ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ СТАНДАРТУ NB-IOT”**

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

Бакута І.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник Руденко Н.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Лаврінець К.Г.
(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

Бакуті Іллі Ігоровичу

1.Тема роботи: «Методи підвищення продуктивності роботи мобільних мереж на базі стандарту NB-IOT»,
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. Стратегії розгортання NB-IoT;
   2. Частотний спектр;
   3. Архітектура мережі;
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):
   1. Аналіз стану та перспектив розвитку сучасних безпроводових технологій зв’язку;
   2. Дослідження технічних особливостей мережі NB-IoT;
   3. Моделювання NB-IoT D2D.

.

5. Графічна частина роботи представлена на 12 слайдах презентації

6. Дата видачі завдання 14.10.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	18.10.2022р.	Викон.
2	Аналіз поширення та перспектив розвитку сучасних безпроводових технологій	28.10.2022р.	Викон.
3	Технічні особливості мережі NB-IoT	10.11.2022р.	Викон.
4	Підвищення продуктивності роботи мережі NB-IoT	27.11.2022р.	Викон.
5	Висновки, вступ, реферат	03.12.2022р.	Викон.
6	Розробка презентації	14.12.2022р.	Викон.

Студент _____ Бакута І.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 78 стор., 54 рис., 6 табл., 32 дж.

Об'єкт дослідження – процес підвищення енергоефективності мережі зв'язку.

Предмет дослідження – мережа безпроводового зв'язку NB-IoT.

Мета роботи – підвищення показників якості мережі зв'язку на базі технології NB-IoT.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися методи теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування і теорії телетрафіка, імітаційного і натурного моделювання.

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано дослідження тенденцій розвитку, поширення та сфери застосування технології IoT. Основна увага приділяється сучасній технології інтернету речей яка реалізується на базі технології LTE.

У другому розділі проаналізовано інтеграція NB-IoT в мережах мобільного зв'язку, описано технічні аспекти та наведені зміни в архітектурі. Виконано дослідження особливостей побудови мережі, та шляхи підвищення енергоефективності NB-IoT.

У практичній частині виконано дослідження моделювання вузькосмугового Інтернету речей від пристрою до пристрою (NB-IoT D2D).

СМУГА ПРОПУСКАННЯ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МОДЕЛЮВАННЯ, СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АДАПТИВНА КЛАСТЕРИЗАЦІЇ, ПЛАНУВАННЯ КАНАЛІВ, ЗВ'ЯЗОК МІЖ ПРИСТРОЯМИ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....8
1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....10
1.1 Аналіз світового ринку Інтернет речей.....10
1.2 Огляд поширення та розгортання мереж.....18
1.3 Варіанти використання та додатки для 5G NB-IoT.....23
1.4 Можливі стратегії розгортання NB-IoT.....25
1.5 Дослідення регіональних відмінностей мереж та подальші перспективи їх розвитку.....28

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНЫЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ NB-IOT В МЕРЕЖАХ LTE.....22
2.1 Огляд архітектури NB-IOT.....32
2.2 Аналіз частотного спектру технології NB-IoT.....37
2.3 Аналіз передавальної частини систем NB-IoT.....45
2.4 Системна модель для аналізу технологій NB-IoT.....52

3 ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ МЕРЕЖІ NB-IOT.....57
3.1 Огляд D2D комунікацій у стільникових мережах.....57
3.2 NB-IoT D2D фреймворк, модель і симуляція.....59
3.2.1 Архітектура NB-IoT D2D.....59
3.2.2 Протокол маршрутизації LEACH.....64
3.2.3 Моделі поширення каналів.....66
3.3. Результат моделювання.....72
ВИСНОВКИ.....84
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....86
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....89

ВСТУП

Актуальність дослідження. Вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT) демонструє високоякісне підключення, яке підтримується мережами п'ятого покоління (5G), щоб охопити широкий спектр програм IoT. Розробка пристроїв та інтеграція в різні інтелектуальні системи вимагають постійного контролю, нагляду та вивчення моделей енергоспоживання для визначення продуктивності топології мережі та вимірювання ефективності застосування топології мережі.

Технологія NB-IoT стала провідним рішенням у контексті LPWAN з моменту її створення 3GPP у Rel-13 (глобальні мережі малої потужності). LPWAN є видатною мережевою технологією для додатків Інтернету речей, придатною для дальнього зв'язку та стільникових мереж «машина-машина» (M2M).

Ринок LPWA існує вже близько десяти років, проте технології, що його підтримують, носять фрагментарний характер і не стандартизовані. Нова технологія NB-IoT (Narrowband IoT) долає ці недоліки.

Використовуючи існуючу стільникову архітектуру економічно ефективним способом, NB-IoT у поєднанні з іншими технологіями надає послуги Інтернету речей для комунікацій масивного машинного типу (mMTC) у 5G, включаючи варіанти використання для розумних міст і промислової автоматизації.

Головною «продаючою позицією» NB-IoT є низьке енергоспоживання, яке збільшує час роботи батареї вбудованих пристроїв. Саме тому дана технологія дозволить операторам мобільного зв'язку негайно забезпечити надання комерційних рішень у сегменті IoT. Але постійні зростаючі вимоги споживачів зумовлюють на нові дослідження та постійне вдосконалення систем.

Тому актуальною задачею є дослідження та застосування різного роду методів та засобів підвищення показників якості мережі NB-IoT.

Об'єкт дослідження – процес підвищення енергоефективності мережі зв'язку.

Предмет дослідження – мережа безпроводового зв'язку NB-IoT.

Мета роботи – підвищення показників якості мережі зв'язку на базі технології NB-IoT.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися методи теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування і теорії телетрафіка, імітаційного і натурного моделювання.

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.

Ступінь наукової розробки. Отримані результати магістерської кваліфікаційної роботи сприяють зниженню енергоспоживання, мінімізації затримок у черзі, що дозволяє знизити вартість зв'язку.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає вирішенні завдання підвищення продуктивності мереж NB-IoT, що в свою чергу дозволяє надавати оператору зв'язку більш якісні та ефективні послуги. Як приклад у нашій країні, компанія ПрАТ «Київстар» спільно з ПрАТ Водоканал, застосовують дану технологію для зняття показників споживання води.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1. Аналіз світового ринку Інтернет речей

Ринок корпоративного Інтернету речей зріс на 22,4% до 157,9 мільярда доларів США у 2021 році, згідно з оновленням інформаційної панелі Global IoT Enterprise Spending Dashboard IoT Analytics за березень 2022 року . Ринок зріс трохи повільніше, ніж 24%, прогнозованих минулого року , через кілька факторів, включаючи повільніше, ніж очікувалося, загальне відновлення економіки, брак чіпсетів і порушення ланцюжків поставок. Північна Америка була регіоном із найшвидшим зростанням у 2021 році (+24,1%), а технологічне виробництво було найшвидше зростаючим сегментом (+25%) [1].

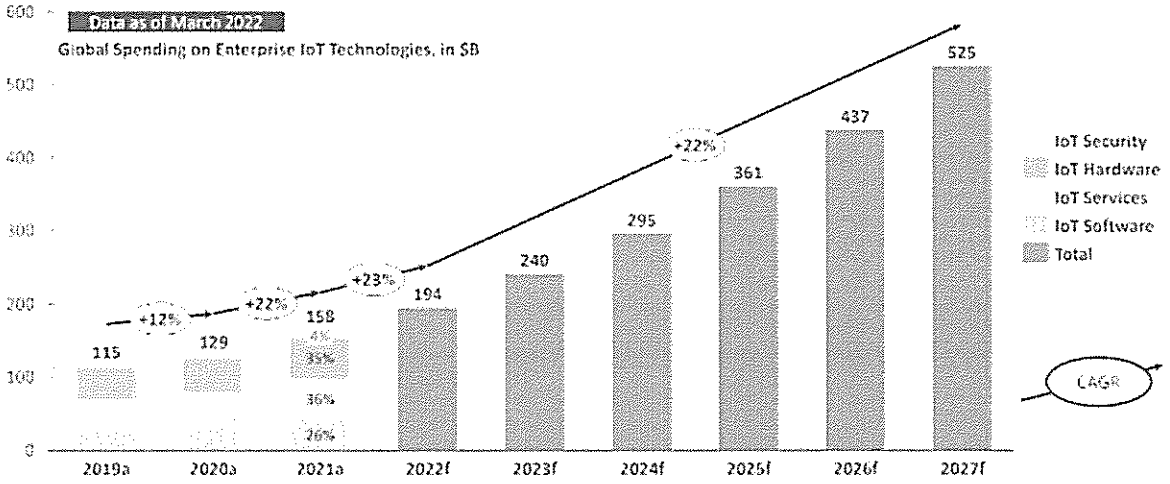


Рис.1.1. Аналіз та прогноз зростання ринку IoT

На даний момент IoT Analytics прогнозує зростання розміру ринку IoT на 22,0% до 525 мільярдів доларів з 2022 по 2027 рік. П'ятирічний прогноз був знижений порівняно з попереднім роком. Низка перешкод зростання справила набагато сильніший вплив, ніж передбачалося раніше, а саме дефіцит поставок і збої (зокрема, дефіцит чіпів, який тепер очікується до 2024 року і, можливо, навіть пізніше) і дефіцит робочої сили, особливо для популярного програмного

забезпечення, робочих місць. Незважаючи на зниження прогнозів зростання, IoT залишається дуже актуальною технологічною темою, і багато проектів переходять у фазу розгортання. Очікується, що кількість підключених пристроїв IoT досягне 14,5 мільярдів у всьому світі до кінця 2022 року [2].

У рамках прогнозування, мною було глибше розглянто, як на траєкторію зростання IoT впливають основні макротенденції в сферах економіки, політичних подій, екологічних факторів і технологічного прогресу рис.1.2.

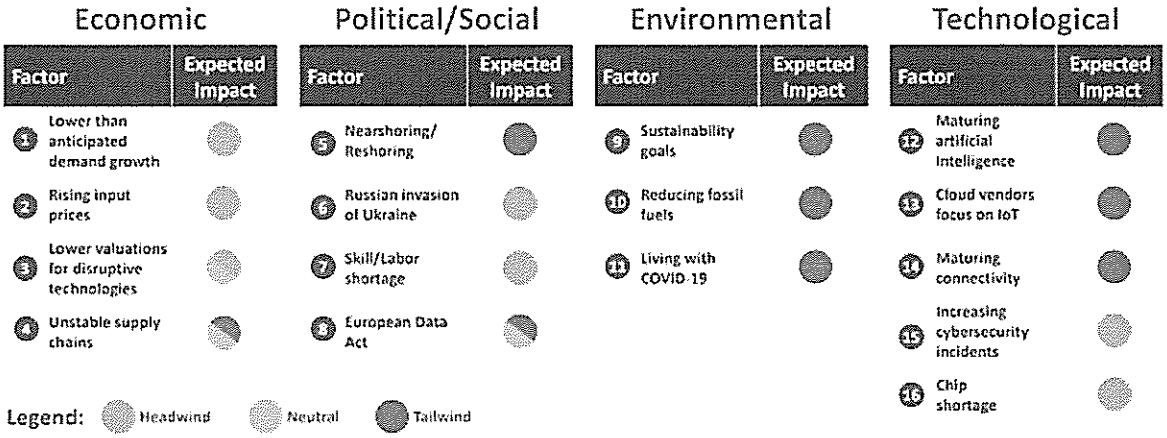


Рис.1.2. Фактори впливу на ринок IoT

Економічні фактори впливу:

1. Нижче, ніж очікувалося, зростання попиту. У своєму огляді світової економіки за січень 2022 року Міжнародний валютний фонд (МВФ) прогнозував зростання ВВП на 4,4% у 2022 році після зростання на 5,9% у 2021 році. Порівняно з жовтнем 2021 року економісти МВФ вже знизили прогноз зростання на 2022 рік наполовину. відсоткового пункту після того, як стали очевидними висока інфляція, зростання кількості випадків COVID-19 і загальні проблеми з ланцюгом поставок. Загальна ділова впевненість і відновлення приватного споживання нижчі, ніж очікувалося раніше, що ще більше вплине на економічну активність. Після російського вторгнення в Україну МВФ зазначив у блозі: «Конфлікт є серйозним ударом по світовій економіці, який зашкодить зростанню

та підвищить ціни». Очікується, що МВФ знизить свій прогнозще раз у своєму наступному вигляді.

2. Зростання цін на сировину. Інфляція різко зростає в більшості економік. Зростання цін на енергоносії, сировину та продукти харчування почало вдаряти по бізнесу. Інвестиційний банк Goldman Sachs заявив, що все більше стурбований інфляцією, і підвищив свій прогноз інфляції на 2022 рік. Оскільки зростання цін на ресурси негативно впливає на прибуток, компанії мають обмежений простір для інвестування, що негативно впливає на нові технології, такі як IoT. Тим не менш, є срібна підкладка для IoT. Недавній звіт IoT Analytics показав, що випадки використання IoT, пов'язані з покращенням діяльності компанії, є одними з найбільш прийнятних. Оскільки тиск на маржу через інфляцію зростає, компанії дивитимуться на IoT як на інструмент для покращення операцій та інвестування в види економії. Таким чином, вплив високої інфляції на IoT може мати певну подушку [3]. Однак загальний вплив цієї вигоди буде недостатньо сильним, щоб переважити негативні економічні наслідки зростання цін на виробничі ресурси.

3. Нижчі оцінки революційних технологій. Очікується, що центральні банки всього світу суттєво підвищать процентні ставки в найближчі місяці для боротьби з інфляцією. Це підвищення є поганою новиною для швидкозростаючих технологічних фірм і стартапів, оскільки воно ставить під тиск їхні загальні оцінки компанії. За словами деяких інсайдерів, цього року оцінка компаній, що фінансуються венчурним капіталом, уже впала на 20%. У майбутньому бізнес-ідеям і технологіям, які підривають ринок, може стати важче отримати свіже фінансування.

4. Нестабільні ланцюги поставок. Протягом 2021 року перебої в ланцюзі постачань викликали занепокоєння через низку факторів, зокрема блокування через COVID-19, дефіцит контейнерів і заблокований Суецький канал. На кінець 2021 року цю тему було визначено як тему №1, про яку говорили генеральні директори під час дзвінків щодо прибутку.

Зокрема, ланцюжок постачання чіпсетів викликає велике занепокоєння для компаній, але багато інших ланцюжків постачання зазнають значного впливу, включно з лісоматеріалами, велосипедами та медичним обладнанням.

Цікаво, що перебої з постачанням є головним попутним вітром для деяких ініціатив IoT. Керівники інвестують значні кошти в інтелектуальні рішення, які роблять ланцюжки поставок більш стійкими (наприклад, рішення IoT для відстеження та відстеження або автоматизація складів) [4].

Політичні, соціальні та правові фактори впливу:

5. Неаршоринг/Решоринг. Через нестабільність ланцюгів постачання багато компаній переходять від стратегії одного постачальника до стратегії кількох джерел, щоб надати більше можливостей у разі майбутнього збою. У той же час уряди почали наполягати на перенесенні виробництва, щоб пом'якшити наслідки дедалі хиткіших ланцюжків поставок. Адміністрація Байдена нещодавно оголосилащо до 2029 року продукт з позначкою «Зроблено в Америці» повинен буде містити 75% деталей, вироблених у США, порівняно з 55% сьогодні. Європа бачить подібну тенденцію щодо решорингу та ріщорінгу. Враховуючи порівняно високі витрати на робочу силу в США та Європі, компаніям необхідно інвестувати в сучасні виробничі потужності та індустрію 4.0, щоб залишатися конкурентоспроможними. Це призведе до інвестицій у нові сучасні виробничі потужності в країнах з відносно високою середньою заробітною платою.

6. Вторгнення Росії в Україну. Напівпровідникова промисловість почала накопичувати сировину ще до російського вторгнення в Україну як реакцію на неодноразові потрясіння та переважно нещодавно як реакцію на скупчення російських військ біля українського кордону. Однак, оскільки великі частки неону та паладію виробляються в Росії та Україні, очікується, що дефіцит напівпровідників посилиться, якщо війна триватиме надто довго, що вплине на ринок IoT.

Загалом, вторгнення в Україну посилює глобальну незахищеність щодо ланцюгів постачання, цін і безпеки. Очікується, що санкції проти Росії матимуть обмежений ефект, окрім обмеження зростання розміру ринку Інтернету речей у

Росії. Деякі російські технологічні компанії, такі як Kaspersky , або компанії, які підтримуються російськими фінансистами (наприклад, Truphone , яку підтримує Абрамович , російський олігарх), ймовірно, відчують наслідки. Федеральне відомство з інформаційної безпеки Німеччини , наприклад, оприлюднило публічне попередження , в якому закликало німців і німецькі компанії не користуватися жодними послугами Касперського.

7. Дефіцит кваліфікації/робочої сили. Дефіцит кваліфікації стає все більш напруженим. Компанії відчувають труднощі з наймом достатньої кількості кваліфікованих співробітників і наданням внутрішніх знань для просування вперед у сфері цифрової трансформації та проектів AI, IoT і хмарних технологій. IoT Analytics відстежує онлайн-оголошення про роботу , щоб зрозуміти дефіцит навичок і пов'язані з цим тенденції. У період з липня 2021 року по березень 2022 року кількість оголошень про роботу, у яких згадується «штучний інтелект», зросла на 50%, причому надзвичайно швидко зростали «інтернет речей» (+41%) і «хмара» (+30%). Більше того, нещодавнє дослідження, опубліковане Inmarsat , виявило відсутність внутрішніх навичок головною перешкодою для розгортання IoT [5].

8. Європейський закон про дані. Європейський закон про дані, який, ймовірно, набуде чинності в 2023 році, може мати позитивні наслідки для конкуренції в технологічному просторі. Європейська комісія планує запровадити директиву, яка дозволить клієнтам (підприємствам і споживачам) перемикатися між різними постачальниками послуг обробки хмарних даних і встановить гарантії проти незаконної передачі даних. Крім того, це дозволить користувачам підключених пристроїв отримати доступ до даних, які вони генерують, які наразі доступні переважно виробникам. Тоді кінцевим користувачам буде дозволено ділитися цими даними з третіми сторонами, які можуть пропонувати додаткові послуги. Ця можливість може допомогти стартапам та іншим учасникам розширити свою клієнтську базу.

Фактори навколишнього середовища:

9. Цілі сталого розвитку. Понад 300 глобальних компаній (зокрема Mercedes-Benz , Schneider Electric , Uber , Microsoft , Unilever та Infosys) взяли на себе зобов'язання щодо Climate Pledge, ініціативи під керівництвом Amazon , яка пропонує компаніям досягти нульового чистого викиду вуглецю до 2040 року. Щоб досягти цього амбітна мета, компаніям потрібно буде вимірювати та скорочувати викиди вуглецю в найближчі роки. Очікується, що сценарії використання, орієнтовані на сталість, такі як управління енергією на основі Інтернету речей, управління відновлюваною енергією та підключене опалення, вентиляцію, вентиляцію та кондиціонування, будуть користуватися великим попитом. Програмні засоби також необхідні для вимірювання відбитків сталого розвитку та досягнення цілей ESG.

Екстремальні погодні явища, такі як ті, що вже спостерігалися на початку 2022 року (наприклад, шторми та повені в Північній Європі та Великобританії, тропічні шторми в Східній Африці та зимові шторми на північному сході США), забезпечать зміну клімату й надалі привертати увагу та призведуть до подальші інвестиції в енергоефективність і вуглецеву нейтральність, щоб обмежити наслідки.

