TS25.104 і TR36.814 [30, 31]. Коефіцієнти підсилення каналу для висхідної та низхідної лінії зв'язку включені в потужність передачі та чутливість приймача

відповідно. Набір числових вхідних даних надається в розділі Допоміжної інформації, Набір даних S1.

Процеси моделювання включають такі послідовні кроки:

- Крок 1: щоб проаналізувати численні сценарії, ми розгорнули різну кількість FeNB у кількості {20, 40, 60, . . ., 300}, що відповідає кожному сценарію, оскільки щільність FeNB значно впливає на якість бездротового каналу, що керує процесами узгодження MCS.

- Крок 2: у кожному мережевому сценарії, наданому на Кроці 1, розмір пакета даних (D), виданого сенсорними вузлами, було налаштовано відповідно до розмірів пакетів {35, 55, 75, . . ., 215, 235, 256}.

Разом із загальними параметрами моделювання, наведеними в таблиці 2, вибіркова кількість FeNB і розміри пакетів даних утворюють різноманітні тематичні дослідження мереж.

- Крок 3: Запропонований алгоритм QORP порівнюється з (i) схемою OFFR [27] та (ii) схемою розподілу когнітивного спектру на основі забарвлення графіка (GC-CSA) [32] з точки зору енергетичної ефективності зондування. вузлів і середню кількість блоків ресурсів, призначених кожному вузлу зондування. Результати зібрані на основі всіх прикладів.

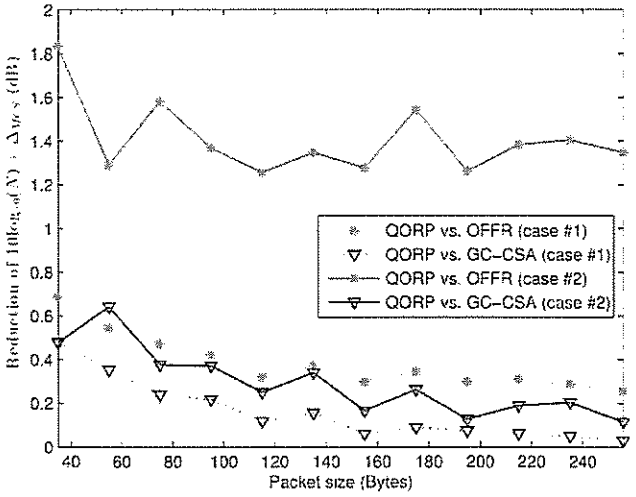


Рис.3.7. меншення $10\log_{10}(N) + \Delta_{MCS}$ потужності передачі висхідної лінії зв'язку. Кількість FeNB у випадках №1 і №2 становить 50 і 300 відповідно

Таблиця 3.2.

Параметри моделювання

Параметри	MeNB	FeNB
Кількість комірок	5	20-300 per MeNB (N_t)
Transmit power	43 dBm на первинних каналах 46 dBm на вторинних каналах	15 dBm
Чутливість приймача	-121 dBm	-107 dBm
Модель втрати шляху	3GPP outdoor: $L=15,3+37,6\log_{10}(R)(db)$	3GPP indoor: $L=38,46+20\log_{10}(R)+L_{wall}(db)$
Пропускна здатність	20MHz	
Частота	200 MHz	
P_{max}	23 dBm	
α	0.9	
y	0	
Чутливість приймача вузла зондування	-100 dBm	
Розмір пакета даних (D)	35-256 Bytes	

Результати моделювання. На рис.3.7. показано частину зменшення $10\log_{10}(N) + \Delta_{MCS}$ потужності передачі висхідної лінії зв'язку відповідно до розміру пакета. Тенденція лінійних графіків показує, що запропонований нами алгоритм забезпечує кращу продуктивність, коли розмір пакета малий. Для малих розмірів пакетів мінімальний індекс MCS, необхідний для успішної передачі пакету, також малий, а ΔMCS вище; це через зменшення від призначеного індексу MCS до необхідного індексу MCS* (тобто оптимального значенняMCS).

У випадку №1 кількість FeNB становить 50 на макрокомірку, що створює низькі перешкоди між комірками, але також знижує потужність приймача через велику відстань від чутливих вузлів до пов'язаних з ними FeNBs. Це призводить до гіршого SINR і низького MCS, що призводить до низького ΔMCS. З іншого боку, у випадку №2 щільність FeNB є високою (кількість FeNBs становить 300 на макрокомірку), що спричиняє вищі перешкоди між клітинами. Оскільки алгоритм

GC-GSA та запропонований нами алгоритм пом'якшують більшість перешкод, вони забезпечують кращі SINR та MCS, однак запропонований нами алгоритм досягає кращого ΔMCS з точки зору енергоефективності. Статистичні показники зведені в табл.3.3.

Таблиця 3.3.

Статистичний індекс частки зниження 10log10(N) + ΔMCS у потужності передачі висхідної лінії зв'язку

Індекс	QORP vs. OFFR (50FeNBs)	QORP vs. GC-CSA (50 FeNBs)	QORP vs. OFFR (300 FeNBs)	QORP vs. GC-CSA (300 FeNBs)
Максимальне зменшення (dB)	0,685	0,481	1,833	0,642
Мінімальне скорочення (dB)	0,255	0,028	1,255	0,115
Середній (db)	0,384	0,161	1,408	0,293

Коли розмір пакета збільшується, скорочувальна частина $10\log_{10}(N) + \Delta_{MCS}$ зменшується. Крім того, енергетична ефективність χ збільшується завдяки високій продуктивності модуляції та кодування рис.3.8. Коли кількість FeNB збільшується з 50 до 300, міжстільникові перешкоди в алгоритмі OFFR значно зростають, що призводить до зниження енергоефективності.

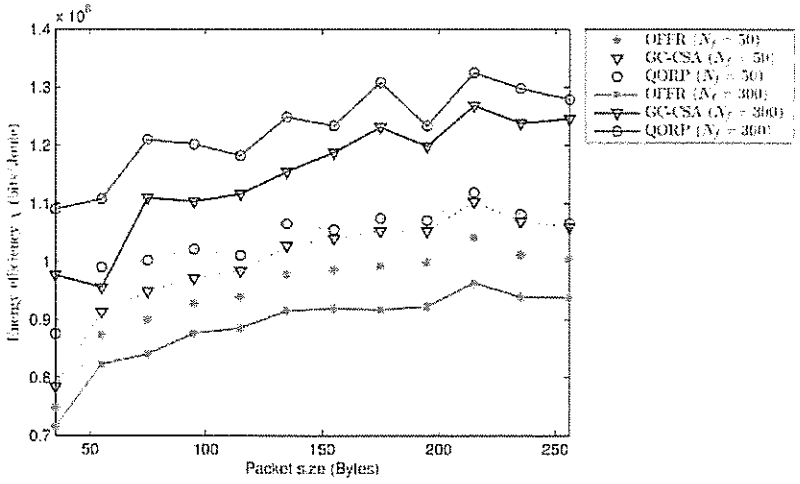


Рис. 3.8. Залежність енергоефективності від розміру пакету

. Однак алгоритм GC-CSA та запропонований нами алгоритм пом'якшують більшість перешкод, забезпечуючи таким чином кращу продуктивність. Результати показують, що наш алгоритм QORP має найкращу енергоефективність, χ_{QORP} = 1,13 × 108 біт/Джоуль (тобто середнє значення), порівняно з χ_{GC-CSA} = 1,07 × 108 біт/Джоуль і χ_{OFFR} = 0,92 × 108 біт/Джоуль . Покращення, досягнуте завдяки використанню алгоритму QORP порівняно з алгоритмами GC-GSA та OFFR, становить 5,27% та 23,09% відповідно.

На рис.3.9. показано взаємозв'язок між енергоефективністю та кількістю FeNB (тобто, він представляє різні умови навколишнього середовища, такі як різна кількість і положення FeNB, що призводить до різних значень для потужності приймача та SINR у чутливих вузлах) . По-перше, продуктивність OFFR підвищується, коли кількість FeNB збільшується завдяки низькій міжстільниковій інтерференції, і вона досягає найкращої продуктивності, коли кількість FeNB становить близько 120. Якщо кількість FeNB перевищує 120, продуктивність знижується. оскільки високі перешкоди між комірками негативно впливають на якість каналу. Алгоритми GC-CSA та QORP забезпечують кращу енергоефективність, коли кількість FeNB велика, оскільки вони пом'якшують більшість компонентів перешкод.