10. Зменшення залежності від викопного палива. Уряди, компанії та окремі люди все більше переходять на альтернативні джерела енергії. Велика автомобільна компанія Ford подвоїла електрифікацію свого автопарку. Британський уряд пообіцяв збільшити кількість зарядних станцій для електромобілів (EV) у десять разів до 2030 року. Крім того, підприємства важкої промисловості та транспорту прагнуть замінити водень викопному паливу. Саудівська Аравія збирається початипроект зеленого водню вартістю 5 мільярдів доларів США в березні 2022 року. Метою проекту є використання вітрової та сонячної енергії для виробництва понад 650 тонн водню на день шляхом електролізу. Збільшення електромобілів та інфраструктури зарядки електромобілів, а також інвестиції в нові та екологічніші джерела енергії в усіх основних економіках, ймовірно, спричинять інвестиції в розумні електромережі

та рішення для розумних міст, а також загальне збільшення витрат на Інтернет речей в енергетичній галузі [6].

11. Життя з COVID-19. Хоча зусилля з вакцинації привели до мільярдів введених доз, світ перейшов від наративу «покінчити з COVID-19» до «жити з COVID-19». У багатьох частинах світу кількість випадків COVID-19 знову зростає. Китай навіть запровадив нові локдауни , тоді як решта світу продовжує відкриватися. Висока частка вакцинованого населення (у більшості розвинутих економік) і, здавалося б, менш небезпечний варіант Омікрон означає, що COVID-19 тепер менш смертоносний, ніж грип в Англії. Однак високий рівень випадків і побоювання нових блокувань ще більше сприятимуть зростанню витрат на деякі випадки використання IoT, наприклад, віддалений моніторинг і контроль активів. Інтелектуальне відстеження столів і моніторинг якості повітря, ймовірно, стануть більш поширеними в сучасних офісних будівлях.

Технологічні фактори:

12. Дозрівання штучного інтелекту. Опитування щодо впровадження IoT у 2021 році показало, що лише 16% компаній повністю запровадили ШІ як частину проектів IoT, тоді як 70% розгортають його або мають пілотний проект. Важливість ШІ для IoT все ще зростає. Очікується, що доступність нових програмних засобів, розробка спрощених рішень штучного інтелекту, впровадження штучного інтелекту в застарілі програми та прогрес апаратного забезпечення штучного інтелекту сприятимуть розвитку штучного інтелекту речей (AIoT), і ми оцінюємо, що ринок штучного інтелекту досягне 102,2 дол. мільярдів до 2026 року.

13. Хмарний постачальник зосереджений на IoT

Оскільки міграція корпоративного робочого навантаження в хмару триває, три головні гіпермасштабувальники — Microsoft , AWS і Google — продовжують інвестувати значні кошти в IoT. Вони надають комунікаційні послуги , пропонують галузеві послуги та впроваджують цифрових близнюків як основний елемент своєї хмари IoT. У багатьох відношеннях гіпермасштабувальники стали

основою IoT, і очікується, що їх незмінна тверда прихильність прискорить загальне зростання розміру ринку IoT у найближчі роки.

14. Розвиток зв'язності. 5G була найбільш обговорюваною темою на Mobile World Congress 2022 , оскільки ярмарок стає все більш орієнтованим на підприємства. Поряд з 5G останніми роками було представлено низку більш зрілих технологій підключення, включаючи LPWAN, одну пару Ethernet, Wi-Fi 6 і низькоорбітальний супутниковий IoT. Можливість отримати потужніший зв'язок за нижчими цінами продовжує підживлювати ринок Інтернету речей і дає клієнтам нові концепції, такі як можливість для підприємств створювати власні приватні мережі 5G.

15. Збільшення інцидентів кібербезпеки. Кількість атак на кібербезпеку була високою протягом кількох років . Часто з'являються заголовки про резонансні інциденти безпеки, що підкреслює проблему. Toyota була змушена призупинити виробництво на 14 японських заводах після того, як постачальник зазнав кібератаки, що призвело до невиробництва 13 000 одиниць. Після атаки програм-вимагачів у середині 2021 року компанії Colonial вперше в історії довелося закрити всю мережу бензопроводів . Найбільший у світі постачальник м'яса був змушений зупинити виробництво після кібератаки. Ці приклади демонструють ризики, з якими стикається IoT, і ще деякий час будуть зустрічним вітром для галузі (одночасно будучи попутним вітром для тих, хто пропонує рішення з кібербезпеки).

16. Дефіцит мікросхем. У 2021 році 20 мільйонів чіпів стільникового Інтернету речей були відсутні через глобальний дефіцит поставок. Дефіцит продовжує залишатися найбільш серйозною проблемою для напівпровідникової промисловості та багатьох її клієнтів. На виставці MWC 2022 ми дізналися , що термін виконання чіпів 40–50 тижнів став новим середнім показником для галузі, що перепроектування та попереднє замовлення чіпів із передоплатою стали стандартною діловою практикою для галузі та що галузь не може визначити, чи сплеск попиту на чіпси відображає паніку чи нову норму. Згідно з опитуванням, проведеним Avnet85% інженерів очікують більшого терміну виконання протягом

наступних 18 місяців. Оскільки терміни виконання все ще збільшуються, багато проектів IoT будуть неможливими через зростання цін і обмежену пропозицію. Дефіцит, швидше за все, обмежить зростання принаймні в 2022 і 2023 роках. Однак у довгостроковій перспективі інвестиції в додаткові потужності можуть збільшити пропозицію та призвести до зниження цін. Intel нещодавно оголосила про інвестиції в розмірі 80 мільярдів євро (~89 мільярдів доларів) у дослідження та розробки, «сучасні технології упаковки» та виробництво. Європейський Союз інвестує мільярди , щоб досягти мети «володіти 20% світового ринку мікросхем до 2030 року».

1.2 Огляд поширення та розгортання мереж

Інтернет речей все більше впроваджується бізнесом, що свідчить про його зростаюче значення. Підключення, яке забезпечує ця система, відіграє ключову роль у підвищенні ефективності. Зараз найпопулярнішими технологіями підключення є LTE-M і NB-IoT, які характеризуються низьким енергоспоживанням і широкою зоною покриття [7].

Технології для підключення активів до Інтернету речей можна широко класифікувати залежно від:

- статус ліцензії: у ліцензованому чи неліцензованому діапазоні;
- зона підключення: вузька або широка;
- споживання електроенергії: низьке або високе;
- придатність: для стаціонарних або мобільних засобів.

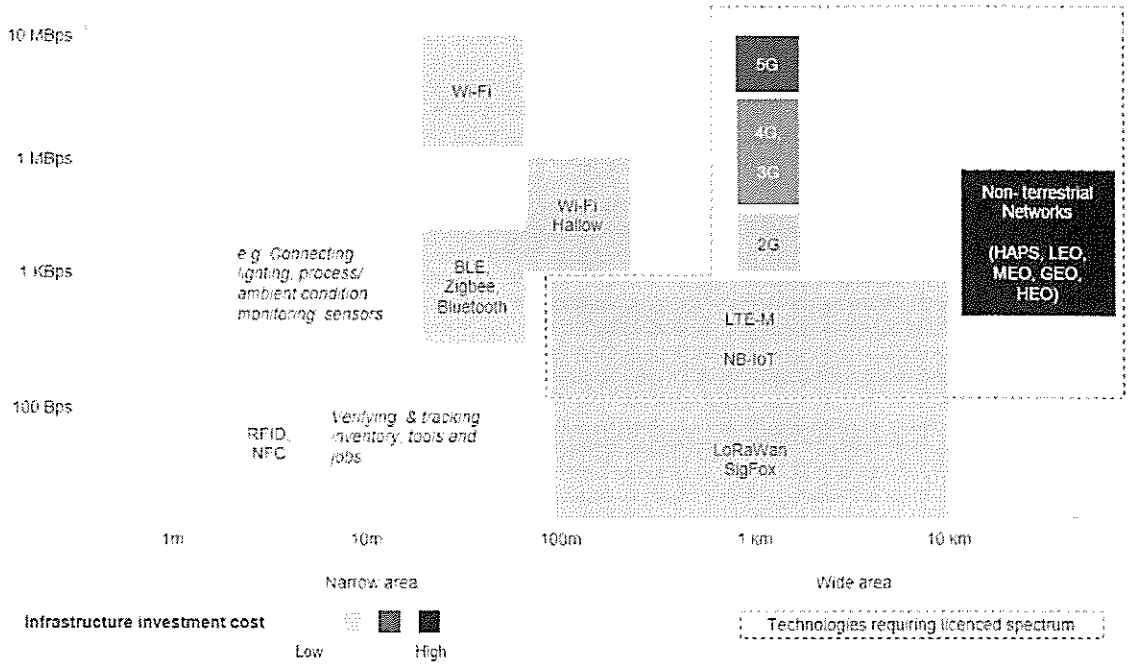


Рис.1.3. Технології для підключення активів до Інтернету речей

LTE-M і NB-IoT.

NB-IoT — це технологія стільникового зв'язку на основі стандарту LPWA (Low Power Wide Area), представлена у випуску 13. Вона була розроблена для використання в широкому діапазоні нових пристроїв і послуг IoT для забезпечення ефективної роботи. зв'язок для масово розподілених пристроїв із покращеним енергоспоживанням. Він використовує вже встановлені мобільні мережі для з'єднання цих «речей». Категорія NB2 з'явиться в 3GPP Release 14 і, як очікується, покращить пік у 2 рази [8].

LTE-M — це спрощений галузевий термін для стандарту технології LTE-MTC LPWA, опублікованого 3GPP у специфікації випуску 13. Порівняння LTE-M і NB-IoT наведено у табл.1.1.

Таблиця 1.1.

Порівняння технологій LTE-M і NB-IoT

Технічні характеристики	NB-IoT	LTE-M1
	Облік електроенергії, автоматизація виробництва, розумні лічильники, послуги з	Розумні міста, підключене здоров'я, автомобільна промисловість і логістика, моніторинг управління

	управління об'єктами, розумні рішення для паркування, підключені стада/худоба, розумне управління сміттям, розумні торгові автомати, підключені промислові пристрої, такі як зварювальні апарати чи повітряні компресори, підключені персональні прилади для вимірювання параметрів здоров'я, сільське господарство, тощо	автопарком, персональний Інтернет речей, фітнес-носні пристрої, відстеження активів, роздрібна торгівля, PoS, розумні лічильники, домашня безпека, управління промисловими активами тощо.

Продовження таблиці 1.1.

Порівняння технологій LTE-M і NB-IoT

Технічні характеристики	NB-IoT	LTE-M1
Застосування	Облік електроенергії, автоматизація виробництва, розумні лічильники, послуги з управління об'єктами, розумні рішення для паркування, підключені стада/худоба, розумне управління сміттям, розумні торгові автомати, підключені промислові пристрої, такі як зварювальні апарати чи повітряні компресори, підключені персональні прилади для вимірювання параметрів здоров'я, сільське господарство, тощо	Розумні міста, підключене здоров'я, автомобільна промисловість і логістика, моніторинг управління автопарком, персональний Інтернет речей, фітнес-носні пристрої, відстеження активів, роздрібна торгівля, PoS, розумні лічильники, домашня безпека, управління промисловими активами тощо.
Пропускна здатність	180 кГц | Ліцензія 3GPP	1,4 МГц | Ліцензія 3GPP
Вихідна швидкість	66 Кбіт/с-159 Кбіт/с	1-7 Мбіт/с
Швидкість низхідного	26 Кбіт/с-127 Кбіт/с	1-4 Мбіт/с

зв'язку		
Підтримка мобільності	Обмежено (відповідно до випуску 3GPP 14)	Так
Затримка	1,5–10 с	10 мс–15 мс
Термін служби батареї	+10 років (залежно від варіанту використання)	10 років (залежно від варіанту використання)
Споживання енергії	Найкраще на низькій швидкості передачі даних	Найкраще при середніх показниках
Вартість одного модуля	5–10 доларів США	10–15 доларів США
Частота розгортання	гнучкий	У діапазоні LTE
Проникнення в приміщення	Чудово	добре
Голос	Ні	Так, VoLTE

Тенденції в LTE-M та NB-IoT. Перехід від 2G/3G до 4G. Постачальники телекомунікаційних послуг проводять масову трансформацію мережі, переходячи з мобільного 2G/3G на LTE/5G. Південна Корея, США, Японія, Австралія та Китай закрили послуги 2G і планують повністю відмовитися від послуг 3G до 2022 року.

Збільшення впровадження LTE-M та NB-IoT: LTE-M та NB-IoT набирають обертів у всьому світі. GSMA повідомляє, що в усьому світі існує приблизно 35 мереж LTE-M і 92 мережі NB-IoT. Такі країни, як США, Австралія, Бразилія, Іспанія, Німеччина, Фінляндія, Таїланд, Тайвань і ОАЕ, запустили обидва у своїх комерційних мережах [9].

Такі країни, як Китай, Південна Африка, Швеція, Саудівська Аравія, Італія, Австрія та Угорщина, наразі розгорнули лише NB-IoT, але прагнуть прискорити впровадження технології LTE-M у найближчому майбутньому.

Роумінг LTE-M: пристрої IoT призначені не тільки для локальної роботи, але й підтримують підключення між країнами.

KPN, Orange, Swisscom і AT&T активували роумінг LTE-M у Північній Америці та Європі.

Конкуренція: за прогнозами впровадження NB-IoT перевершить LoRa до 2022 року, тоді як впровадження LTE-M перевищить впровадження SigFox для

окремих випадків використання. Оскільки і LTE-M, і NB-IoT розгорнуті на ліцензованому спектрі, це підвищує безпеку та забезпечує безперебійне підключення без перешкод з боку інших технологій.

Комерційна діяльність: телекомунікаційні оператори поступово припиняють комерційну діяльність 3G; повне закриття в усьому світі очікується до 2025 року.

Розгортання 5G: 5G вже розгорнуто в Китаї, Японії, Південній Кореї, США та деяких європейських країнах, включаючи Великобританію.

Проект партнерства третього покоління (3GPP) Release 14 прокладає шлях для технологій LTE-M і NB-IoT для відповідності вимогам 5G LPWA і підтримки сценаріїв використання в осяжному майбутньому.

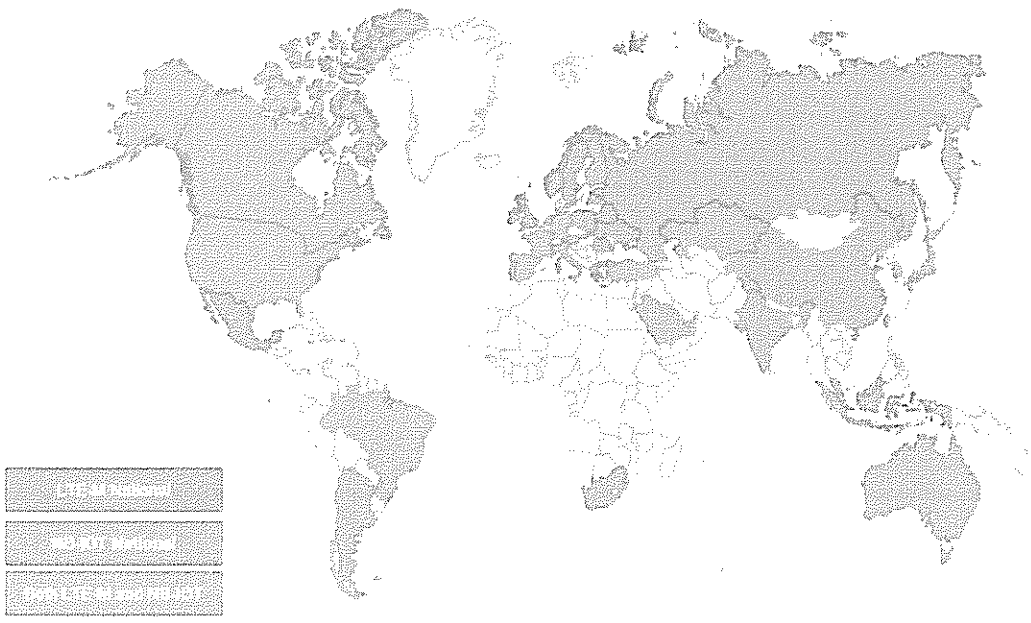


Рис.1.4. Географічне розгортання NB IoT та LTE-M

Що означають тенденції та розгортання для виробників, постачальників логістичних послуг і постачальників:

1. Передача всіх товарів в Інтернет: більшість споживачів не підключають свої товари до Інтернету, незважаючи на наявність вбудованого Wi-Fi для підключення. За допомогою LTE-M і NB-IoT підключення можна активувати під час процесу виробництва приладу, щоб продукт був підключений протягом

усього життєвого циклу, від виробництва на заводі до розповсюдження, доставки в роздрібний магазин і до доставки додому споживача.

2. Краще покриття: іноді пристрої з'являються у складних місцях, таких як віддалені сільські місця, ліси, ферми чи підземні зони, де зв'язок низький. Однак NB-IoT і LTE-M можна використовувати для моніторингу, оскільки ці технології дозволяють безперервно передавати невелику кількість даних, що значно покращує покриття.

3. Це допоможе логістичним компаніям отримати доступ до ширшої глобальної мережі без необхідності укладати угоди з кількома мережевими операторами. Отже, клієнти телекомунікацій з міжнародною присутністю можуть покладатися на одного постачальника зв'язку.

4. Коефіцієнт вартості: Оскільки за допомогою NB-IoT і LTE-M можна передавати дуже невеликий обсяг даних, вартість модулів і даних різко знизилася.

5. Безпечне та мінімальне втручання: і LTE-M, і NB-IoT розгорнуті на ліцензованому спектрі. Через цей спектр оператори мобільного зв'язку створюють виділені приватні мережі VPN для центру обробки даних виробника. Також легше забезпечити покриття та продуктивність із виділеним спектром, і це зводить перешкоди від інших радіотехнологій до мінімуму.

6. Відстеження активів і дистанційне керування: виробник/постачальник послуг логістики може збирати оперативні дані зі своїх бортових датчиків; це вимагає постійного відстеження та моніторингу активів із низьким порогом затримки.

1.3 Варіанти використання та додатки для 5G NB-IoT

Що стосується додатків Інтернету речей, одним із найвідоміших є SIoT, який є похідним від Інтернету речей, метою якого є використання принципів соціальних мереж у межах Інтернету речей, щоб дозволити пристроям розвивати соціальні взаємодії самостійно. Безпілотними транспортними засобами,

випадковими пішоходами, які переглядають свої телефони, насправді можна керувати за допомогою цієї інновації, як показано на рис.1.5.

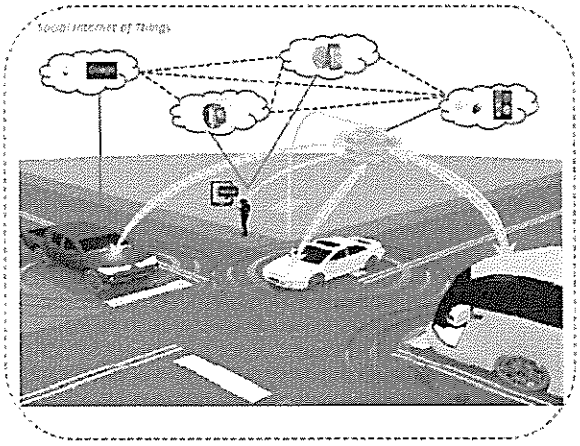


Рис. 1.5. Архітектура SIoT

Як показано на рис. 1.5. вище, тепер ви, випадкова людина, яка, можливо, не має нічого спільного з самокерованими автомобілями, можете покататися на одному з цих повністю автономних транспортних засобів. Мотивація SIoT в епоху IoT полягає в тому, що соціально-орієнтований підхід, як очікується, підтримуватиме відкриття, вибір і композицію послуг та інформації, що надаються розподіленими об'єктами та мережами [10]. Відповідно до SIoT існує набір форм соціалізації між об'єктами, які встановлюють відношення об'єкта спільного розташування та об'єкта спільної роботи, як це роблять люди, коли вони діляться особистим (наприклад, співжиття) або громадським (наприклад, робота) досвідом.