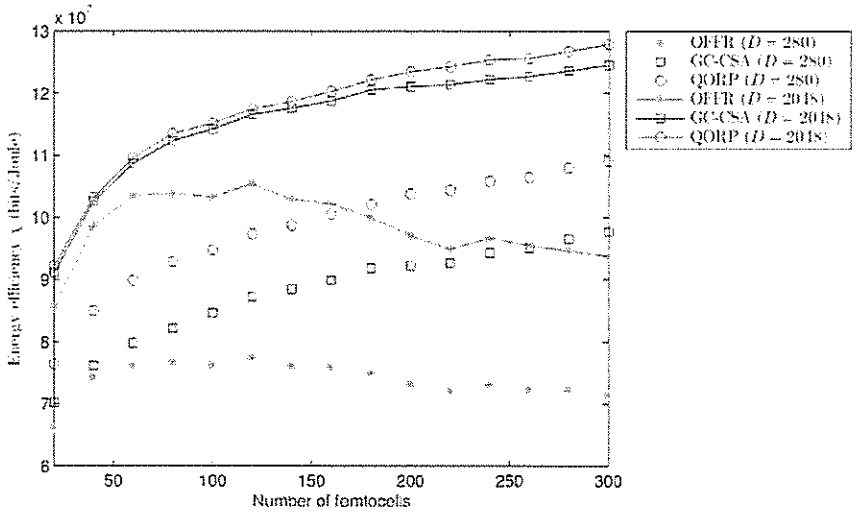


Рис.3.9. Залежність енергоефективності від кількості FeNB

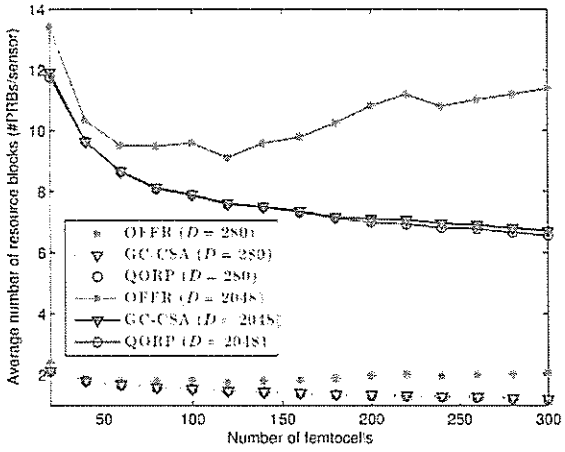


Рис.3.10. Розподіл блоків ресурсів залежить від кількості FeNB

Таблиця 3.4.

Середня кількість призначених блоків ресурсів для кожного вузла зондування

Розмір пакета (Байти)	OFFR (PRBs/ sensing node)	GC-CSA (PRBS/ sensing node)	QORP (PRBS/ sensing node)
35	1.937	1.481	1.457
256	10.496	7.823	7.745

Як представлено в рівнянні 11, критерії для визначення інтерференції між FeNB адаптуються до оптимальної якості каналу, необхідної для існуючих вузлів зондування в мережі. Таким чином, алгоритм QORP забезпечує кращу енергоефективність для сенсорних вузлів без будь-якого збільшення кількості призначених блоків ресурсів для передачі даних. На рис.3.10. показано, що кількість призначених блоків ресурсів зменшується, коли кількість FeNB збільшується. QORP зменшує кількість призначених блоків ресурсів на 25,98% порівняно з алгоритмом OFFR. Цей результат навіть кращий, ніж продуктивність GC-CSA, оскільки QORP також зменшує перешкоди висхідній лінії зв'язку, коли сенсорні вузли зменшують свою потужність передачі. Результати чисельного моделювання підсумовані в табл. 3.4. На рис.3.11 представлено співвідношення між середньою кількістю призначених блоків ресурсів і розміром пакета. Результати показують ефективність алгоритму QORP порівняно з алгоритмом OFFR, яка збільшується з 9,69% до 42,45% при збільшенні розміру пакета від 35

байт до 256 байт. Алгоритм QORP досягає кращої продуктивності з великими розмірами пакетів з точки зору призначення необхідних блоків ресурсів для кожного чутливого вузла.

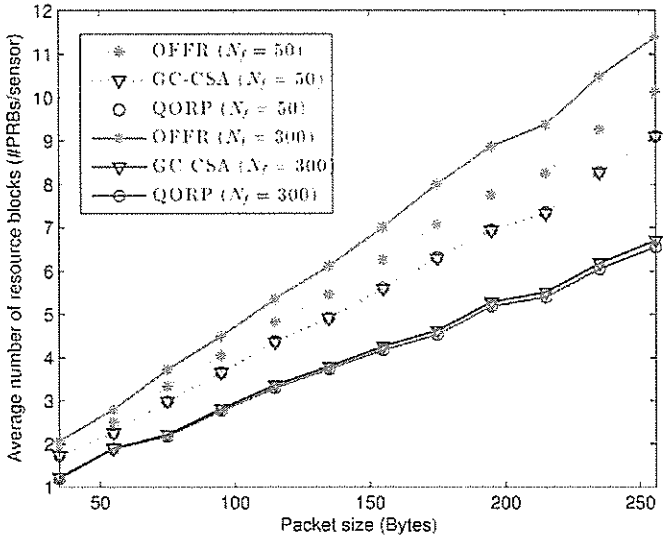


Рис.3.11. Розподіл блоків ресурсів залежить від розміру пакета

ВИСНОВКИ

Будучи важливою частиною тенденцій IoTization, технології бездротового датчика були задіяні в багатьох сферах людського життя. У розвитку стільникових мереж розширені мережі LTE-M/NB-IOT, забезпечують перспективну інфраструктуру для поширення платформи визначення Інтернету речей. Вибір між новими технологіями мобільного зв'язку, LTE-M і NB-IoT, вимагає розуміння ключових відмінностей між ними. Таким чином виконуючи перше поставлене завдання, мною було виконано аналіз сучасного стану та перспектив розвитку енергоефективних технологій зв'язку

У другому розділі виконано тестування енергоефективності технологій NB-IoT LTE-M. Даний тест демонструє, що коли відстань від eNB збільшується, потужність сигналу зменшується, а вихідна потужність збільшується для обох технологій. Видно, як перешкоди та перепади висоти в ландшафті можуть впливати на ті самі параметри. Проаналізовано переваги використання функції « Оцінка енергії» , яка дала приблизну оцінку стану мережі перед надсиланням будь-яких даних. Це корисний інструмент для будь-якої програми з низьким енергоспоживанням, завдяки чому є можливість перевірити мережеве середовище перед його використанням.