Інший тип зв'язку визначається для об'єктів, якими володіє один і той же користувач (наприклад, мобільні телефони, ігрові консолі тощо), який називається зв'язком об'єкта власності [11]. Відносини об'єкта власності встановлюються, коли пристрої IoT вступають у контакт із причин, суто пов'язаних із відносинами між їхніми власниками (наприклад, пристрої/сенсори, що належать друзям), і це називається відношенням соціального об'єкта [12]. Тоді результуюча соціальна мережа може бути сформована відповідно до вимог, щоб гарантувати мережеву навігацію, щоб виявлення інформації було виконано ефективно, як показано на

рис. 1. Більше того, використовуючи ступінь взаємодії між друзями, можна досягти високого рівня надійності, щоб усунути невизначеність отриманих послуг.

NB-IoT дозволяє реалізувати та прагнення широкого спектру варіантів використання та додатків без необхідності людської взаємодії. Ці варіанти використання та додатки можна розділити на три категорії: промисловий IoT, споживчий IoT і корпоративний IoT.

Промисловий IoT. Промисловий Інтернет речей (IIoT) спрямований на складні промислові процеси та системи з унікальними вимогами до мережі. Завдяки можливостям віддаленого моніторингу та контролю він зосереджується на підвищенні ефективності роботи, безпеки та стійкості. Типовими застосуваннями є: розумні фабрики, моніторинг сільського господарства та промислові активи.

Споживацький IoT. Автоматизуючи та спрощуючи повсякденні завдання, Consumer IoT прагне покращити якість життя та добробут окремих користувачів. Типовими застосуваннями є: розумні будинки, екологічний моніторинг та розумні офіси.

Корпоративний IoT. Корпоративний Інтернет речей – це наступна технологічна інновація, яка дозволяє фізичним «речам» із вбудованими обчислювальними пристроями (малі комп'ютери) брати участь у бізнес-операціях, усуваючи людську працю та підвищуючи загальну корпоративну ефективність. Типовими застосуваннями є: розумне місто та всі комунальні послуги, такі як як енергетична установка та управління.

1.4 Можливі стратегії розгортання NB-IoT

У цьому розділі пропонуються потенційні стратегії розгортання для масового розгортання NB-IoT, розглядаючи підтримку NB-IoT для невеликих стільників у сценаріях гетерогенної мережі.

HetNets — це ефективні стратегії розгортання мережі, у яких малі комірки об'єднуються в макрокомірки з метою покращення продуктивності з точки зору пропускної здатності, покриття та спектральної ефективності. Загалом, макростільники характеризуються вищою потужністю передачі та ширшим радіусом дії порівняно з малими осередками. Коли малі комірки накладаються на макростільники, перешкоди стають проблемою, особливо для користувачів малих країв комірки. Було запропоновано кілька методів придушення перешкод, оцінки та координації, які включають стрибкоподібні зміни частоти, повторне використання частоти, керування потужністю тощо; однак компроміси щодо продуктивності для запропонованих методів для макроелементів і малих комірок все ще є складними [13].

Подібним чином очікується, що NB-IoT співіснуватиме з нині розгорнутою застарілою технологією LTE, а також майбутніми мережами 5G. Це ставить під сумнів існуючі методи керування перешкодами, тобто чи вони застосовні до нової технології, оскільки очікується, що NB-IoT підтримуватиме різні класи потужності, зберігаючи низьку складність, що може серйозно вплинути на якість оцінки каналу та, отже, на якість оцінки перешкод. У співіснуванні NB-IoT із застарілими стільниковими мережами можливі наступні сценарії розгортання:

- синхронне розгортання NB-IoT у всіх малих осередках;
- асинхронне розгортання NB-IoT у всіх малих осередках;
- синхронне розгортання NB-IoT у малих комірках і макросотах;
- асинхронне розгортання NB-IoT у малих стільниках і LTE у макростільниках.

Ці сценарії, як показано на рис.1.6. , детально описані нижче, а саме коли NB-IoT розгорнуто в макростільнику, а LTE — у малих комірках. Коли LTE — у макростільнику, а NB-IoT — у малих комірках Коли NB-IoT — у макростільнику, а малі комірки підтримують як NB-IoT, так і LTE. Коли LTE знаходиться в макросотах, а LTE/NB-IoT – у малих клітинах

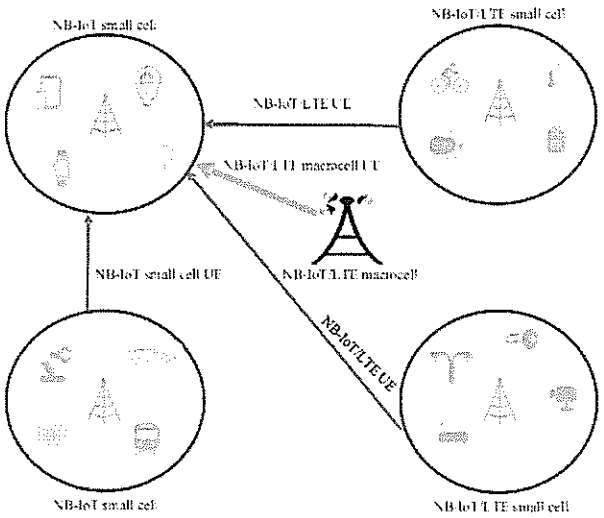


Рис.1.6. Підсумок стратегій розгортання NB-IoT

Синхронне розгортання NB-IoT у всіх малих осередках. Це стратегія розгортання NB-IoT, яка ввімкнена в усіх малих комірках за допомогою тих самих блоків фізичних ресурсів. Усі малі комірки синхронізуються таким чином, що з однаковими PRB усі UE NB-IoT використовують налаштовану потужність передачі незалежно від максимальної потужності передачі. Це означає, що навіть якщо пристрої NB-IoT можуть підтримувати різні класи потужності, наприклад 14 дБм, 20 дБм або 23 дБм, пристрої NB-IoT будуть налаштовані лише на використання мінімально дозволеної потужності передачі, щоб уникнути спільного перешкоди каналу для інших UE, які використовують ті самі радіоресурси. У цій стратегії керування потужністю може бути ключовою функцією для забезпечення необхідної продуктивності. Однак UE на краю стільника все ще можуть страждати від проблеми перешкод.

Асинхронне розгортання NB-IoT у всіх малих осередках. Ця стратегія розгортання використовується таким чином, що NB-IoT увімкнено у всіх малих комірках за допомогою різних блоків фізичних ресурсів. Ця реалізація може уникнути перешкод між UE NB-IoT від різних малих стільників; однак це може призвести до перешкод на одному каналі між UE NB-IoT і LTE, які використовують ті самі радіоресурси. Під час розгортання згідно з цією стратегією вкрай важливо запровадити належне частотне планування, а також правильну конфігурацію живлення для пристроїв NB-IoT. Як видно з рівня

техніки, у деяких роботах запропоновано блокування радіоресурсів для суміжних комірок для ресурсів, які вже зайняті NB-IoT, навіть у комірках, для яких NB-IoT не ввімкнено.

Синхронне розгортання NB-IoT у малих і макросотах. У цій стратегії NB-IoT увімкнено в малих комірках, а також у макро комірках на тих же PRB. Macrocell UE налаштовано на використання більшої потужності передачі порівняно з малими стільниковими UE, зберігаючи ті самі PRB для NB-IoT, а інші залишають для застарілого LTE. Можливі перешкоди в спільному каналі можуть виникнути в UE з малими стільниковими межами, якщо UE заплановано на ті самі одиниці ресурсу. Вплив може додатково посилитися для UE з мобільністю, що може вимагати використання передачі обслуговування для згладжування переходу UE від однієї обслуговуючої комірки до іншої. З нашого огляду жодна робота не розглядала механізм усунення перешкод для такого випадку. Вкрай важливо використовувати існуюче географічне планування, повторне використання частоти, стрибкоподібну зміну частоти та керування потужністю, враховуючи низьку складність, але високий діапазон покриття NB-IoT.

Асинхронне розгортання NB-IoT у малих стільниках і LTE у макростільниках. У цій стратегії NB-IoT використовує окремі PRB між малими та макростільниками. Це означає, що один або більше PRB використовуються для малих комірок, а різні PRB для макростільників. Якщо PRB не сплановані належним чином, користувачі NB-IoT із суміжних комірок (з використанням тих самих одиниць ресурсу) можуть постраждати від перешкод. Крім того, користувачі LTE, які використовують ті самі елементи ресурсу, можуть створювати перешкоди UE з малими комірками або макростільниками. Для контролю перешкод можна використовувати різні конфігурації керування потужністю передачі.

Вибір стратегії розгортання залежить від кількох факторів, таких як вимоги до сценарію використання, умови навколишнього середовища, якість обладнання тощо. Вкрай важливо запровадити кращу оцінку перешкод, пом'якшення або

методи керування, які забезпечать кращу продуктивність і спектральну ефективність для масивних NB - Розгортання IoT разом з іншими технологіями.

1.5 Дослідення регіональних відмінностей мереж та подальші перспективи їх розвитку

На світовому ринку IoT домінують три регіони. З 24,1 мільярда підключених пристроїв IoT, які Transforma Insights прогнозує на 2030 рік, регіон Великого Китаю (включає Китай і Тайвань) є найбільшим із 6,9 мільярда. Далі йде Європа з 5,5 млрд і Північна Америка з 5,2 млрд. Решта світу має 6,6 млрд. Щоб краще зрозуміти регіональну динаміку, мною виконано огляд даних цифр.

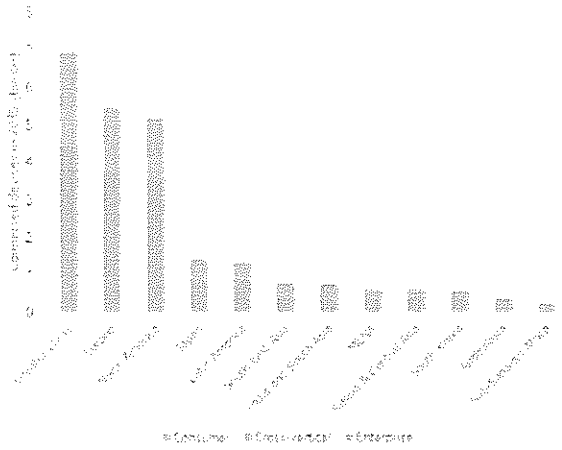


Рис.1.7. IoT підключення в 2030 р.

Transforma Insights розподіляє ринок на найвищому рівні між споживчими, крос-вертикальними (включаючи загальні пристрої, які використовуються компаніями, але які не є специфічними для цієї галузі, наприклад офісні принтери чи транспортні засоби компанії) та корпоративними (для пристроїв, які є специфічними для конкретна галузь, наприклад розумна мережа для комунальних послуг або платіжні термінали для роздрібної торгівлі). Першість Китаю над Європою та Північною Америкою значною мірою пояснюється великим обсягом крос-вертикальних пристроїв. Це стає більш очевидним, коли аналізується кількість пристроїв на душу населення.

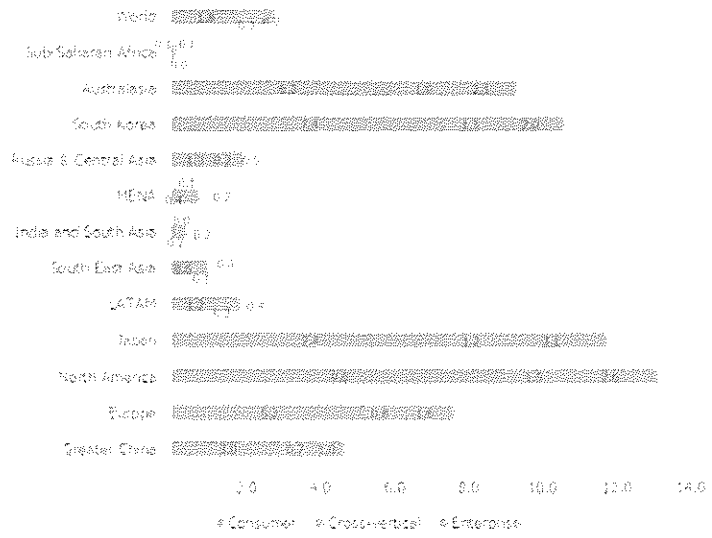


Рис.1.8. IoT підключень на душу населения в 2030 р.

У Китаї споживчі пристрої на душу населення значно нижчі: 3 на душу населення проти 5,2 у Європі та 9 у Північній Америці. Подібна картина складається з Enterprise: 1 на душу населення в Китаї порівняно з 1,6 у Європі та 2,6 у Північній Америці. На відміну від цього, Китай набагато точніше відстежує крос-вертикальні пристрої: 0,7 проти 0,8 у Європі та 1,5 у Північній Америці.

Насправді, враховуючи також Японію, Південну Корею та Австралію, існує відносно постійна пропорція міжвертикальних; набагато більше, ніж у розбіжних секторах споживачів і підприємств. Міжвертикальний сектор, як правило, включає менш складні випадки використання IoT, що значною мірою обумовлюється кількістю працівників, підприємств або домогосподарств. Корпоративні випадки використання, як правило, набагато більш спеціалізовані, і тому не дивно, що надають перевагу регіонам, які з більшою готовністю інвестують в автоматизацію процесів.

Заглиблюючись у категорію «Підприємства», дивлячись на дохід за галузями, варто відзначити, що Китай, незважаючи на те, що він залишається найбільшим ринком, загалом лідирує лише в тих сегментах, які керуються нормативними актами, наприклад, впровадження інтелектуальних лічильників у електроенергетиці, газі, Steam & A/C і державна категорія.

Він суттєво відстає від Європи та Північної Америки в таких секторах, як транспортування та зберігання, адміністративний (в якому домінують безпека та автоматизація будівель) та фінанси та страхування. Там, де ринком керує державний сектор, Китай займає лідируючі позиції, але там, де він залежить від інвестицій приватного сектора, вертикаль, як правило, відстає. Єдиним помітним винятком є роздрібна та оптова торгівля, де Китай, схоже, прийняв платіжні термінали та безготівкове суспільство загалом, що призвело до більшого впровадження.

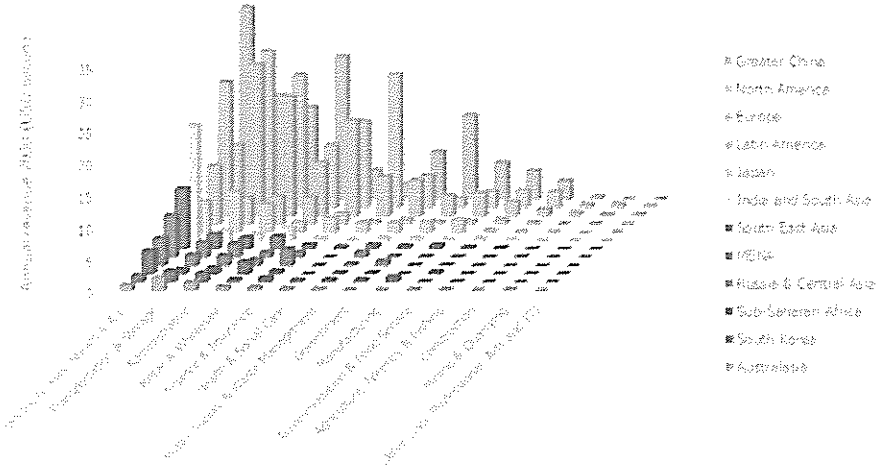


Рис.1.9. IoT дохід від галузевих програм за галузями в 2030 р.

Інша вражаюча відмінність між трьома основними регіонами – відносна важливість охорони здоров'я та соціального забезпечення в Північній Америці. США протягом тривалого часу були домінуючим ринком додатків для охорони здоров'я IoT, що відображає більший і багато в чому спритніший сектор із більшим акцентом на профілактиці.

Звертаючись до решти світу, ми зазвичай знаходимо такі густонаселені ринки, як Індія, Південна Азія та Південно-Східна Азія, де домінують інтелектуальні лічильники як найбільший сектор, що приносить дохід. На більш розвинених ринках, як правило, домінують комерційні сектори, такі як

транспортування та зберігання, фінанси та виробництво (останнє особливо помітно в Японії та Південній Кореї).

Ключовий урок із цього короткого занурення в прогнози полягає в тому, що у 2030 році між регіонами будуть значні відмінності в структурі впровадження IoT. Мало того, ринкова адресність також є досить регіональною. Коли Transforma Insights збирала свою географічну сегментацію, вона включала значну увагу до унікальності та відтворюваності рішень, тобто до того, наскільки схожі економіки та наскільки легко рішення можна перенести з однієї географії в іншу.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ NB-IOT В МЕРЕЖАХ LTE

2.1 Огляд архітектури NB-IOT

В ядрі мережі відбулися значні зміни. Перш за все з'явився новий об'єкт, та ряд механізмів, які визначаються стандартом "CIoT EPS Optimization" та покращення опорної мережі для мобільного інтернету речей [10].

Як зазначалось в досліджуваній літературі, в безпроводових мережах є декілька основних каналів комунікацій, що звуться Control Plane (CP) та User Plane (UP). Control Plane призначений для обміну службовими повідомленнями між різними елементами мережі і служить для реалізації мобільності (Mobility management) приборів (UE) і підтримки процесу передачі даних (Session Management). User Plane - це, власне, канал передачі користувальницького трафіку. У класичному LTE розподіл CP і UP по інтерфейсів представлено на рис.2.1.

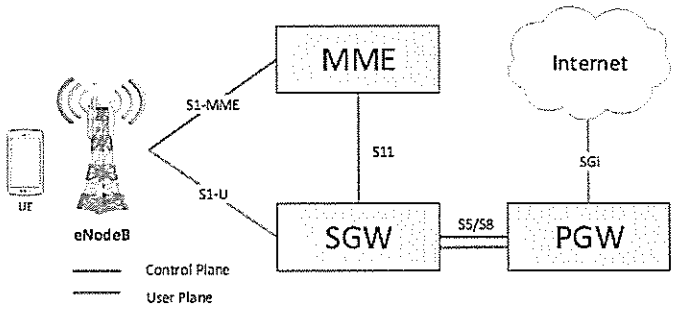


Рис. 2.1. Розподіл CP і UP інтерфейсів у класичному вигляді LTE

Процес оптимізації CP і UP у мережах NB-IoT виконується на об'єктах MME, SGW та PGW, що умовно групуються в один елемент і назвоютьчя C-SGN (Cellular IoT Serving Gateway Node). Також технологія передбачає створення нового об'єкту мережі - SCEF (Service Capability Exposure Function). Інтерфейс між MME і SCEF називають T6a ві реалізовується на базі протоколу DIAMETER. Незважаючи на те, що DIAMETER це сигнальний протокол, в NB-IoT він адаптований для передачі малихн обсягів non-IP даних. Судячи по займенуванню, SCEF - є елементом експонування можливостей сервісу. Іншими словами, SCEF ховає складну мережу оператора, та знімає з розробників додатків необхідність ідентифікації і аутентифікації мобільних пристроїв (UE), надаючи можливість

серверам додатків (Application Server, далі AS) отримувати дані і управляти пристроями через єдиний API інтерфейс [11].

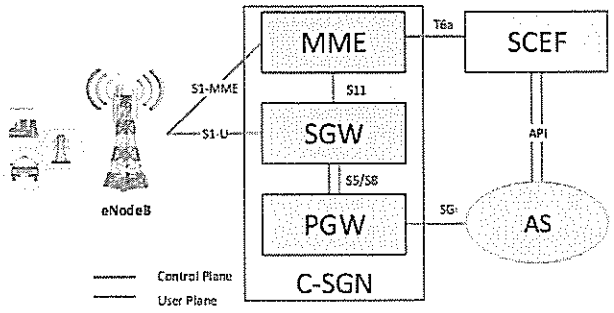


Рис.2.2. Розподіл CP і UP інтерфейсів для NB-IoT

UE становиться ідентифікатором, а саме телефонний номер (MSISDN) чи IP адреса, так само як і в попередніх мережах 2G / 3G / LTE, а «external ID», який визначений стандартом в звичному для розробників додатків форматі « @ ».

DoNAS (Data over NAS). Це механізм, який був розроблений для оптимізації передачі малої кількості даних. У звичайному LTE пристрій користувача при реєстрації в мережі встановлює PDN connection (далі PDN) через eNodeB до MME-SGW-PGW. З'єднання UE-eNodeB-MME - це так званий "Signaling Radio Bearer" (SRB). При необхідності передати / отримати дані UE встановлює ще одне з'єднання з eNodeB - "Data Radio Bearer" (DRB), для передачі користувальницького трафіку до SGW і далі на PGW (інтерфейси S1-U і S5 відповідно). Після закінчення обміну і при відсутності трафіку протягом деякого часу (зазвичай 5-20 секунд) ці сполуки розриваються і пристрій переходить в режим очікування або "Idle Mode". По можливості обмінюється новою кількістю інформації SRB та DRB переустановлюються.

У NB-IoT передача призначеного для користувача трафіку може здійснюватися через сигнальний канал (SRB), в повідомленнях протоколу NAS (http://www.3gpp.org/more/96-nas). Встановлення DRB більше не потрібно. Це значно знижує сигнальну навантаження, заощаджує радіоресурс мережі і, найважливіше - подовжує термін життя батареї пристрою [10].

На ділянці eNodeB - MME призначаються користувачеві дані починають передаватися по інтерфейсу S1-MME, що не було в попередній LTE, та використовується для цього протокол NAS, в якому з'являється "User data container".

Для передачі даних "User Plane" від MME до SGW використовужється новий інтерфейс S11-U, призначений для передачі малих обсягів призначених для користувача динячих. В основу протоколу S11-U кладутьGTP-U v1, який використовується для передавання User Plane та на наступних інтерфейсах мережі 3GPP-архітектури.

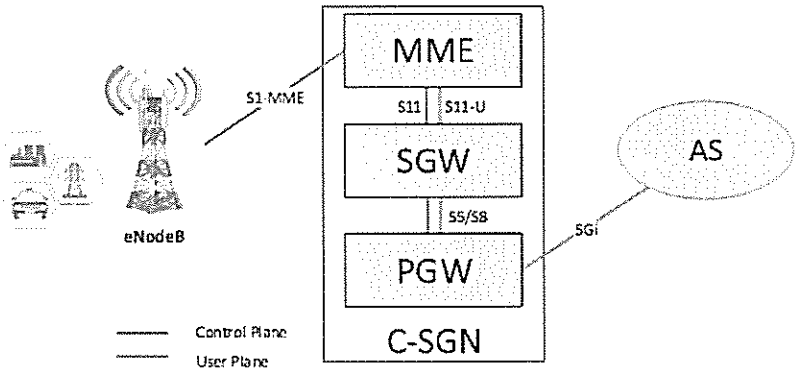


Рис. 2.3. Приклад передачі даних

NIDD (non-IP data delivery). В рамках подальшої оптимізації механізмів передачі малих обсягів даних, на додаток до вже існуючих типів PDN, таким як IPv4, IPv6 і IPv4v6, з'явився ще один тип - non-IP. В цьому випадку UE присвоюють IP адреса, і дані передаються без використання протоколу IP. На те є кілька причин:

IoT пристрої, такі як датчики, можуть передавати дуже малі обсяги даних, 20 байт і навіть менше. З огляду на, що мінімальний розмір IP заголовка - 20 байт, інкапсуляція в IP іноді може бути досить дорогим задоволенням;

Немає необхідності реалізації в чіпі IP-стека, що веде до їх здешевлення (питання до обговорення в коментарях) [12].

За великим рахунком, IP адреса необхідна IoT пристроїв, щоб передавати дані через інтернет. У концепції NB-IoT SCEF виступає в ролі єдиної точки

підключення AS, і обмін даними між пристроями і серверами додатків відбувається за допомогою API. При відсутності SCEF non-IP дані до AS можуть передаватися через Point-to-Point (PtP) тунель від PGW і інкапсуляція в IP буде проводитися вже на ньому.

Все це вписується в парадигму NB-IoT - максимальне спрощення та здешевлення пристроїв.

Механізми енергозбереження PSM і eDRx. Однією з переваг мереж LPWAN є їх енергоефективність. Вказується до 10 років роботи пристроїв які використовують тільки одну батарею. Розберемося, яким чином досягаються такі значення, як:

a.PSM (Power saving mode). Енергозберігаючий режим PSM надає можливість пристрою на тривалий час виключати радіо модуль, та залишає пристрій зареєстрованим, та дозволяє не встановлювати знову PDN.

Для того щоб мережа фіксувала, що пристрій, як і раніше є, він періодично ініціює процедуру актуалізації - Tracking Area Update (TAU). Задається частота даної процедури за допомогою таймера T3412, перабчи значення пристрою вчас процедури Attach чи чергового TAU. У класичному LTE дефолтний значення цього таймера 54 хвилини, а максимальне - 186 хвилин. Однак, для забезпечення високої енергоефективності, необхідність виходу в радіоефір кожні 186 хвилин - це занадто дороге задоволення. Для вирішення цієї проблеми і був розроблений механізм PSM [9].

Пристрій може активувати режим PSM виконуючи передачу в повідомленнях «Attach Request» чи «Tracking Area Request» значення обох таймерів T3324 і T3412-Extended. Процес першого- визначити час, в який пристрій може бути доступний після стрибка в «Idle Mode». Ігнший - це час, через який має провестись TAU, тоді його значення зможе досягати 35712000 секунд або 413 діб. В залежності від налаштувань, MME має змогу прийняти значення таймерів, які отримані від пристрою, чи змінити їх, виконавши їх передачу з новими значення в інформації «Attach Accept» або «Tracking Area Update Accept». Далі пристрій зможе не включати радіо модуль 413 діб і залишаючись

зареєстрованим в мережі. Таким чином досягається колосальна економія мережевих ресурсів та енергоефективність пристроїв.

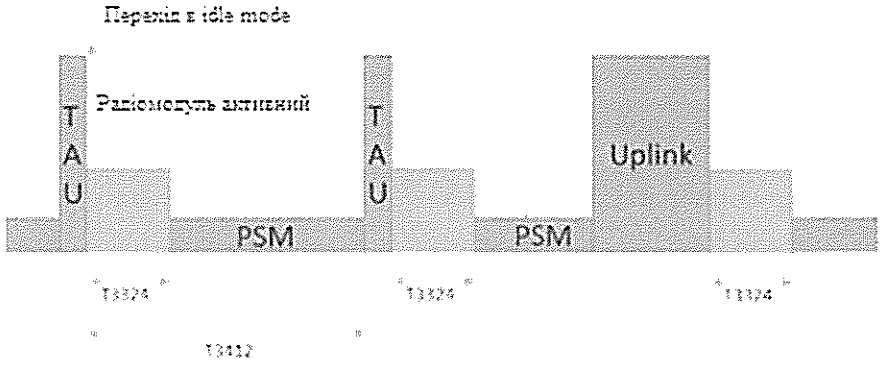


Рис. 2.4. Структура механізму працездатності в режимі енергозбереження

Однак в цьому режимі пристрій недоступно тільки для вхідних зв'язків. Якщо необхідно виконати передачу в сторону сервера додатків, пристрій має змогу в коли звгодно вийти з PSM і передати дані, залишившись активним на протязі таймера T3324 для можливості прийомати інформацію від AS (при надходженні).

б. eDRX. eDRX є розширеним режимом прийому але переривчистим. При передачі інформації на пристрій, що знаходиться в «Idle mode», мережа виконує процедуру оповіщення - «Paging». В режимі пейджінга він ініціює встановлення SRB для звя'язку з мережею. Щоб не прогавити повідомлення Paging, яке адресоване йому, пристрій має постійно контролювати ефір, що є достатньо енергозатратно [10].

eDRX є режим, у якому пристрій робить прийом інформації не в постійному режимі від мережі, а періодами. У процесі процедур Attach чи TAU пристрій узгоджує з мережею деякі проміжки, під час яких виконується прослуховування ефіру. В дані проміжки також проходить процедура Paging. У режимі eDRX дія пристрою роздроблюється на певні цикли (eDRX cycle). На старті кожного циклу присутнє так зване «вікно пейджінга», мається на увазі час в який пристрій прослуховує радіоканал. Після закінчення PTW пристрій відключає радіо модуль до кінця циклу.

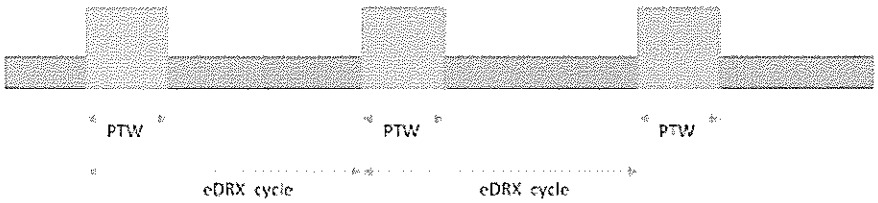


Рис. 2.5. Структура механізму працездатності в режимі розширеного переривчастого прийому

HLCOM (high latency communication). При передачі повідомлення, дані в Uplink об'єкт може виходити з з цих двох режимів зберігання енергії, не очікуючи коли закінчиться PSM чи eDRX цикл. Але передати дані на пристрій є можливість, тільки тоді коли воно активно.

Функціонал HLCOM чи комунікація з чималими затримками є буферизация Downlink пакетів на SGW на годину, коли пристрій перебуває в режимі енергозбереження та недоступно для комунікації. Буферізірованний пакети будуть доставлені, як тільки пристрій вийде з PSM, зробивши TAU або передавши Uplink трафік, або, коли настане PTW.

Це, безумовно, вимагає усвідомлення з боку розробників IoT-продуктів, оскільки комунікація з пристроєм є не в реальній годині і має певні підходи до побудови бізнес-логіки функціонування додатків [11].

2.2 Аналіз частотного спектру технології NB-IoT

Система NB-IoT була задумана на основі широкого повторного використання системи LTE. Ця конструкція дозволяє швидко та гнучко розгортати застарілі інфраструктури стільникових мереж LTE, забезпечуючи при цьому співіснування двох технологій. Насправді система NB-IoT повторно використовує схеми модуляції для передач по низхідній і висхідній лінії зв'язку, а саме множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA) і множинний доступ з єдиним частотним поділом каналів (SC-FDMA), відповідно.

Детальне порівняння цих двох схем модуляції з кількома несучими наведено в [14]. Передачі по низхідній лінії зв'язку NB-IoT займають лише 12 піднесучих по 15 кГц кожна, що відповідає в LTE одному блоку фізичних ресурсів (PRB) із смугою пропускання 180 кГц. Подібно до низхідної лінії зв'язку, для передачі висхідної лінії зв'язку виділено смугу пропускання 180 кГц. Крім того, у LTE використовується та сама структура кадрів із відмінностями у відображенні каналів і сигналів [15]. Ці діапазони в основному є діапазонами LTE, які тепер можна використовувати для зв'язку NB-IoT.

Режими роботи. Повітряний інтерфейс NB-IoT був оптимізований для забезпечення співіснування з операторами LTE, зберігаючи продуктивність системи LTE. У цьому контексті три режими роботи були визначені 3GPP для NB-IoT:

- внутрішньосмуговий режим: сигнал NB-IoT займає один PRB із смуги пропускання LTE.

- режим захисної смуги: сигнал NB-IoT займає один PRB із невикористаних PRB захисної смуги пропускної здатності LTE.

- автономний режим: сигнал NB-IoT призначений для того, щоб займати звільнений спектр системи глобальної системи мобільного зв'язку (GSM). У цьому випадку сигнал NB-IoT все ще займає 180 кГц від 200 кГц несучої GSM із 10 кГц смуги захисту по обидва боки спектру.

Ці режими роботи підсумовано на рис. 2.6.

На цьому рисунку PRB проіндексовані від 0 до N-1, де N залежить від смуги пропускання LTE (до N=100 у смузі пропускання 20 МГц).

Внутрішньосмуговий режим роботи є найбільш привілейованим режимом через переваги з точки зору економії коштів і простоти інтеграції через застарілі мережі LTE. Однак у цьому режимі опорний носій2 NBIoT може приймати лише попередньо визначений набір можливих PRB. Ці можливі індекси PRB пов'язані з використаною пропускною здатністю LTE. Шість середніх PRB системи LTE завжди заборонені для NB-IoT, щоб уникнути конфліктів між передачами NB-IoT

і деякими основними каналами та сигналами LTE, такими як фізичний канал трансляції та сигнали синхронізації.

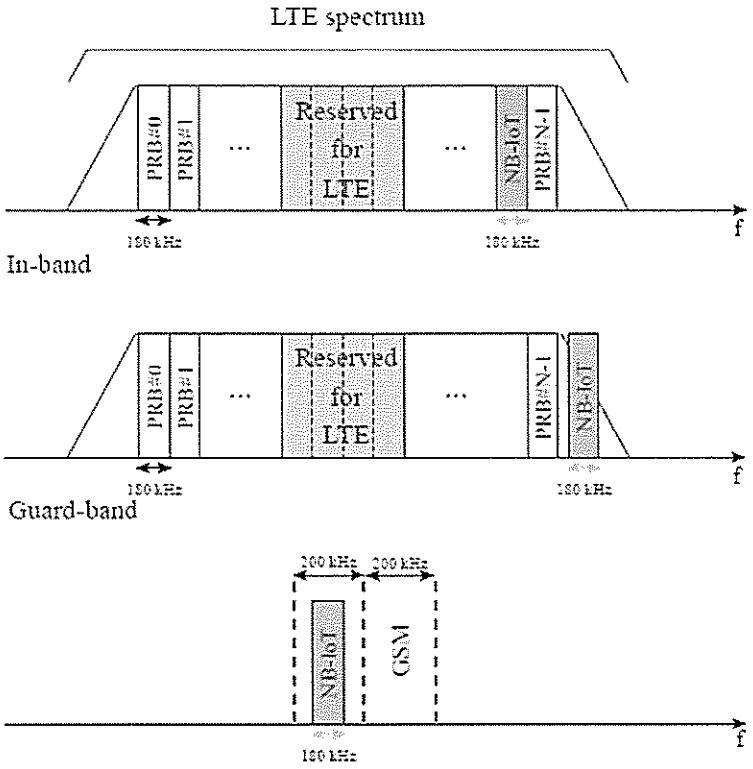


Рис. 2.6. Три можливі режими роботи NB-IoT: PRB із смугою пропускання 180 кГц може передаватися в діапазоні LTE (внутрішньосмуговий режим), на краю діапазону LTE (режим захисної смуги) або в звільнені GSM канали (автономний режим)

Для режиму захисної смуги будь-який PRB можна використовувати для передач NB-IoT. У цьому підручнику ми зосередимося лише на внутрішньосмуговому режимі роботи, оскільки він є найбільш привілейованим режимом завдяки згаданим раніше перевагам. Однак ми надаємо необхідну інформацію для визначення методів роботи інших режимів. Фактично, для всіх вищезазначених режимів роботи можна розгорнути кілька опорних носіїв NB-IoT в одній комірці мережі. У той же час 3GPP також запропонував використовувати так звані non anchor3 несучі для збільшення пропускної здатності NB-IoT-стільників.

Режим передачі. Система NB-IoT була вперше задумана для роботи в режимі дуплексного зв'язку з частотним поділом (FDD) у 3GPP Release 13 [15]. Це означає, що передача по низхідній і висхідній лінії зв'язку виконується в повністю розділених діапазонах частот. Іншими словами, eNB і UE будуть передавати в одній смузі частот і приймати в іншій. Однак через обмеження модулів UE NB-IoT щодо низької потужності, низької складності та часу автономної роботи система на стороні UE працює в режимі напівдуплексного FDD типу B (HD-FDD). Це означає, що UE може передавати або приймати, але не може робити те й інше одночасно. Крім того, між передачами вставляється захисний часовий інтервал. Цей тип режиму передачі був обраний для UE через низьку обробну здатність його апаратного забезпечення. Навпаки, eNB працює в повнодуплексному режимі FDD, де він може одночасно передавати та отримувати (точно як у режимі LTE FDD). Нещодавно в 3GPP Release 15 стало можливим працювати з NB-IoT у режимі дуплексного зв'язку з розділенням часу (TDD).

Ілюстрація режиму передачі HD-FDD типу B наведена на рис.2.7. Можна побачити, що між смугою пропускання низхідної та висхідної лінії завжди існує частотний розрив, який називається «дуплексним інтервалом» (тільки для діапазону FDD). Значення цього дуплексного інтервалу залежить від використовуваного діапазону LTE із набору діапазонів, визначеного 3GPP у [15]. На цьому рисунку проілюстровано передачу з точки зору UE NB-IoT.

Пропонується, що UE спочатку отримує сигнал низхідної лінії зв'язку від eNB, потім відповідає через захисний час і, нарешті, звертається до наступної передачі низхідної лінії зв'язку після іншого захисного часу. У NB-IoT захисний час між передачами можна налаштувати. Однак існує мінімальний захисний час, який необхідно підтримувати між різними передачами висхідної та низхідної лінії зв'язку.

Таблиця 2.1.

Список індексів lte prb, що може використати nb-iot для внутрішнього режиму роботи

LTE system bandwidth	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
LTE PRB indices	2, 12	2, 7, 17,22	4, 9, 14, 19, 30, 35, 40, 45	2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 42, 47, 52, 57, 62, 67, 72	4, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95

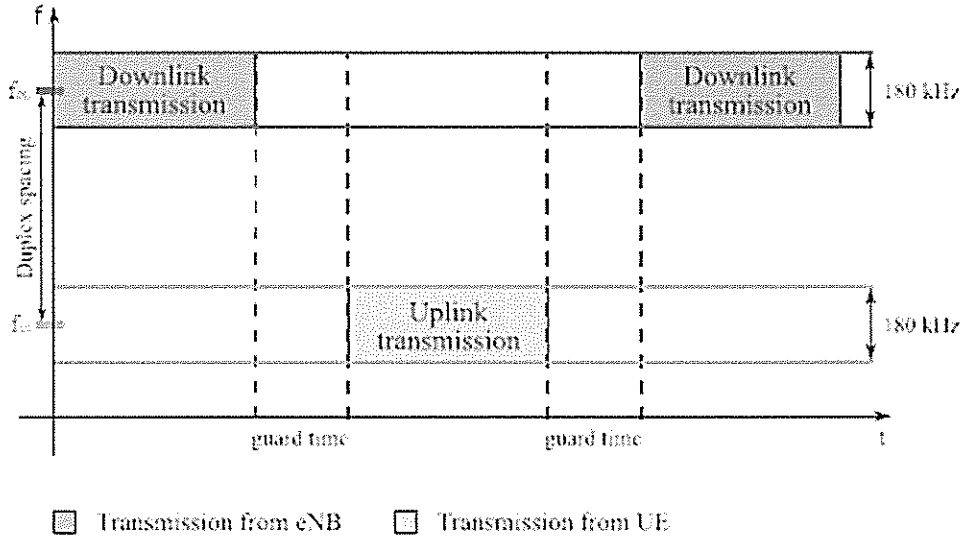


Рис. 2.7. Ілюстрація напівдуплексного дуплексного зв'язку з частотним розподілом (HDFDD) типу B: передачі по низхідній і висхідній лінії зв'язку розділені як за частотою, так і за часом

Система кадрування NB-IoT. Система NB-IoT дотримується того самого принципу формування кадрів, що й LTE, де передачі по низхідній і висхідній лінії зв'язку організовані в радіокадри тривалістю 10 мс кожен. Зберігається та сама структура радіокадру, що й у LTE, але з деякими відмінностями щодо каналів і відображення сигналів.