Іншим висновком даного дослідження є різниця в енергоспоживанні між двома технологіями. У звичайних умовах LTE-M споживатиме менше енергії, але коли пристрій у поганому стані до певного моменту, NB-IoT виглядає, можливо, кращим варіантом для надсилання менших обсягів даних. Тож може бути приємне місце, де NB-IoT буде більш вигідним для використання щодо умов мережі.

Аналіз показав, що NB-IoT має кращий радіус дії, ніж LTE-M, оскільки пристрої NB-IoT підключаються до інших базових станцій через 12 км, хоча RSRP і вихідна потужність для цих з'єднань були досить низькими та високими відповідно. З цих результатів видно, що в більшості випадків найкраще

використовувати LTE-M, якщо ви зосереджені на вищій пропускній здатності та низькому споживанні.

Зосереджуючись на завданні, у третьому розділі магістерської роботи, мною було досліджено та застосовано алгоритм адаптивної модуляції та вибору кодування (AMCS) для вирішення проблеми споживання енергії в платформі визначення IOT на основі LTE-M. Запропонований алгоритм визначає оптимальну пару MCS і кількість первинних блоків ресурсів (#PRB), при яких розмір транспортного блоку достатній для пакетування даних в межах мінімальної потужності передачі. Крім того, була запропонована техніка кількісно орієнтованого планування ресурсів (QORP), яка використовує ці оптимальні рівні MCS як основні критерії розподілу спектру для кращої адаптації до вимог чутливого вузла. Результати моделювання показують, що запропонований підхід значно знижує енергоспоживання вузлів IoT і #PRB до 23,09% і 25,98% відповідно.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lee CG, Dao NN, Jang S, Kim D, Kim Y, Cho S. Gyro Drift Correction for An Indirect Kalman Filter Based Sensor Fusion Driver. Sensors. 2016 Jun 11; 16(6):864. https://doi.org/10.3390/s16060864

2. Na W, Dao NN, Cho S. Reliable multicasting service for densely deployed military sensor networks. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015.

3. Lauridsen M, Jensen AR, Mogensen P. Reducing LTE uplink transmission energy by allocating resources. In IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 Sep 5 (pp. 1±5).

4. Yang G, Guan X. A Non-cooperative Game Theoretic Approach to Energy-efficient Power Control in Wireless Sensor Networks. International Journal of Future Generation Communication and Networking. 2014; 7(1):169±180. https://doi.org/10.14257/ijfgcn.2014.7.1.17

5. Balasubramanya NM, Lampe L, Vos G, Bennett S. DRX With Quick Sleeping: A Novel Mechanism for Energy-Efficient IoT Using LTE/LTE-A. IEEE Internet of Things Journal. 2016 Jun; 3:398±407. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2527022

7. Liang JM, Chen JJ, Cheng HH, Tseng YC. An energy-efficient sleep scheduling with QoS consideration in 3GPP LTE-advanced networks for internet of things. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. 2013 Mar; 3(1):13±22. https://doi.org/10.1109/JETCAS.2013.2243631

6. Jin S, Yue W, Meng C, Saffer Z. A novel active DRX mechanism in LTE technology and its performance evaluation. Journal of industrial and management optimization. 2015 Jul 1; 11(3):849±866. https://doi. org/10.3934/jimo.2015.11.849

7. Ericsson, R1-1907399, "IMT-2020 self evaluation: mMTC non-full buffer connection density for LTE-MTC and NB-IoT," 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #97, Reno, USA, May 2019.

8. Wang HC, Tseng CC, Chen GY, Kuo FC, Ting KC. Power saving by LTE DRX mechanism using a mixture of short and long cycles. In IEEE TENCON Region 10 Conference (31194) 2013 Oct 22

9. Zhou Z, Dong M, Ota K, Wang G, Yang LT. Energy-efficient resource allocation for D2D communicationsunderlaying cloud-RAN-based LTE-A networks. IEEE Internet of Things Journal. 2016 Jun;3

10. Kim W, Kaleem Z, Chang K. Power headroom report-based uplink power control in 3GPP LTE-A Het- Net. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2015 Dec; 2015

11. Andreev S, Larmo A, Gerasimenko M, Petrov V, Galinina O, Tirronen T, el al. Efficient small data access for machine-type communications in LTE. In IEEE International Conference on Communications(ICC), 2018 Jun 9

12. Aghili B, Murray JM, Gauvreau JL, Pinheiro AL, Pani D, Cai L, et al., inventors; Interdigital Patent Holdings, Inc., assignee. Efficient signaling for machine type communication. United States patent application US 13/636,508. 2019 Mar 23.