Кожен кадр складається з 10 субкадров (SF), де кожен субкадр має тривалість 1 мс і складається з двох часових інтервалів тривалістю 0,5 мс кожен.

Індексація радіокадрів виконується за допомогою «системного номера кадру (SFN)». На рис. 4 показана система фреймування стандарту NB-IoT.

Можна побачити, що індекс SFN має максимальне значення 1023 для врахування 1024 кадрів (= 1024×10 мс = 10,24 с). Крім того, в NB IoT було введено концепцію гіперкадру для підрахунку періодів SFN (тобто для підрахунку періодів 1024 кадрів). Таким чином, термін «гіпер-SFN (H-SFN)» використовується для представлення індексу періодів SFN, які мають максимальне значення 1023. Це означає, що лічильник H-SFN повертається до нуля після тривалості 1024 періодів SFN, які відповідає 1024×10,24 с ≈ 2 год 54 хв 46 с.

1.Фізичний склад сигналу: на рівні сигналу один субкадр низхідної лінії зв'язку NB-IoT складається з 12 14 елементів ресурсу (RE), де 12 і 14 відповідають кількості піднесучих і символам мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM). підрамника відповідно. Рис.2.8. показує формат підкадрів низхідної лінії зв'язку, де k означає індекс піднесучої, а l - індекс символу OFDM.

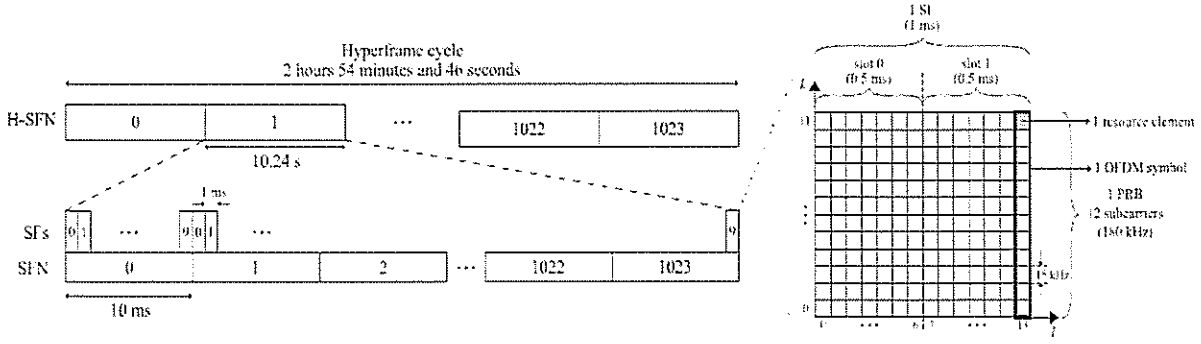


Рис.2.8. Система кадрування NB-IoT у низхідній лінії зв'язку

У системі LTE для символів OFDM можна використовувати два формати циклічного префікса (CP): звичайний і розширений. Розширений формат зменшує кількість символів OFDM на слот до шести. У NB-IoT розширений CP не дозволяється, тому кожен слот строго складається з семи символів OFDM. Так само, як і в LTE, CP першого символу OFDM кожного слота триває 5,2 μc, тоді як

кожен CP інших шести символів триває 4,7 μс. Крім того, єдиний можливий інтервал піднесучих у низхідній лінії зв'язку становить 15 кГц.

У висхідній лінії зв'язку використовується така ж часова діаграма, як і для низхідної лінії зв'язку, за винятком того, що існує два можливих формати інтервалу піднесучих: 15 кГц і 3,75 кГц. Якщо інтервал 15 кГц використовується для передач по висхідній лінії зв'язку, системне кадрування буде таким самим, як і в низхідній лінії зв'язку (тобто один кадр = 10 мс = 10 SF).

Однак, якщо використовується інтервал 3,75 кГц, зміниться формат радіокадру та представлення елементів ресурсу. На рис. 5 показано вплив на сітку ресурсів при використанні інтервалу 3,75 кГц. Насправді використання такого розносу в смузі пропускання 180 кГц забезпечить 48 піднесучих, а не 12 у порівнянні з розносом 15 кГц.

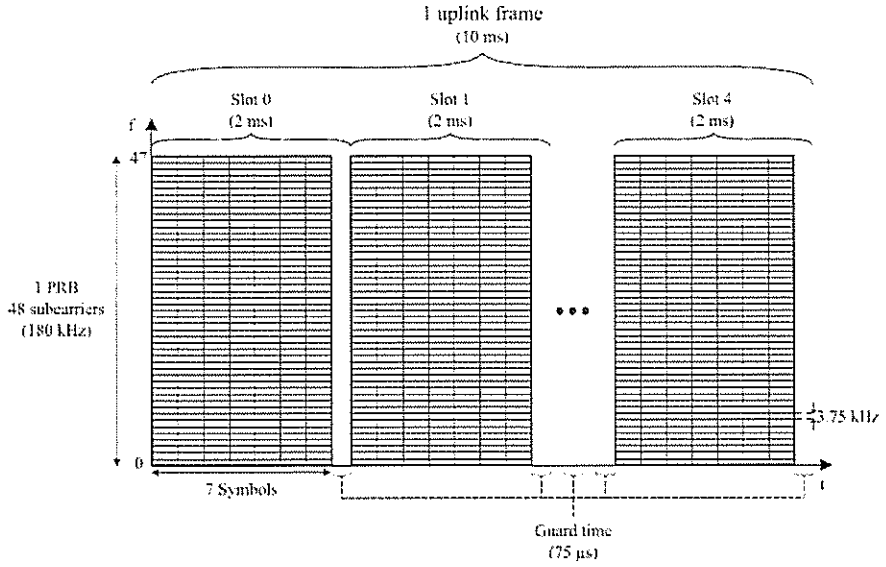


Рис.2.9. Система кадрування NB-IoT у висхідній лінії зв'язку з інтервалом піднесучих 3,75 кГц

Відповідно, тривалість слота в чотири рази більша з інтервалом 3,75 кГц, що призводить до довжини слота 2 мс. Це означає, що радіокадр у висхідній лінії зв'язку буде складатися лише з п'яти слотів по 2 мс кожен. Слот у такій конфігурації все ще складається з семи символів, але для кожного символу використовується однакова тривалість CP. Тривалість кожного CP і символу

становить 8,33 с і 266,67 μс відповідно. Однак, щоб досягти тривалості 2 мс для кожного слота, захисний час 75 μс залишається порожнім після 7-го символу. Таким чином, можна перевірити, що 7 ×(266:67 + 8:33) + 75=2000 с μс= 2 мс. Крім того, у висхідній лінії зв'язку лічильники SFN і H-SFN все ще застосовуються, як і в низхідній лінії зв'язку.

2. Параметри передачі в низхідній і висхідній лінії зв'язку: у NBIoT можливі два варіанти передачі: однотональний і багатотональний. Для передач по низхідній лінії зв'язку багатотональний варіант є єдино можливим, у якому використовуються 12 доступних піднесучих. Навпаки, передачі по висхідній лінії зв'язку можуть здійснюватися з використанням обох варіантів, але вони залежать від використовуваного інтервалу піднесучої. У цьому відношенні, якщо використовується інтервал 3,75 кГц, можливий лише однотональний варіант (тобто використовується одна піднесуча). Навпаки, у випадку інтервалу 15 кГц, два варіанти можуть бути виконані через чотири можливі конфігурації передачі: одна, три, шість або 12 піднесучих. На додаток до цих варіантів передачі, у специфікаціях 3GPP [16] була введена інша концепція для передачі по висхідній лінії зв'язку.

Він визначає «одиницю ресурсу (RU)», яка представляє найменшу одиницю, яку можна передати у висхідній лінії зв'язку, незалежно від використовуваного інтервалу піднесучої та залежить лише від варіанту передачі (тобто однотонального або багатотонального). Табл.2.2. підсумовує кількість слотів, кількість елементів ресурсу, кількість символів і тривалість одного RU відповідно до вибраного варіанту передачі.

Таблиця 2.2.

Варіанти передачі в висхідній лінкі

Інтервал піднесучої	Номер піднесучої	Кількість слотів	Кількість елементів ресурсу	SC-FDMA кількість символів	RU тривалість
3,75 Ггц	1	16	112	112	32 мс
	1	16	112	112	8 мс

15 Ггц	3	8	168	28	4 мс
	6	4	168	28	2 мс
	12	2	168	14	1 мс

Для однотональних передач із використанням інтервалу 15 кГц або 3,75 кГц один RU матиме точно таку ж кількість RE (112 RE). Однак, як було зазначено раніше в цьому розділі, коли використовується інтервал 3,75 кГц, тривалість інтервалу буде в чотири рази більша, ніж інтервал інтервалу 15 кГц. Таким чином, RU триватиме 8 мс з інтервалом 15 кГц і 32 мс з інтервалом 3,75 кГц. Для багатотональних передач один RU матиме 168 RE для будь-якої конфігурації (тобто три, шість або 12 піднесучих). У таких випадках тривалість RU буде меншою, якщо використовується більша кількість піднесучих, оскільки більшу кількість RE можна передати в межах меншої тривалості.

2.3 Аналіз передавальної частини систем NB-IoT

У цьому підрозділі увагу зусереджено на передавальній частині рівня PHY системи NB-IoT. Ми розглядаємо всі канали та сигнали, які використовуються для передачі по низхідній і висхідній лінії зв'язку, і надаємо ілюстрацію ланцюга передачі на стороні eNB і UE.

Таблиця 2.3.

Канали та сигнали системи NB-IoT

	Тип	Ім'я	Роль і використання
Downlink	Сигнали	NPSS	Час ті частота синхронізації
		NPSS	Перевезення стільникового ідентифікатора
		NRS	Оцінка каналу
		NPRS (R14)	Позиціонування
	Канали	NPBCH	Передача MIB
		NPDCCH	Передача контролю/планування
		NPDSCH	Передача даних
Uplink	Сигнали	DMRS	Оцінка каналу

	Канали	NPUSCH	Передача даних/контроль
		NPRACH	Передача преамбул

У табл. 2.3 наведено список каналів і сигналів, які використовуються в системі NB-IoT для передачі по низхідній і висхідній лініях зв'язку. Для ясності цей розділ складається з двох частин: перша частина присвячена каналам і сигналам низхідної лінії зв'язку, а друга частина присвячена каналам і сигналам висхідної лінії зв'язку.

Канали та сигнали низхідної лінії зв'язку. Як зазначалося раніше, рівень PHY системи NB-IoT успадковується від LTE. Багато блоків PHY, що утворюють канали та сигнали, були адаптовані відповідно до обмежень і вимог системи NB-IoT (наприклад, адаптація блоків, таких як кодування каналів, модуляція, відображення тощо). На рис. 6 представлено загальний ланцюг передачі частини передавача eNB. Усі ці канали та сигнали відображаються в радіокадрі тривалістю 10 мс.

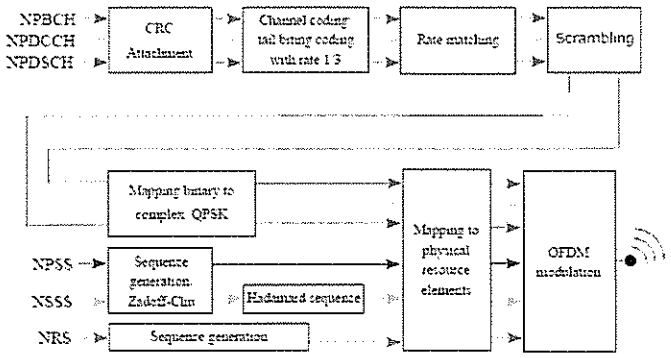


Рис.2.10. Загальний ланцюг передачі NB-IoT eNB (rel. 13).

На рис. 2.11. показано радіокадр NB-IoT для трьох можливих режимів роботи.

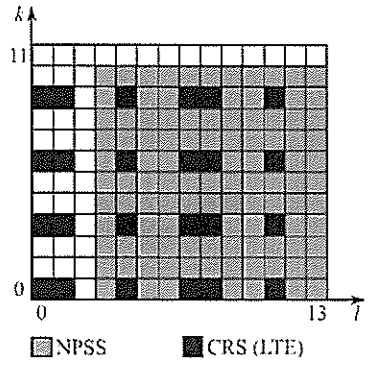


Рис.2.11. Відображення NPSS з одним антенним портом для NB-IoT і чотирма антенами порти для LTE

Для режиму внутрішньосмугової роботи можна побачити, що перші три символи OFDM у кожному підкадрі уникають, оскільки вони можуть бути зайняті каналом керування LTE. Дійсно, канал керування LTE може займати до трьох символів OFDM кожного субкадру. Таким чином, загалом сигнал NB-IoT уникає цих символів, за винятком випадків, коли канал керування LTE налаштовано на займання менше трьох символів. Крім того, сигнал NB-IoT завжди уникає RE, призначених для LTE-специфічного опорного сигналу клітини (CRS).

На відміну від цього, для режимів автономної роботи та режимів роботи в охоронному діапазоні сигнал NB-IoT може займати всі символи OFDM підкадру, оскільки діапазон NB-IoT у таких режимах повністю відокремлений від діапазону LTE. Однак відображення деяких каналів і сигналів (наприклад, NPBCH, NPSS і NSSS) залишається незмінним, як і в режимі внутрішньосмугової роботи через обмеження, пов'язані з процедурою синхронізації на стороні UE (це додатково пояснюється в наступних параграфах) .

Важливо зазначити, що для передавача eNB можна використовувати не більше двох антенних портів [16]. Крім того, квадратурна фазова маніпуляція (QPSK) є єдиним форматом модуляції, який можна використовувати для передачі по низхідній лінії зв'язку NB-IoT.

Далі представлені конкретні характеристики кожного каналу та сигналу.

1. Вузькосмуговий первинний сигнал синхронізації (NPSS): NPSS є першим основним сигналом, який передається eNB.

Він заснований на послідовності Задова-Чу (ZC) [17], [18], яка має дуже гарну властивість кореляції. Цей сигнал використовується UE для виконання часової та частотної синхронізації. Іншими словами, це дозволяє UE знайти початок кадру NB-IoT і видалити зсув частоти завдяки недорогому генератору.

NPSS завжди передається в 6-му підкадрі (тобто підкадрі №5) кожного кадру, як показано на рис. 2.11.

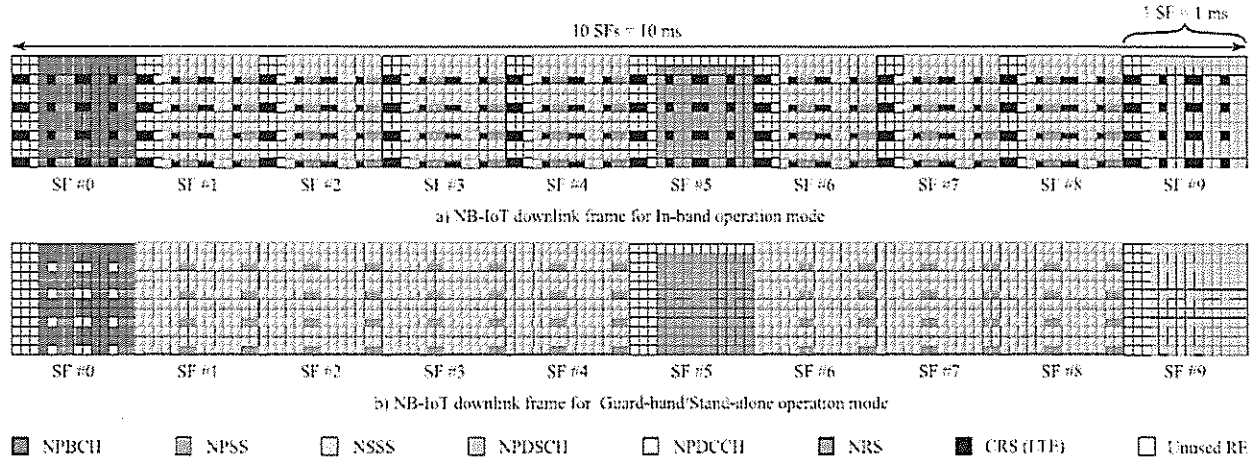


Рис.2.12. Кадр низхідної лінії зв'язку NB-IoT для режимів внутрішньосмугового, охоронного та автономного режимів роботи

Відображення на елементи ресурсу виконується від піднесучої k = 0 до k = 10 і від символу l = 3 до l = 13. Однак NPSS RE, які збігаються з LTE CRS, не передаються, як показано на рис. 2.12.

Згідно з розділом 10.2.7 [16], послідовність ZC, позначена cl;k, виражається наступним чином:

$$c_{l,k} = ale^{-\frac{\pi uk(k+1)}{11}} \quad (2.1)$$

де l = 3, 4,..., 13 - індекс OFDM-символів у підкадрі, k = 0,1,..., 10 - індекс піднесучих, $\{a_3, a_4, \ldots, a_{13}\}$ = {1, 1, 1, 1, -1, -1; 1, 1, 1, −1; 1} і u = 5 – індекс кореневої послідовності ZC.

У літературі було запропоновано декілька методів синхронізації часу та частоти [19] для модулів UE NB-IoT. Далі ці методи обговорюються в підрозділі IV-B1.

2. Вузькосмуговий вторинний сигнал синхронізації (NSSS):

NSSS є другим важливим сигналом, що передається eNB. Він містить лише ідентифікаційну інформацію комірки (ідентифікатор комірки) і передається в 10-му підкадрі (тобто підкадрі №9) кожного парного кадру, як показано на рис. 2.11. NSSS базується на послідовності ZC із 132 елементів, помножених на послідовність Адамара. 132 елементи відповідають 11 символам OFDM, помноженим на 12 піднесучих. Згідно з [16], послідовність d_n довжини N з n = 0; :::; 131, який містить інформацію про ідентифікатор комірки, визначається таким чином:

$$d_n = b_q(m)e^{-2j\pi\theta_f n}e^{-j\frac{\pi un'(n'+1)}{131}} \tag{2.2}$$

де θ_f виражається як:

$$\theta_f = \left[\frac{33}{132} \times \left(\frac{n_f}{2}\right)\right] \ mod4 = \left[\frac{1}{4} \times \left(\frac{n_f}{2}\right)\right] \ mod\ 4 \tag{2.3}$$

де n_f – індекс кадру, який завжди є парним числом (оскільки NSSS передається парними кадрами). Інші параметри (2.2) виражаються як:

$$n' = n \ \ mod\ 131$$

$$m = n\ mod\ 128$$

$$u = \left(N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}}\ mod\ 126\right) + 3$$

$$q = \left[\frac{N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}}}{126}\right]$$

з $N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}}$ — це ідентифікатор комірки. Останнім елементом послідовності ZC є $\{b_q(m)\}$, яка є однією з чотирьох послідовностей Адамара, визначених у таблиці 10.2.7.2.1-1 [16], де $b_q(m) \in \{-1; 1\}$.

Елементи d_n NSSS займають 12 піднесучих NB-IoT PRB у порядку зростання від k = 0 до k = 11 і відображаються від 4-го до 14-го символу OFDM (тобто від l = 3 до l = 13), як показано на рис. 9. Таким чином, перший зразок NSSS d_0 відображається на позиції RE (k = 0; l = 3), а d_{131} – на позиції (k = 11; l = 13). Зауважте, що, подібно до NPSS, RE, які зайняті LTE CRS, уникають під час відображення елементів d_n.

У NB-IoT, як і в LTE, ідентифікатор комірки може приймати будь-яке значення від 0 до 503. Однак у LTE інформація про ідентифікатор комірки

спільно використовується між первинним сигналом синхронізації (PSS) і вторинним сигналом синхронізації (SSS). Крім того, для внутрішньосмугового режиму роботи NB-IoT eNB може бути налаштований на такий самий або інший ідентифікатор стільника, що й LTE.

3. Вузькосмуговий опорний сигнал (NRS): NRS, який зазвичай називають «пілотним», призначений для оцінки каналу в частотній області. Він завжди передається у всіх підкадрах, за винятком тих, які присвячені NPSS і NSSS. NRS відображається на 6-му, 7-му, 13-му та 14-му символах OFDM кожного підкадру, як показано на рис.2.13.

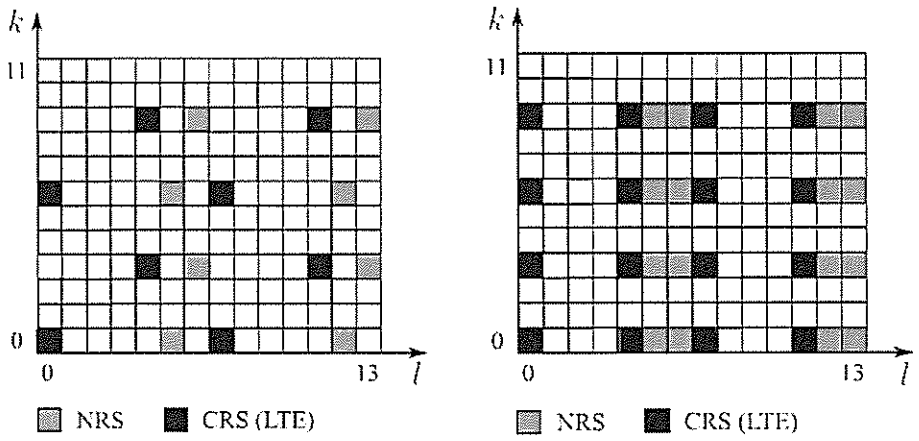


Рис.2.13. Відображення NRS

(a) Відображення NRS з одним антенним портом для NB-IoT і один антенний порт для LTE. (b) Відображення NRS з двома антенними портами для NB-IoT і два антенних порти для LTE

Частотна позиція NRS RE залежить від значення ідентифікатора комірки (NNcell ID), як описано в [16] . Крім того, залежно від кількості антенних портів, які використовує NB-IoT eNB, NRS займає більшу чи меншу кількість RE. На рис. 10 показано дві можливі конфігурації та розташування NRS на осі частот.

Можна побачити, що у випадку одного антенного порту два пілот-сигнали мультиплексуються на символ OFDM, і вони завжди розділені шістьма піднесучими [16]. Для випадку двох портів антени застосовується той самий

принцип, а ще два пілот-сигнали мультиплексуються на символ OFDM з розділенням на шість піднесучих, як показано на рис. 213. Крім того, для режиму внутрішньосмугової роботи NB-IoT і Пілотні сигнали LTE вирівнюються по частотній осі тільки в тому випадку, якщо значення ідентифікатора комірки однакове для обох систем.

NRS складається з QPSK-подібних комплексних елементів зі значеннями$\frac{1}{\sqrt{2}}(\pm 1 \pm j)$. Вони генеруються тією ж псевдовипадковою послідовністю, що й у LTE, яка називається «золотою послідовністю», а їхні значення генеруються як CRS LTE. У NB-IoT позиції RE, призначені для NRS, дуже важливі, оскільки процес відображення всіх каналів низхідної лінії зв'язку повинен їх уникати.

4. Вузькосмуговий фізичний широкомовний канал (NPBCH): NPBCH є першим важливим каналом для модулів UE NB-IoT, оскільки він першим підлягає декодуванню. Він завжди передається в підкадрі #0 кожного кадру і містить вузькосмуговий головний інформаційний блок (MIB-NB). Останній містить важливу інформацію, необхідну модулям UE для отримання додаткової важливої системної інформації (тобто SIB1-NB). MIB-NB містить 34 біти даних і 16 бітів перевірки циклічної надлишковості (CRC).

Ці 50 бітів кодуються з використанням згорткового кодування, потім чергуються, узгоджуються за швидкістю, скремблюються і, нарешті, відображаються на RE, як показано на рис.2.10.

Відображення NPBCH над підкадром №0 для внутрішньосмугового режиму роботи зображено на рис.2.14.

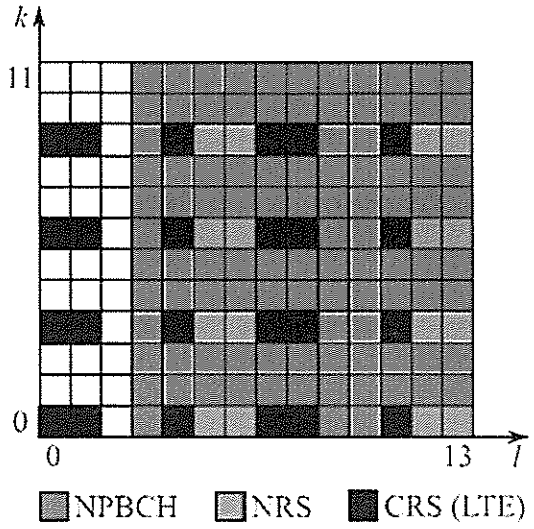


Рис.2.14. Відображення NPBCH із двома антенними портами для NB-IoT

Можна побачити, що перші три символи OFDM і RE, призначені для пілотів систем LTE та NB-IoT, уникають (тобто, LTE CRS і NRS). Це призводить до лише 100 RE на субкадр, які можна використовувати для передачі символів NPBCH. Важливо відзначити, що, незалежно від режиму роботи NB-IoT, відображення NPBCH завжди виконується так, ніби є чотири порти антени для LTE і два порти антени для NB-IoT.

Дійсно, модуль UE повністю сліпий перед отриманням MIB NB (тобто він не знає режиму роботи NBIoT eNB, номера символів каналу керування LTE або кількості портів антен LTE та NB-IoT). Таким чином, перші три символи OFDM ніколи не використовуються, щоб уникнути будь-яких можливих конфліктів з каналом керування LTE. Крім того, оскільки UE апріорі передбачає максимальне використання антенних портів (тобто чотири антени для LTE і дві для NB-IoT), таким чином уникають усіх RE, призначених для пілотів LTE та NB-IoT. Під час отримання MIB-NB UE вже декодував ідентифікатор комірки (NNcell ID) із NSSS і, таким чином, може знайти частотні позиції пілотних сигналів NB-IoT, яких слід уникати.

2.4 Системна модель для аналізу технологій NB-IoT

Комбінація двох або більше гетерогенних сетей збільшує інтелектуальність та надійність системи прийняття рішень. Наприклад, сигнал про виявлення надзвичайних ситуацій, що повідомляється груповою інтелектуальною системою рахунків, може бути перевірений через візуальний канал.

Крім того, у поєднанні таких гетерогенних сетей використовується ряд завдань, у яких надійність доставки потоків даних грає ключову роль. Учитивий обмежений обсяг радіоресурсів, вибір стратегій розподілу радіоресурсів між меншим числом високоскоростних відеокамер та великим кількістю низькокоростних смарт-читачів є важливим завданням для операторів непровідних мереж. У рамках цієї задачі необхідно збалансувати вірогідно-тимчасові характеристики (ВТХ), такі як вірогідність використання сеансів для окремих потоків даних.

У данному підрозділі досліджена аналітична модель для дослідження ВТХ обробки трафіку NB-IoT при наявності конкурентного трафіку LTE. Використовуючи розроблений інструмент, далі порівняйте три можливі стратегії розподілу радіоресурсів: статична, динамічна та динамічна з резервуванням. У якості еталоної моделі розглядається внутрішньополосний режим, представлений у випуску LTE Release 13, де радіостанція LTE розділяє спектр частот з технологією NB-IoT. Ця комбінація була вибрана в силу того, що LTE і NB-IoT - єдині два рішення, які використовують один і той же спектр частот. Ця комбінація отримує найбільшу підтримку зі сторони відбиття Інтернету речовин і, як очікується, створює основний стандарт для збору більших даних у світі Інтернету речей.

Далі мною вводиться поняття оператора, реалізація службового спостереження, використання технологій LTE та NB-IoT. Далі формалізується модель LTE-соти з підтримкою технологій NB-IoT та введення стратегій розподілу ресурсів.

Розглянемо «оператора», який керує систематичним зонним спостереженням. Система представляє собою гібридне рішення, суттєве з деякого числа відеокамерів для проведення відеомоніторингу, оптимізовані датчики для

виявлення вторгнень, пожеж, а також для контролю температур і показників повітря та системи обробки більших об'єктів даних, що отримуються як з відеокамером, так і з смарт-датчиками.

Після того, як проводне та з'єднання Wi-Fi не завжди доступні в районах спостереження, передача трафіку від камер спостереження виробляється за допомогою сотової мережі LTE. Предполагается, що смарт-датчики підключені до NB-IoT, що є однією з найбільш перспективних технологій IoT-відбиттів. Така комбінація рішень може ефективно співпрацювати в рамках однієї мережі. Після кожного рішення рішення працюють на ліцензованих частотах, постачальнику послуг, орієнтованому на надійність зв'язку, буде придбано певний частотний ресурс у оператора мереж через механізм «Нарізка мережі». Такий підхід може забезпечити безперебійне обслуговування незалежно від того, в якому стані знаходяться залишилися частотні смуги оператора.

Сценарій розгортання, описаний вище, передбачає спільне використання наданих ресурсів LTE між двома типами кінцевих вузлів: камерами спостереження і датчиками NB-IoT, піднімаючи питання про ефективне розподіл ресурсів. У зв'язку з цим характеристики надійності обох потоків трафіку набувають першорядного значення, оскільки сервер обробки не зможе приймати обґрунтовані рішення, якщо частина потоку стане тимчасово недоступна. Одним з можливих прикладів може служити система виявлення пожежі, яка розгорнута в певних зонах, де будь-яке помилкове попередження є надзвичайно дорогим (наприклад, для фабрики). Таким чином, якщо блок обробки отримує попередження про пожежу від датчиків диму/температури, він спочатку перехресно перевіряє його за допомогою візуального каналу (відеопотік від найближчої камери) і тільки потім передаетсігнал аварійної евакуації.

Для вирішення перерахованих вище питань докладно розглянемо модель системи, а потім приступимо до формалізації стратегій розподілу ресурсів.

Модель соти LTE. Розглянемо соту мережі LTE з базовою станцією, розташованою в центрі стільники. Нагадаємо, що радіус покриття комірки для послуг LTE, RL, набагато менше в порівнянні з покриттям технології NB-IoT, RN.

Весь набір доступних ресурсів будемо вимірювати в каналах NB-IoT. Надалі будемо називати це базовим каналом. У напрямку висхідній лінії для NB-IoT доступні C каналів, які можна обчислити як $C = cS$, де S - число ресурсних блоків (RB), c - число базових каналів в одному RB.

Вхідний потік від сесій LTE є пуассоновским з інтенсивністю ν. Час надання LTE-послуги розподілено по експонентному закону із середнім 1/μ, а мінімальний обсяг ресурсів, запитаних на встановлення з'єднання на кожному часовому інтервалі висхідної лінії, становить d базових каналів. Нехай $a = \nu/\mu$ - запропоноване навантаження LTE. Запити на з'єднання від NB-IoT надходять відповідно до процесом Пуассона з інтенсивністю λ. Кожне надходження даних характеризується експоненціально розподіленим часом обслуговування з параметром θ. Для кожного сеансу NB-IoT потрібно b базових каналів.

Інтенсивність запропонованої навантаження на передачу блоків даних від NB-IoT позначимо через $\rho = \lambda\theta$. Аналогічно сесій LTE, пристрої NB-IoT вважаються статичними протягом всієї сесії.

Стратегії розподілу частотного ресурсу. Розглянуті стратегії розподілу ресурсів між камерами LTE і вимірювальними датчиками NB-IoT показані на рис. 2.15.

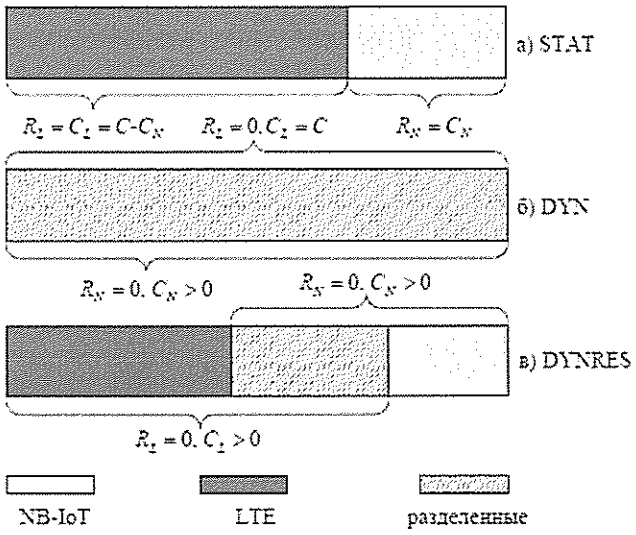


Рис. 2.15. Запропоновані стратегії розподілу ресурсів

Відзначимо, що максимальне число базових каналів, які можуть бути виділені для NB-IoT і LTE, становить $CN = C - RL$ і $CL = C - RN$ відповідно, де RL і RN - мінімальне число каналів, які завжди доступні і зарезервовані для трафіку LTE і NB-IoT відповідно.

Далі в даному розділі представлено порівняння наступних трьох стратегій розподілу ресурсів:

- статична стратегія (STAT). Ця стратегія відповідає випадку, коли мінімальне і максимальне число базових каналів, виділених для NB-IoT і LTE, збігаються: $RL = CL$, $RN = CN$. Іншими словами, всі ресурси строго розділені між NB-IoT і LTE.

- динамічна стратегія (DYN). В цьому випадку мінімальний обсяг ресурсів не призначається NB-IoT і LTE, тобто $RL = RN = 0$.

Однак максимальний обсяг ресурсів і $CL = CR = C$ повністю розділені між NB-IoT і LTE.

- динамічна стратегія з резервуванням (DYNRES). В цій стратегії максимальні розподілу ресурсів, доступні для NB-IoT і LTE, визначені так, що $CN = C - RL > 0$ і $CL = C - RN$. При цьому $RN > 0$, $RL > 0$ визначають мінімальний обсяг ресурсів, призначених для NB-IoT і LTE відповідно. Решта ресурси динамічно розподіляються між двома типами трафіку.

Унікальною особливістю даної системи з двома різнотипними вхідними потоками є той факт, що базові канали будуть послідовно виділятися з урахуванням особливостей внутрішньосмугової технології NB-IoT[13].

3 ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ МЕРЕЖІ NB-IOT

3.1 Огляд D2D комунікацій у стільникових мережах

Пристрій зв'язку може використовуватися для передачі інформації, інструкцій і встановлення з'єднання між пристроєм, що надсилає, і пристроєм, що приймає. Подібним чином зв'язок між пристроями (D2D) відноситься до радіотехнології, яка дозволяє прямим бездротовим з'єднанням між мобільними користувачами встановлювати з'єднання для прямого зв'язку один з одним без маршрутизації шляхів передачі даних через мережеву інфраструктуру. Іншими словами, цей тип зв'язку може використовуватися між стільниковими пристроями та допомагає передавати сигнали та спілкуватися без проходження BS. Згідно з дослідженням [20], передача D2D надає процедуру надсилання інформації, отриманої вузькосмуговим користувальницьким обладнанням, до BS, ефективно використовуючи просторово близький мобільний пристрій, який розглядає передачу концентраторів, щоб допомогти поширювати D2D у раундах завдань.

Усі комунікації між пристроями повинні здійснюватися через BS у звичайних стільникових мережах незалежно від того, чи D2D-зв'язок знаходиться в межах досяжності двох мобільних користувачів [21]. Зв'язок між пристроями через BS запускає звичайні мобільні послуги з низьким рівнем даних. Наприклад, ці послуги можуть включати голосові дзвінки та текстові повідомлення. Тим не менш, в даний час користувачі мобільного зв'язку використовують послуги мобільного зв'язку з високою швидкістю передачі даних. Наприклад, це може містити соціальні медіа, локалізацію (послуги на основі позиції) і відео в реальному часі, які можуть бути доступні для прямого зв'язку (на короткі відстані), наприклад зв'язку D2D. Крім того, зв'язок D2D у таких ситуаціях може значно розширити використання спектру мережі та ефективність, що сприяє продуктивності стільникової мережі. Отже, комунікації D2D також можуть підвищити енергоефективність, пропускну здатність, справедливість, вищі

ці послуги можуть включати голосові дзвінки та текстові повідомлення. Тим не менш, в даний час користувачі мобільного зв'язку використовують послуги мобільного зв'язку з високою швидкістю передачі даних. Наприклад, це може містити соціальні медіа, локалізацію (послуги на основі позиції) і відео в реальному часі, які можуть бути доступні для прямого зв'язку (на короткі відстані), наприклад зв'язку D2D. Крім того, зв'язок D2D у таких ситуаціях може значно розширити використання спектру мережі та ефективність, що сприяє продуктивності стільникової мережі. Отже, комунікації D2D також можуть підвищити енергоефективність, пропускну здатність, справедливість, вищі швидкості передачі даних і скорочення затримки, а також запропонувати нові програми [21,22].

У 2012 році, після випуску Long-Term Evolution (LTE), зв'язок D2D у стільникових мережах вперше був представлений для забезпечення одноранговового зв'язку між просторово суміжними мобільними пристроями [20]. Взаємодія D2D нормалізована в 3GPP для пошуку та передачі між двома гаджетами. Конструкція дозволяла пристрою D2D виявляти гаджети поблизу. Більше того, LTE також надсилає інформацію на базову базову станцію, використовуючи ресурси найближчого пристрою, наданого базовою станцією як альтернативу, коли негайне підключення до базової станції стає неможливим. На додаток до цього, це допомагає ефективно використовувати можливість повторного використання спектра.

Безперечно, це також відіграватиме значну роль у виконанні надсилання/отримання даних із меншим енергоспоживанням [20]. Зв'язок D2D застосовний до IoT, головним чином, коли потужність вбудованих пристроїв забороняє прямий зв'язок із інфраструктурою стільникової мережі.

IoT — нова парадигма, яка відноситься до системи взаємопов'язаних обчислювальних пристроїв, які можуть збирати та обмінюватися даними за допомогою вбудованих датчиків через бездротову мережу без втручання людини. Навпаки, зв'язок D2D вважається перспективною технологією, яка робить можливим зв'язок із наднизькими затримками. Конкатенація D2D з IoT може

створювати енергоефективні взаємопов'язані бездротові мережі з низькою затримкою.

Наприклад, Internet of Vehicles (IoV) — це мережа IoT на основі D2D, де зв'язок у реальному часі відбувається між двома або більше пристроями. Такими пристроями можуть бути, серед іншого, автомобілі, смартфони, переносні пристрої або придорожні пристрої. Крім того, IoV забезпечує аспекти ефективності та безпеки. Наприклад, на високій швидкості транспортний засіб попереджає компактні транспортні засоби за допомогою зв'язку D2D, перш ніж швидкість транспортного засобу знизиться або переміститься на іншу смугу. Ці маленькі гаджети повинні працювати на розумній відстані, не споживаючи надмірної кількості енергії. Ці маленькі гаджети обмінюються невеликими обсягами даних/інформації, але споживають значну кількість енергії для зв'язку порівняно зі збором і обробкою даних. Тому комунікаційна структура D2D NB-IoT здається життєздатним рішенням проблеми.