13. Zhang X, Zhang Y, Yu R, Wang W, Guizani M. Enhancing spectral-energy efficiency forLTE-advanced heterogeneous networks: a users social pattern perspective. IEEE Wireless Communications. 2019

14. Huang J, Duan Q, Xing CC, Wang H. Topology Control for Building a Large-Scale and Energy-Efficient Internet of Things. IEEE Wireless Communications. 2017 Feb; 24

15. Arouk O, Ksentini A, Taleb T. Group paging-based energy saving for massive MTC accesses in LTE and beyond networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016

16. Holma H, Toskala A, Reunanen J. LTE Small Cell Optimization: 3GPP Evolution to Release 13. John Wiley & Sons; 2016 Jan 19.

17. Saxena V, Wallen A, Tirronen T, Razaghi HS, Bergman J, Blankenship Y. On the Achievable Coverage and Uplink Capacity of Machine-Type Communications (MTC) in LTE Release 13. In IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2016 Sep 18 (pp. 1±6).

18. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 13). 3GPP TS 36.213 Technical specification v13.0.0. 2015.

19. Study on provision of low-cost machine-type communication (MTC) user equipments (UEs) based on LTE (Release 12). 3GPP TR 36.888 Technical report v12.0.0. 2018.

20. Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications (Release 13). 3GPP TS 23.682 Technical specification v13.4.0. 2019.

21. Bontu CS, Illidge E. DRX mechanism for power saving in LTE. IEEE Communications Magazine. 2019 Jun

22. Rao JB, Fapojuwo AO. A survey of energy efficient resource management techniques for multicell cellular networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020 Feb

23. H. Malik, H. Pervaiz, M. Mahtab Alam, Y. Le Moullec, A. Kuusik and M. Ali Imran, "Radio Resource Management Scheme in NB-IoT Systems," IEEE Access, vol. 6, pp. 15051-15064, 2018

24. Freudenthaler K, Springer A, Wehinger J. Novel SINR-to-CQI mapping maximizing the throughput in HSDPA. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2017.

25. Salman MI, Ng CK, Noordin NK, Ali BM, Sali A. A self-configured link adaptation for green LTE downlink transmission. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2015.

26. Wang K, Alonso-Zarate J, Dohler M. Energy-efficiency of LTE for small data machine-to-machine communications. In IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018.

27. Assaad M. Optimal fractional frequency reuse (FFR) in multicellular OFDMA system. In IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2018.

28. Bourgeois N, Escoffier B, Paschos VT, van Rooij JM. Fast algorithms for max independent set. Algorithmica. 2017.

29. A. K. Sultania, P. Zand, C. Blondia and J. Famaey, "Energy Modeling and Evaluation of NB-IoT with PSM and eDRX," in 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2018

30. . P. Jorke, R. Falkenberg and C. Wietfeld, "Power Consumption Analysis of NB-IoT and eMTC in Challenging Smart City Environments," in 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2018, pp. 1-6.

31. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects. 3GPP TR 36.814 Technical report v9.0.0. 2016.

30. Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 13). 3GPP TS 36.814 Technical specification v13.1.0. 2016.

32. Tan L, Feng Z, Li W, Jing Z, Gulliver TA. Graph coloring based spectrum allocation for femtocell downlink interference mitigation. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2017.

33. Fomin FV, Gaspers S, Saurabh S. Improved exact algorithms for counting 3- and 4-colorings. InInternational Computing and Combinatorics Conference 2017

34. Yu GJ, Khac HN. A Novel Downlink Interference Management Mechanism for Two-Tier OFDMA Femtocell Networks. Journal of Advances in Computer Networks. 2016

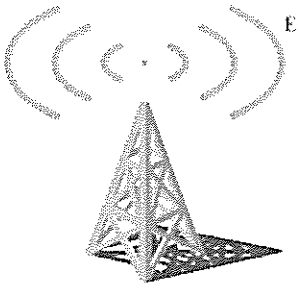
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

ПРЕЗЕНТАЦІЯ

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему "МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ IOT НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ГЛОБАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ"



Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-61
Коваленко І.О

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Мета роботи – підвищення енергоефективності експлуатації безпроводової мережі зв'язку.

Об'єкт дослідження – процес підвищення експлуатації систем зв'язку

Предмет дослідження – технології сучасного безпроводового зв'язку

Завдання магістерської роботи:

1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технологій зв'язку;
2. Тестове дослідження енергоефективності мереж LTE-M/NB-IoT;
3. Дослідження шляхів підвищення енергоефективності систем зв'язку..

Аналіз технологій та їх порівняння

Табл. 1 Порівняння технологій

Рис 1 Порівняння дальності та швидкості основних стандартів бездротового підключення

Табл. 2 Порівняння LTE-M і NB-IoT

Табл. 3 Порівняння характеристик NB-IoT

Поширення технологій NB-IoT та LTE-M

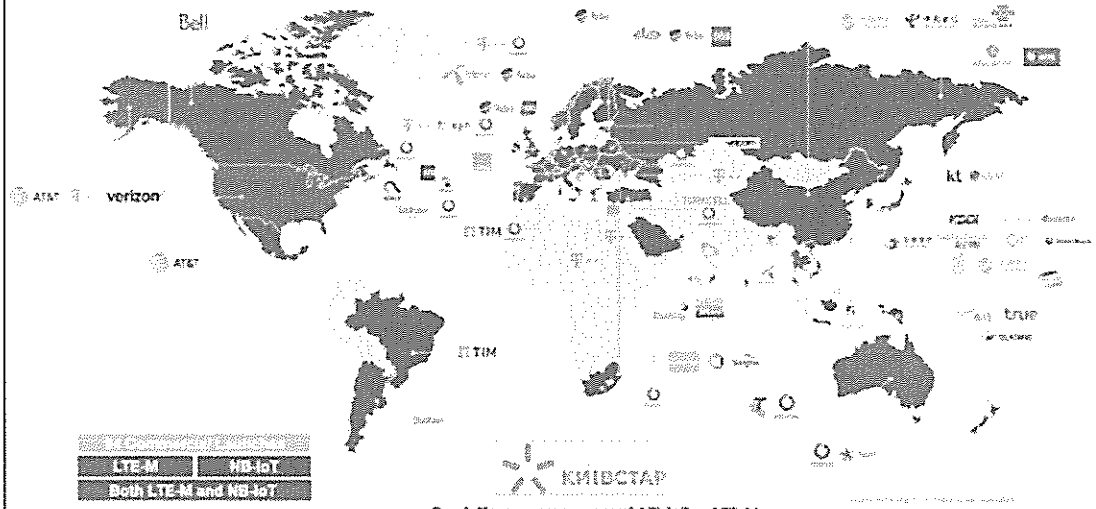


Рис 2 Поширення технологій NB-IoT та LTE-M

Ринок модулів стільникового Інтернету речей

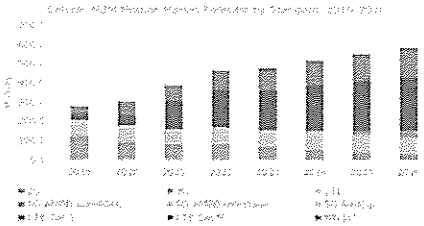


Рис 3. Прогноз ринку стільникового модуля M2M за стандартом

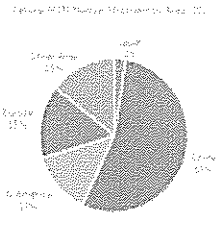


Рис 4 Поставки модулів стільникового зв'язку M2M за територіями та вертикалями

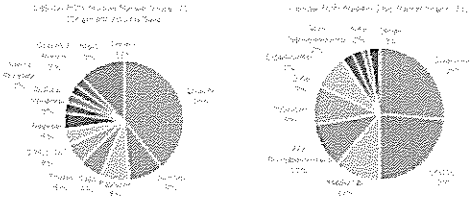


Рис 5. Частка ринку стільникового модуля M2M з модемного чипа

Тестове дослідження впливу на енергоспоживання пристроїв

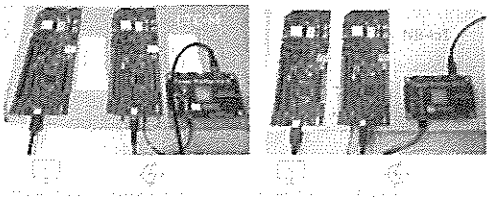


Рис. 6. Тестове налаштування для випробування з використанням eRP#160 ПК і PPK2



Рис. 7. Повна тестова установка



Рис. 8. Демонстрація вигляду від eNB

Результати тестування технології LTE-M

Табл. 4. Основні конфігурації мережі для LTE-M і NB-IoT на eNB

	11660	18660	7000
	1.25	2.5	1.25
	48	96	48
	100	50	50

Табл. 5. Дані отримані з тестування модемів в мережі LTE-M

	50	8	48	50	48	48	50	48	48	50
	-107	-94	-73	-97	-94	-94	-94	-97	-97	-97
	4 - Норм.	4 - Добре	5 - Добре	4 - Норм.	4 - Норм.	4 - Норм.	4 - Норм.	4 - Норм.	4 - Норм.	4 - Норм.
	9.4	4.6	5.1	4.6	4.2	4.2	4.8	4	4.6	5.4
	3	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	1	41	41	41	41	41	41	41	41	41

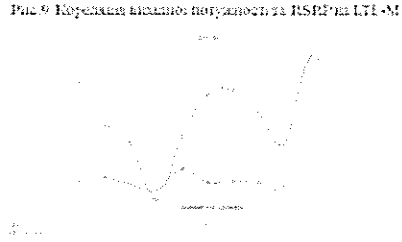


Рис. 9. Кореляція вихідної потужності та RSRP на LTE-M

Рис. 10. Загальний час і загальний заряд, зафіксовані під час підключення в LTE-M

Результати тестування технології NB-IoT

Табл. 6. Дані отримані з тестування модемів на NB-IoT

	50	48	48	48	48	48	48	48	48
	-107	-97	-97	-97	-97	-97	-97	-97	-97
	3 - Норм.	3 - Добре	3 - Норм.	3 - Добре	3 - Норм.	3 - Добре	3 - Норм.	3 - Норм.	3 - Норм.
	12	22.6	19.2	19.2	21.6	22.6	22.4	17.6	17.4
	57	45	46	46	46	46	45	45	45
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1