За даними Al-Samman et al. [23], зростаюча кількість пов'язаних пристроїв значно зростає, і структура стільникової мережі вимагає значного розширення, щоб поглинути це зростання. Це стане можливим завдяки підвищенню енергоефективності та пропозиції корисної та практичної основи для використання смуги пропускання та спектру. Отже, слід розглянути покращені варіанти універсальності для піклування про збільшення кількості підключених пристроїв. Таким чином, для реалізації цієї ідеї потрібна корисна структура, яка б ефективно обслуговувала кількість підключених пристроїв. Фреймворк повинен мати можливість працювати зі значною кількістю даних. Крім того, усі можливості фреймворку мають бути розширені. поточні можливості, приблизно в 100 разів [23]. Тут зв'язок D2D є важливим фактором, який визнано першорядною технологією в розробці вигідного рішення для майбутньої бездротової мережі шостого покоління.

3.2 NB-IoT D2D фреймворк, модель і симуляція

3.2.1 Архітектура NB-IoT D2D

Досліджувана структура була реалізована з використанням мови програмування Matrix Laboratory Programming Language (MATLAB). На рис.3.1. показано графічний інтерфейс для нашого мережевого симулятора NB-IoT attocell у контексті трьох важливих сценаріїв стільника: мікростільника, макростільника сільської місцевості та макростільника міської місцевості.

Топологія мережі attocell NB-IoT D2D складається з сітки з 24 базовими станціями, які утворюють п'ять комірок загальною площею 80 км2. BS позначається синім квадратом.

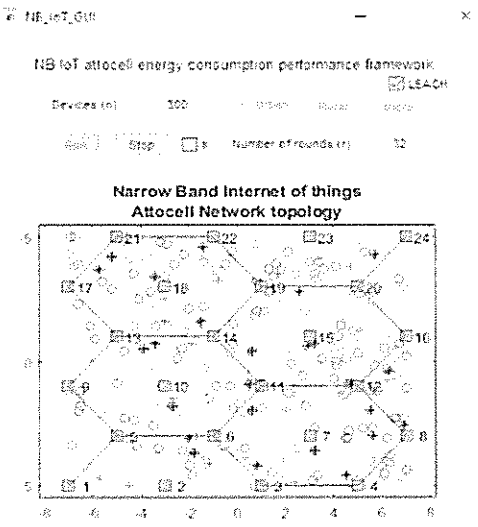


Рис. 3.1. Графічний інтерфейс користувача (GUI) симулятора з відкритим кодом NB IoT

Радіус осередку (Rcell) становить 2 км. Комірка являє собою шестикутник, обмежений BS з іншою BS у центрі. Кількість пристроїв/сенсорних вузлів у полі дорівнює n, і вони розміщені однаково. Кількість сенсорних вузлів (n) можна змінювати за потреби за допомогою графічного інтерфейсу користувача. Звичайний вузол позначається колом (o), а вдосконалений вузол, який знову виконує роль CH, позначається символом плюс (+). Енергія нормального вузла дорівнює Eo, а енергія просунутого вузла дорівнює $(1 + \alpha)$ Eo. У цій реалізації ми припускаємо, що a дорівнює 1, тобто розширений вузол спочатку має подвійну

енергію. Переданий пакет позначається зірочкою (*), мертвий вузол (тобто сенсорний пристрій із розрядженою батареєю) позначається червоною крапкою (.), а наполовину розряджений вузол позначається червоною крапкою в червоне коло, як показано на рис. 3.2. Табл.3.1 описує ключові блоки в NB-базі MATLAB структура моделювання IoT D2D, а в табл. 3.2 узагальнено параметри моделювання.

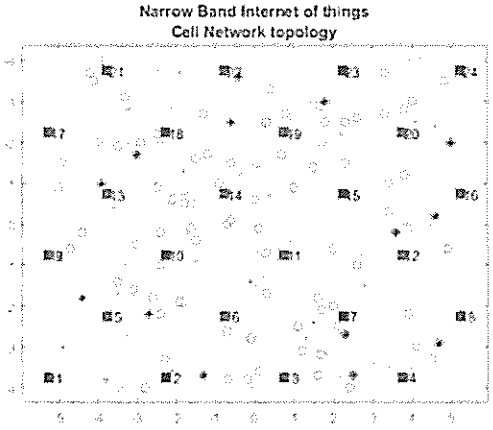


Рис. 3.2. Топологія мережі NB-IoT attocell і розподіл поля

Таблиця 3.1.

Структура моделювання вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT) на основі MATLAB (D2D): ключові компоненти

Одиниці	Головна роль	Пояснення
NB_IoT_GUI.m	Основний код і модель втрат на шляху	Містить основні функції та інтерфейс зворотного виклику користувача
NB_IoT_GUI.GUI	Інтерфейс	Запускає моделювання, показує топологію мережі та результати для моделей втрат на шляху та співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR)
LntcyEnrgyPrfrmnc.m	Затримка та енергетична модель	Припускає два класи покриття залежно від втрат на шляху, таким чином генерує матриці для затримки та енергії
queueCH.m	Сервери Cluster	Розробляє чергу CH та визначає

	Heads (CH) в черзі	загальне енергоспоживання для кожного пов'язаного пристрою
queueBS.m	Постановка в чергу серверів базової станції (BS).	Розробляє чергу БС і визначає загальне енергоспоживання для кожного CH

Таблиця 3.2.

Параметри системи моделювання NB-IoT D2D на основі MATLAB

Параметри моделювання	Значення
Максимальна кількість раундів	999
Порогове значення: T(n)	параметр конструкції
ймовірність того, що вузол стане CH: p	випадковий
Частота генерації пакетів, тобто один пакет на дві години [на день]: S	0.5 ×24
Ймовірність висхідного запиту: p_u	0,8
Мережевий протокол	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)
Протокол MAC	OFDMA і SC-FDMA
Моменти довжини кадру висхідної та низхідної лінії зв'язку: l_a, m_a	500 bits, 5 kbit
Спектральна щільність потужності передачі: TxSpctrlDnsty	параметр конструкції
Втрати проникнення: TidB	10 dB
Середня довжина сигналізації RA: τ	0.01 s
Середня довжина контрольної сигналізації: u	0.002 s
Тони	Tones ∈ [12, 6, 3, 2, 1]
Пропускна здатність: B	180 kHz
Частота надходження керуючих даних, ініційованих BS: λ_{bs}	1/CF
Коефіцієнт шуму: Nsfigr	2.5
Спектральна щільність потужності шуму: NsSpctrldnsty	параметр конструкції
Частка приладів відноситься до класів покриття c_1 і c_2: f_1, f_2	0.5, 0.5
Втрати на шляху між каналами та базовими станціями: $PL_{CH\text{-}BS}$	розрахунковий параметр dB
втрата шляху між вузлами NB-IoT D2D:	розрахунковий параметр dB

PL_{D2D}	
Співвідношення сигнал/перешкода плюс шум: SINR	розрахунковий параметр dB
відстань від CH до BS: d_eNB	розрахунковий параметр км
порядок повторення: c_1, c_2	1,2
посилення антени передавача: G_{TX}	21.10 dB
посилення антени приймача: G_{RX}	19.18 dB
Швидкість передачі даних висхідної лінії: R_1, R_2	5, 5 kbit/s

Продовження таблиці 3.2.

Параметри системи моделювання NB-IoT D2D на основі MATLAB

Параметри моделювання	Значення
Швидкість передачі даних по низхідній лінії: R_1, R_2	15, 15 kbit/s
комунікаційна модель	Двонаправлена
затримка синхронізації: D_{sy1}, D_{sy2}	0.33, 0.66 s
максимальні втрати зв'язку: MCL	144, 155, 164 dB
частка кадрів, що використовується опорними сигналами: b	0.2
спектральна щільність теплового шуму: N_0	-174 dBm/Hz
найбільший час очікування для отримання RAR: T_{th}	2 s
кількість ресурсів RA: M_1,M_2	16, 16 преамбули
період часу між двома графіками NPRACH: *t*	параметр конструкції
період часу між двома графіками NPDCCH: *td*	параметр конструкції
дуплексний режим	дуплекс з частотним поділом
очікуване споживання енергії в зв'язку класу *j* висхідної лінії зв'язку: ξ_{uj}	розрахунковий параметр (Джоулі)
очікуване споживання енергії в зв'язку класу *j* низхідної лінії зв'язку: ξ_{uj}	параметр конструкції (Джоулі)
очікуваний термін служби батареї: L_j	параметр конструкції
Споживання енергії при прослуховуванні: E_{sv}	Джоулі
Споживання енергії в повідомленні RAR: E_{rar} , E_{rr}	Джоулі
Початкова енергія для вузла: Eo	1000 Джоулів
Втручання: I	0.50
Енерговитрати під час надсилання, очікування та прослуховування: P_t, P_I , P_l	0,2, 0,01, 0,1 Вт
відстань від кожного вузла в кластері до	проектний параметр км

найближчої головки кластера CH на раунд r: $d_{CH\text{-}N}$	
Витрати електроенергії в електронних схемах: P_c	0,01 Вт
потужність передачі: PTX_i	14 dBm

Блок-схема запропонованого моделювання NB-IoT D2D на основі MATLAB, яка є фреймворком із відкритим вихідним кодом, зображена на рис.3.3.

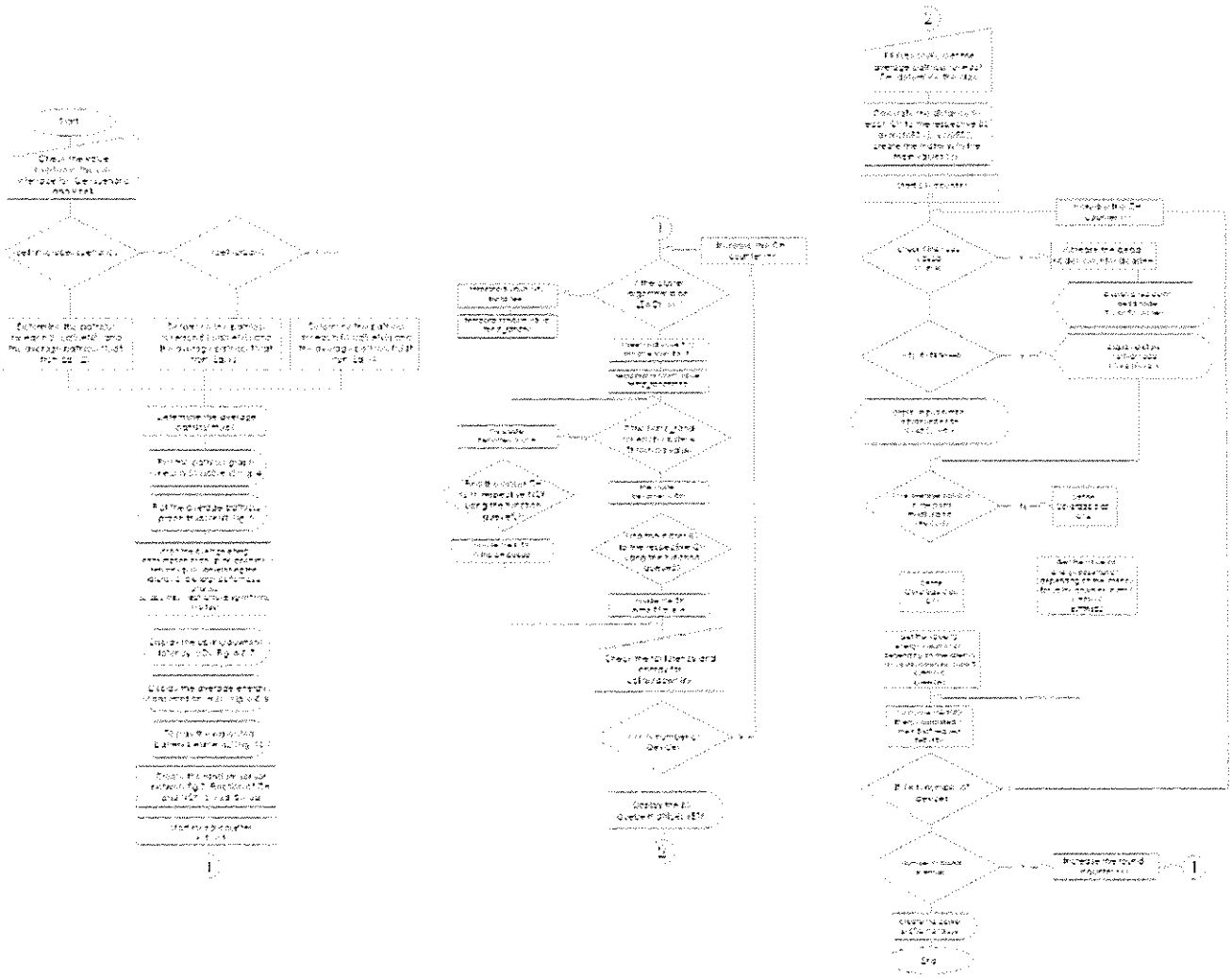


Рис. 3.3. Блок-схема D2D-симуляції NB-IoT на основі MATLAB.

3.2.2 Протокол маршрутизації LEACH

У даному моделюванні основною метою використання протоколу кластеризації з одним стрибком було зниження версії черги з кількома серверами, зменшення міжкластерних колізій і запобігання атакам зловмисних вузлів.

Протокол LEACH адаптовано до налаштувань NB-IoT D2D для маршрутизації мережевого трафіку. Перевагою використання LEACH є те, що порівняно з іншими традиційними протоколами маршрутизації з кількома стрибками, LEACH важко скомпрометувати [24].

Дійсно, вузли навколо BS у традиційних процедурах маршрутизації з кількома стрибками залучаються частіше, збільшуючи ймовірність компромісу, у той час як лише канали зв'язку безпосередньо спілкуються з BS у LEACH. Ці CH визначаються випадковим чином у мережі, незалежно від BS; вони також періодично змінюються. Як наслідок, зловмиснику дуже важко помітити CH у протоколі LEACH. Однак CH відповідають за збір і маршрутизацію важливих даних, тому скомпрометований CH є небезпечним. Важливим методом підвищення кібербезпеки є управління ключами. Хоча доступно багато ключових систем розподілу, більшість з них не підходять для IoT [25]. Наприклад, для розповсюдження на основі відкритих ключів потрібен значний обсяг обчислень, для повного попарного введення ключів необхідний значний обсяг пам'яті, і всесвітнє введення ключів знаходиться під загрозою. IoT має обмежені ресурси, обчислювальну потужність, комунікаційні можливості та пам'ять, що ускладнює ефективне впровадження механізмів кібербезпеки.

Повертаючись до комунікаційних принципів LEACH, протокол випадковим чином вибирає кілька вузлів, які діють як CH на основі принципу вищої енергії, тоді як інші вузли діють як Non-CH (NCH). NCH агрегують дані від одного або кількох вимірювальних датчиків і надсилають їх до CH. Зведені та стиснуті дані потім надсилаються CH до відповідних BS. У цьому моделюванні OFDMA з BPSK або QPSK і SC-FDMA з QPSK застосовуються для висхідної та низхідної лінії зв'язку, відповідно, замість множинного доступу з тимчасовим поділом (TDMA)/множинного доступу з кодовим поділом (CDMA), як використовувалося раніше в дослідженнях із залученням LEACH .

LEACH використовується в концепції кластеризації, щоб мінімізувати розсіювання енергії та максимізувати термін служби мережі. Отже, використовуючи протокол LEACH, операції класифікуються на два етапи:

налаштування та стабільні кроки. Кластери створюються на етапі налаштування, і CH вибирається для кожного кластера з імовірністю p. Порогове значення LEACH T(n) зазвичай описується (3.1). Вибір CH, який належить до набору вбудованих пристроїв G, які не були обрані як CH в останніх раундах 1/p, досягається на основі T(n). Кожна ітерація для вибору CH називається раундом і позначається *r*:

$$T(n) = \frac{p}{1-p\times(r\times mod\left(\frac{1}{p}\right))} \forall_n \in G \tag{3.1}$$

Кожен пристрій вибирає випадкове число $X \in [0,1]$ якщо $X < T(n)$, то для струму r цей пристрій стає CH. CH згодом транслюють повідомлення до NCH із запитом підключитися до їхніх кластерів. Пристрої NCH вирішують, до якого CH підключитися, на основі отриманої потужності сигналу, і NCH передає повідомлення про прийняття до CH, які будуть під його кластером. Ця комунікація також може підтримуватися BS, але це не змінить загальну продуктивність і поведінку. Таким чином, кожен CH встановлює розклад OFDMA/SCOFDMA для організації інтервалів передачі між пристроями NCH у своєму власному кластері на основі певних критеріїв, таких як кількість пристроїв NCH і тип зібраних даних. Розклад OFDMA/SC-OFDMA передається на всі пристрої, що належать до кластеру.

На стабільній стадії NCH сприймає дані та передає їх до свого CH на основі розкладу OFDMA/SC-OFDMA. Отже, канали CH надсилають сенсорні дані до найближчої базової станції. NB-IoT повертається до процесу ініціалізації (налаштування) через заздалегідь визначений час, і вибирається новий CH.

3.2.3 Моделі поширення каналів

Найважливішими параметрами якості сигналу IoT є SINR, співвідношення сигнал/шум (SNR) і втрати на шляху. Таким чином, мною проаналізовано SINR NB IoT, продемонструвавши його відносно високу перешкодостійкість порівняно, наприклад, з Сігфокс і ЛоРа. Крім того, ми змоделювали модель втрат на шляху

NB-IoT з точки зору мікрокомірки, макрокомірки міської місцевості та макрокомірки сільської місцевості. Ця структура NB-IoT D2D включає два типи моделей втрат на шляху. По-перше, втрати на шляху між CH і BS (тобто передача на великі відстані), які були змодельовані на основі [26,27]. По-друге, втрата шляху між вузлами NB-IoT D2D (тобто передача на короткій відстані між CH і відповідними пов'язаними вузлами кластера), яка була змодельована на основі [28,29]. Рівень MAC перевіряє, чи правильно були отримані кадри. Канал передачі даних між CH і BS послаблюється відповідно до використаних моделей втрат на шляху / поширення. На рис.3.4 зображено (a) структуру кадру низхідної лінії зв'язку NB-IoT OFOMA та (b) структуру кадру SC-FDMA висхідної лінії зв'язку NB-IoT.