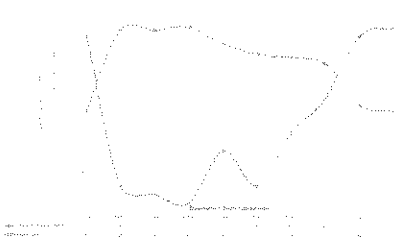


Рис. 11. Кореляція вихідної потужності та RSRP на NB-IoT

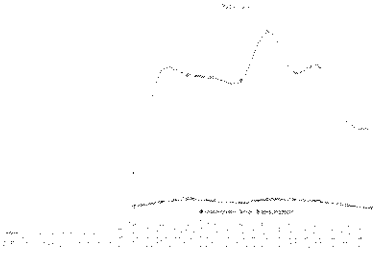


Рис. 12. Загальний час і загальний заряд, зафіксовані під час з'єднання в NB-IoT

Результати та порівняння технологій

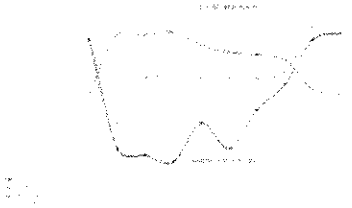


Рис. 13. Кореляція втрати потужності та RSRP на LTE-M та NB-IoT

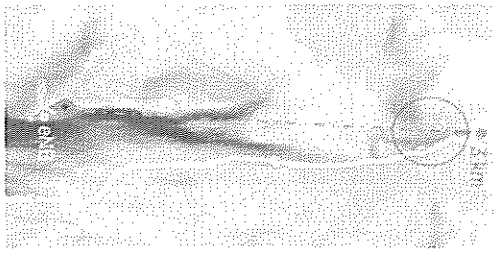


Рис. 15. Вимірювання на відстані 3 км від eNB

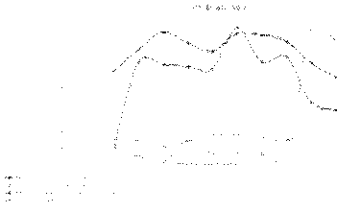


Рис. 14. Загальний час і загальний заряд, зафіксовані під час підключення в NB-IoT і LTE-M



Рис. 16. Точки вимірювання (7 км), що показує перешкоди eNB

Алгоритми підвищення ефективності систем

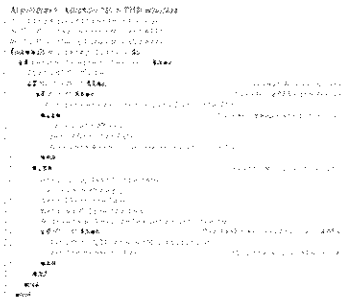


Рис. 17. Алгоритм 1 адаптивний алгоритм вибору MCS

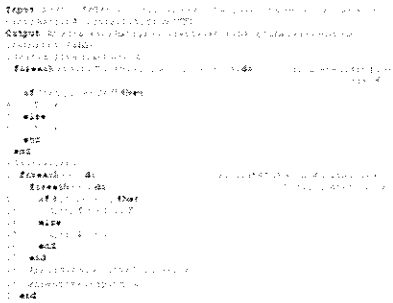


Рис. 18. Алгоритм 2. Планування ресурсів, орієнтоване на пульсь

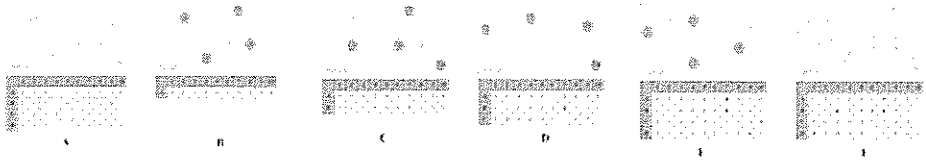


Рис. 19. Приклад канально-орієнтованого алгоритму планування ресурсів

Оцінка ефективності та результати моделювання

Табл. 7. Параметри моделювання



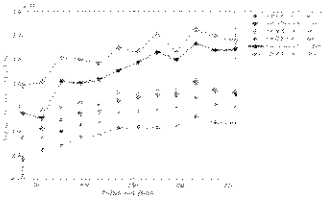


Рис. 20. Залежність енергоефективності від розміру пакета

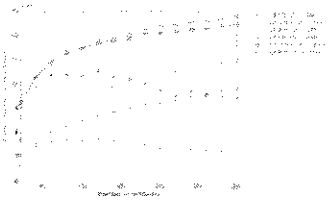


Рис. 21. Залежність енергоефективності від кількості eNB

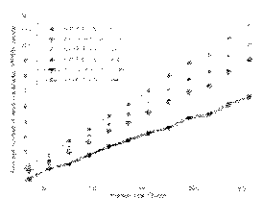


Рис. 22. Порівняння ресурсів залежить від розміру пакета

Висновки по роботі

Таким чином виконуючи перше поставлене завдання, мною було виконано аналіз сучасного стану та перспектив розвитку енергоефективних технологій зв'язку.

Виконано дослідження-тестування енергоефективності технологій NB-IoT LTE-M. Даний тест демонструє, що коли клієнт від eNB збільшується, потужність сигналу зменшується, а викидна потужність збільшується для обох технологій. Видно, як перешкоди та перешкоди вносять в сигнал/ші можуть впливати на ті самі параметри. Проаналізовано переваги використання функцій « Оцінка енергії» - яка дала приблизну оцінку стану мережі перед надсиланням будь-яких даних.

Іншим висновком даного дослідження є різниця в енергоспоживанні між двома технологіями. У звичайних умовах LTE-M споживатиме менше енергії, але коли пристрій у поганому стані до певного моменту, NB-IoT виявляє, можливо, кращим варіантом для надсилання менших обсягів даних.

Аналіз показав, що NB-IoT має кращий радіус дії, ніж LTE-M, оскільки пристрої NB-IoT підключаються до інших базових станцій через 12 км, хоча RSRP і викидна потужність для них обидва були досить низькими та високими відповідно. З цих результатів видно, що в більшості випадків найкраще використовувати LTE-M, якщо ви зосереджені на вищій пропускній здатності та низькому споживанню.

Досліджено та математично алгоритм адаптивної модуляції та вибору кодування (AMCS) для вирішення проблеми споживання енергії в платформі виявлення IoT на основі LTE-M. Запропонований алгоритм визначає оптимальну пару MCS і кількість перевищує блоків ресурсів (#PRB), при яких розмір транспортного блоку достатній для надсилання даних в межах мінімальної потужності передачі. Крім того, була запропонована техніка динамічного оптимального планування ресурсів (DORP), яка використовує цю оптимальну пару MCS як основний критерій/пріоритет для кращої адаптації до вимог чутливого вузла.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

ПОДАННЯ ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ ЩОДО ЗАХИСТУ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Направляється студент Коваленко І.О. до захисту магістерської роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

на тему: Методи підвищення енергоефективності систем IoT на базі технології радіозв`язку глобальної мережі

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту _____ Кравченко В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Довідка про успішність

Коваленко І.О. за період навчання в Навчально-науковому інституті телекомунікацій,
(прізвище та ініціали)

з 2020 року до 2022 року повністю виконав навчальний план за напрямом підготовки, спеціальністю з таким розподілом оцінок за:
національною шкалою: відмінно — %, добре 55 %, задовільно 45 %;
шкалою ECTS: A — %; B 11 %; C 44 %; D 39 %; E 6 %.

Провідний фахівець інституту _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Висновок керівника магістерської роботи

Студент Коваленко Ігор Олександрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Магістерська робота виконана на високому рівні і заслуговує оцінку "відмінно", а студент Коваленко Ігор Олександрович присвоєння кваліфікації «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки», викладач вищих навчальних закладів»

Керівник роботи _____ Руденко Н.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

" " _____ 2022 року

Висновок кафедри про магістерську роботу

Магістерську роботу розглянуто. Студент Коваленко І.О.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Державній екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Руденко Н.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

" " _____ 2022 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Коваленко Ігор Олександрович
на тему: «МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІОТ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ГЛОБАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ»

Актуальність:

Будучи важливою частиною тенденцій розвитку Інтернету речей, технології бездротового датчика були задіяні в багатьох сферах людського життя. У розвитку стільникових мереж LTE-M/NB-IoT, забезпечують перспективну інфраструктуру для поширення платформи визначення Інтернету речей. Для ефективного та довгочасного використання різного роду датчиків необхідно підвищувати їх енергоефективність, що забезпечується завдяки використанню сучасних технологій та методів підвищення покзників якості систем в цілому.

Позитивні сторони:

Зміст магістерської роботи повністю відповідає завданню, а поставлені задачі виконані у повному обсязі. Виконано дослідження енергоефективності мереж LTE-M/NB-IoT в залежності від відстані до базової станції, проведено тестування та порівняння в енергоспоживанні між даними технологіями, що дозволяє оцінити дані технології та обрати для відповідного проекту.

Для збільшення енергоефективності системи досліджено та запропоновано алгоритми адаптивного вибору MCS і планування ресурсів що дозволяє мінімізувати потужності передачі у вузлах Інтернет речей та збільшити час роботи пристроїв.

Недоліки:

1. У практичній частині, магістерської роботи, доцільно було б виконати впровадження отриманих результатів на підприємстві чи приватному секторі.
2. Не у повній мірі розглянуто питання аналізу технічного обладнання, на базі якого реалізується досліджувана мережа.

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку **відмінно**, а студент Коваленко Ігор Олександрович – присвоєння кваліфікації «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки», викладач вищих навчальних закладів.

Якість проекту (роботи)	
Виконано на замовлення підприємства	
Виконано за тематикою НДР	
Виконано з макетом	
Виконано з застосуванням ЕОМ та МПТ	√
Має практичну цінність	√
Проект-частина комплексної теми	

Підпис рецензента
доцент каф. ТСМ (підпис) К.Г.