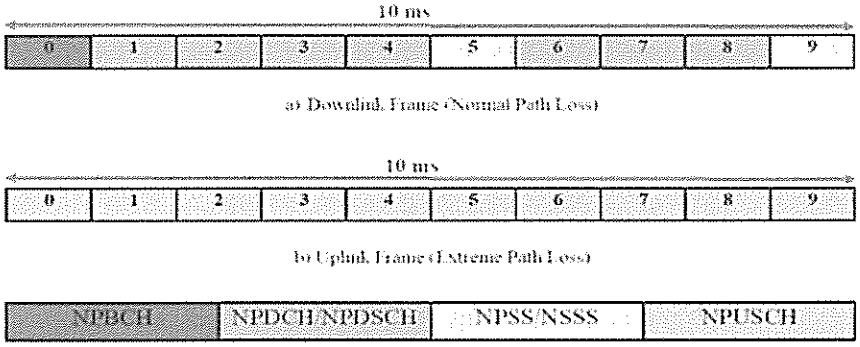


Рис.3.4. Структура кадру (a) низхідної лінії зв'язку NB-IoT OFOMA та (b) висхідної лінії зв'язку NB IoT SC-FDMA

Однак процедура вирішується на основі сценарію комірки передбачуваної програми. Наприклад, схема втрат на шляху сценарію мікроелементів між CH і BS для розумних будинків, розумних пристроїв і промислових застосувань показана в (3.2), а між вузлами NB-IoT D2D представлена в (3.3):

$$PL_{CH-BS} = 24 + 45log_{10}(d_{eNB} + 16) \quad (3.2)$$

$$PL_{CH-BS} = G_{Rx} + G_{Tx} + PTX_j + [4 \times 10log_{10}(\frac{6}{4\times\pi\times d_{CH-N}})] \quad (3.3)$$

Рівняння (3.4) ілюструє схему втрат на шляху міської макрокомірки між CH і BS для розумних міст і приміських районів з розумними електромережами, тоді

як (3.5) показує схему втрат на шляху міської макрокомірки між CH і відповідними асоційованими вузлами кластера:

$$PL_{CH-BS} = 103.8 + 37.6log_{10}(d_{eNB}) \quad (3.4)$$

$$PL_{CH-BS} = G_{Rx} + G_{Tx} + PTX_j + 2.7 \times 10log_{10}(\frac{3.5}{4\times\pi\times d_{CH-N}}) \quad (3.5)$$

Формула втрат на шляху сільської макрокомірки між CH і BS, яка може бути використана для розумних ферм і парків вітрових турбін, демонструється через (3.6). І формула втрат на шляху сільської макрокомірки між вузлами NB-IoT D2D задається через (3.7):

$$PL_{CH-BS} = 96 + 34.1log_{10}(d_{eNB}) \quad (3.6)$$

$$PL_{D2D} = G_{Rx} + G_{Tx} + PTX_j + 2 \times 10log_{10}(\frac{2}{4\times\pi\times d_{CH-N}}) \quad (3.7)$$

На рис. 3.5, 3.6 і 3.7 зображено модель втрат на шляху для заданої BS у сценаріях мікростільника, міського макростільника та сільського макростільника відповідно. Рівень MAC відображає технічні особливості каналу, пов'язаного з NCH і CH або CH і BS. При моделюванні мережі атосот NB-IoT максимальні втрати зв'язку (MCL) трьох зон покриття становлять 144, 155 і 164 дБ. У класі покриття висхідної лінії зв'язку використовується SC-FDMA з інтервалом піднесучих 3,75 або 15 кГц, тоді як у класі покриття низхідної лінії зв'язку використовується OFDMA з інтервалом піднесучої, обмеженим 15 кГц. Крім того, швидкість передачі даних для класів покриття висхідної лінії зв'язку коливається від 160 до 200 кбіт/с, тоді як швидкість передачі даних для класів покриття низхідної лінії зв'язку коливається від 160 до 250 кбіт/с [26]. Ефективну смугу пропускання розраховували, а частотний коефіцієнт f розглядали з метою підвищення SNR наступним чином [26]:

$$BW = \frac{180{,}000Hz}{f}, \text{де } f = \frac{12}{Tones} \quad (3.8)$$

$$NsSpctrldnssty = Nsfigr \times N_O \quad (3.9)$$

TxSpctrlDnsty=$PRX_{i,j} \times BW^{-1}$, де

$$Rexeption\ power\ of\ equipment\ I\ for\ subchannel\ j \quad (3.10)$$

$$doneted\ by\ PRX_{i,j} = \left|PTX_j \times d_{eNB} - L - TidB\right|$$

$$SNR = TxSpctrlDnsty \times NsSpctrldnsty^{-1} \quad (11)$$

SNR для заданої BS у сценаріях мікростільника, міського макростільника та сільського макростільника представлено на рис. 3.8, 3.9 та 3.10 відповідно. З огляду на принцип пропускної здатності каналу зв'язку, швидкість передачі даних вимірюється SINR для сигналу. Коли CH отримує або надсилає кадри, SINR обчислюється відповідно до (3.12) [30]. Фігури 11, 12 і 13 ілюструють SINR для заданої BS у сценаріях мікростільника, міського макростільника та сільського макростільника відповідно.

$$SINR_{i,j} = \frac{PRX_{i,j}}{(sSpctrldnsty \times B)+I} \quad (3.12)$$

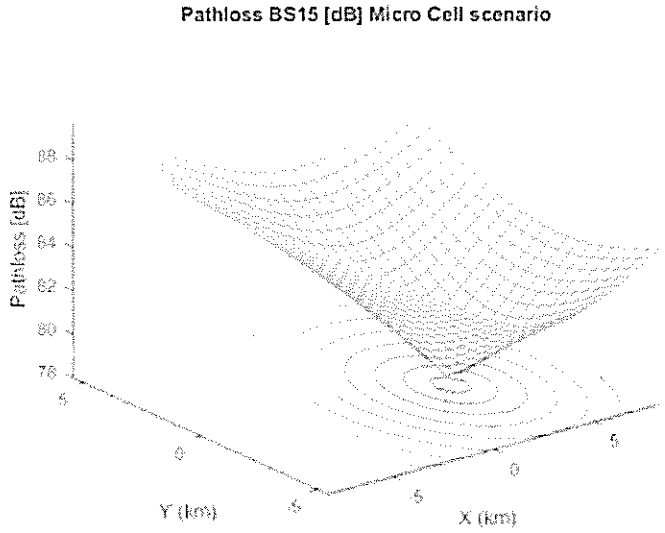


Рис. 3.5. Модель втрат на трасі для БС № 15 у сценарії мікрокомірки

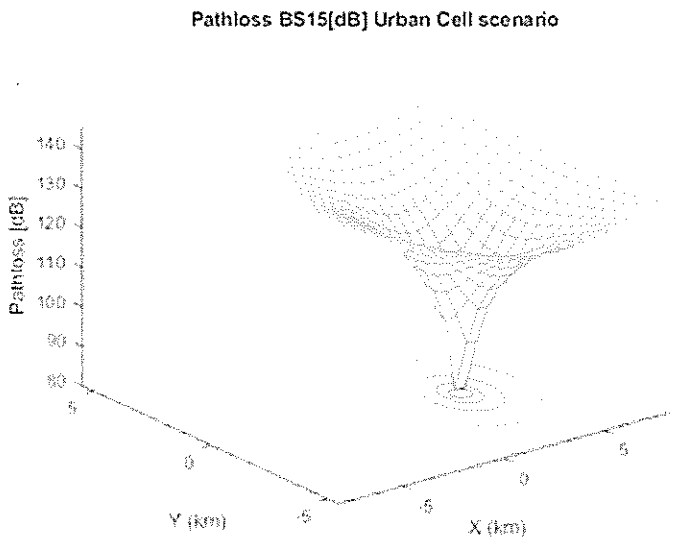


Рис. 3.6. Модель втрат на трасі для БС № 15 у сценарії міської макрокомірки.

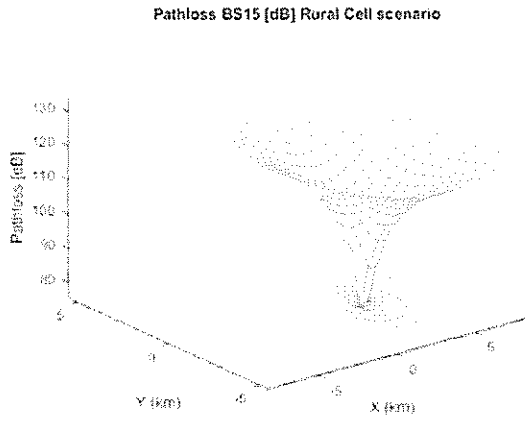


Рис.3.7. Модель втрат на трасі для БС № 15 у сценарії макростільника в сільській місцевості

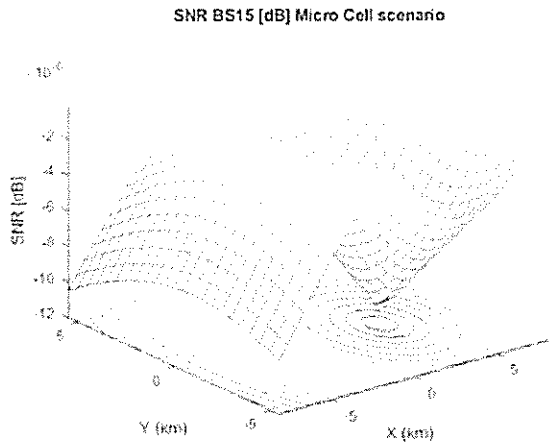


Рис. 3.8. Відношення сигнал/шум (SNR) для БС № 15 у сценарії мікрокомірки

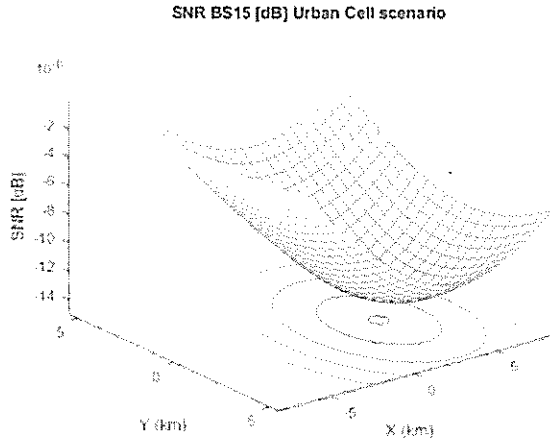


Рис.3.9. SNR для БС № 15 у сценарії міської макросоти

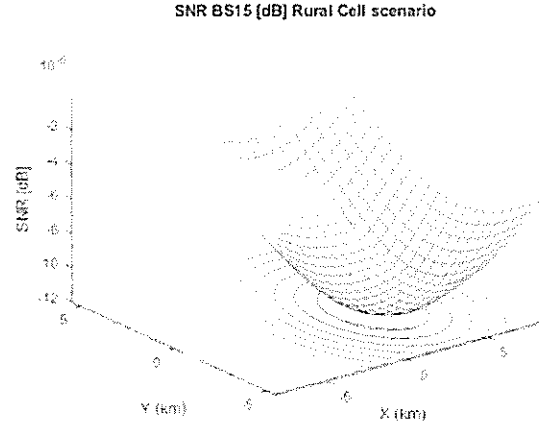


Рис. 3.10. SNR для БС № 15 у сценарії макростільника в сільській місцевості

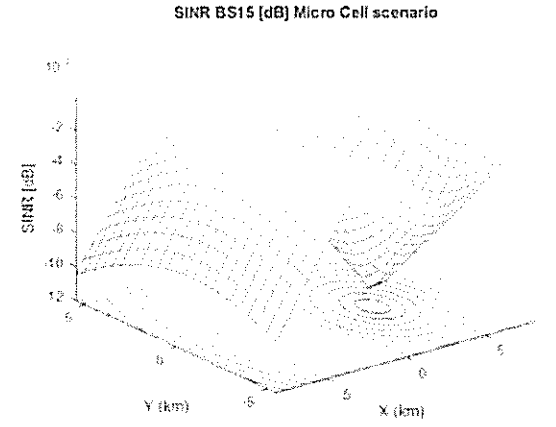


Рис. 3.11. Відношення перешкод сигналу до шуму для БС № 15 у сценарії мікроелемента

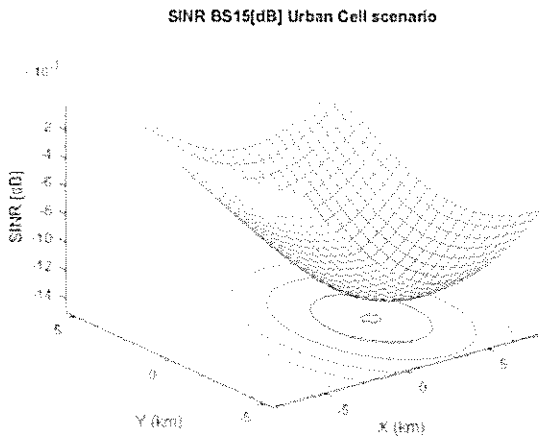


Рис. 3.12. Відношення перешкод сигналу до шуму для БС № 15 у міському сценарії макростільника

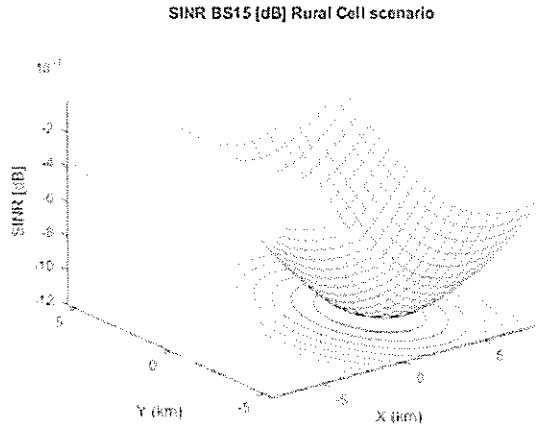


Рис.3.13. Відношення перешкод сигналу до шуму для БС № 15 у сценарії макростільника в сільській місцевості

3.3 Результат моделювання

Порівняно з такими дослідженнями, як [31,32], досліджене моделювання NB-IoT D2D мінімізує затримку від запитів на обслуговування висхідної/низхідної лінії зв'язку, як показано на рис. 3.8 і 3.9. Наша структура також зменшує споживання енергії, що надходить від висхідної/низхідної лінії зв'язку. запит на обслуговування, як показано на рис.3.10 і 3.11. Крім того, це покращує співіснування між нормальним і екстремальним класами покриття, як показано на рис. 3.12, і збільшує термін служби акумулятора пристрою NB-IoT, як показано на рис.3.13. На основі радіуса комірки та вибраного сценарію

розповсюдження, наша модель із відкритим кодом представляє графік втрат на шляху, як показано на рис.3.14. У результаті розробник системи IoT може використовувати нашу модель для розробки найточніших оцінок, що дозволяє зменшити споживання енергії і підвищення продуктивності шляхом зміни параметрів симулятора. На рис.3.15–3.17 показано середнє значення втрат на шляху між CH та BS для моделі моделювання NB-IoT D2D порівняно з MCL.

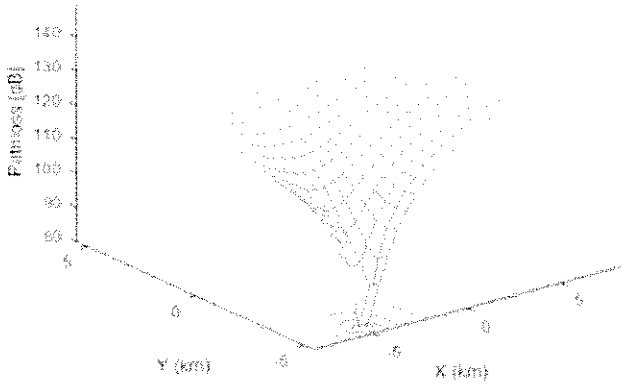


Рис. 3.14. Втрата шляху в міському сценарії, БС № 21

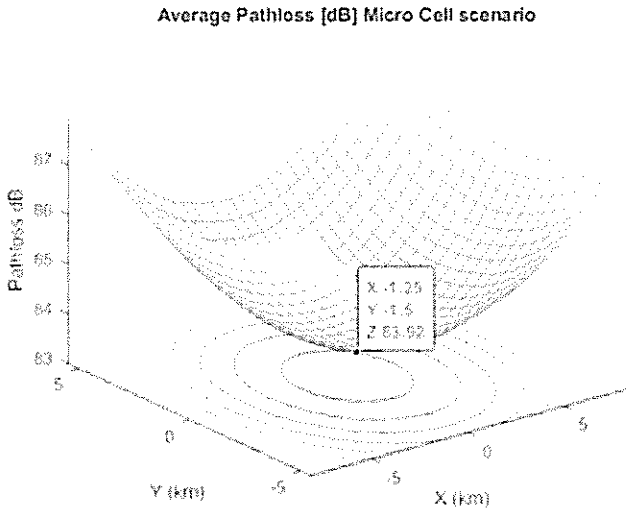


Рис.3.15. Середні втрати на шляху в сценарії мікрокомірки

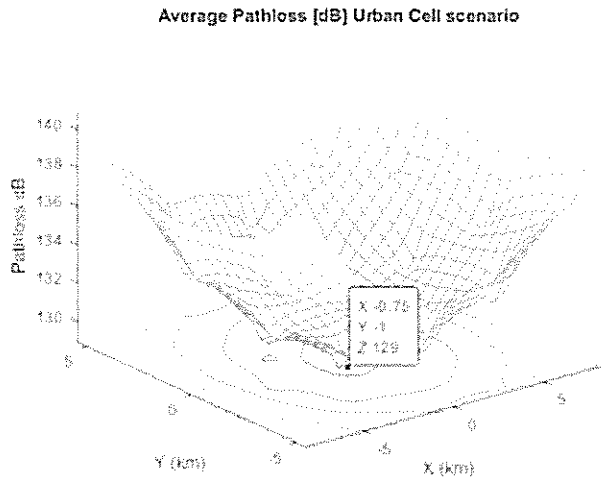


Рис.3.16. Середні втрати на шляху в міському сценарії

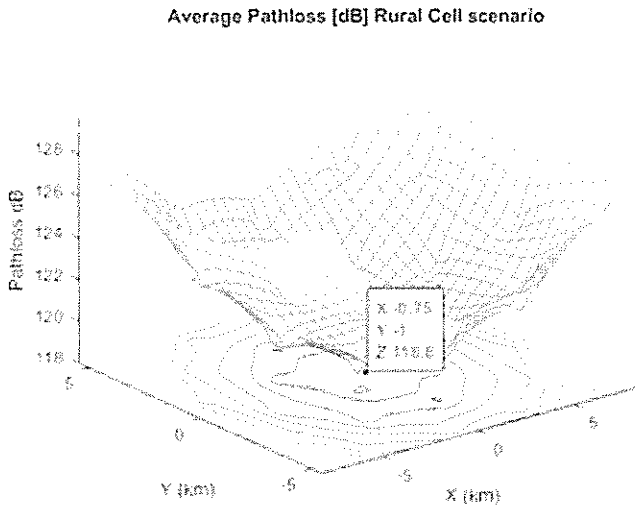


Рис.3.17. Середня втрата на шляху в сценарії сільської клітини

Як показано на рисунку, максимальний термін служби для класу 1 становить td = 0,526 і t = 1,00, тоді як максимальний термін служби для класу 2 становить td = 0,626 і t = 1,00. На рис.3.15 показано, що мінімальна затримка висхідної лінії зв'язку для класу 1 становить td = 0,001 і t = 1,00, тоді як мінімальна затримка висхідної лінії зв'язку для класу 2 становить td = 0,001 і t = 1,00. Як показано на малюнку 16, мінімальна затримка низхідного каналу для класу 1 становить td = 0,051 і t = 0,05, однак мінімальна затримка низхідного каналу для класу 2 становить td = 0,051 і t = 0,05.

Топологія мережі attocell NB-IoT інтегрується з алгоритмом LEACH, щоб зменшити кілька черг до кількох (рис.3.18 проти рис.3.19). Ця структура NB-IoT D2D, як показано на рис.3.18*A,B* створює матрицю черги BS (*vBSnx*), яка показує

загальне очікуване споживання енергії для відповідних пов'язаних вузлів, загальне очікуване споживання енергії для послуг висхідної та низхідної лінії зв'язку, пристроїв споживання енергії для запиту низхідної лінії зв'язку (ξdj), споживання енергії пристроєм для запиту висхідної лінії зв'язку (ξuj), час між двома розкладами NPDCCH (td), час між двома розкладами NPRACH (t), тип класу покриття, шлях втрата під час зв'язку та відстань до відповідних CH відповідно. На рис.3.19*A,B* пояснюється черга на BS № 18 і BS № 19 у випадку традиційного NB-IoT (тобто без використання протоколу LEACH). Він показує загальне очікуване споживання енергії для відповідних пов'язаних вузлів, споживання енергії пристроями для запиту низхідної лінії зв'язку (ξdj), споживання енергії пристроєм для запиту висхідної лінії зв'язку (ξuj), тип класу покриття, втрати на шляху під час зв'язку, і відстань до вузла. Матриця черги (vBSnx) може вказувати чергу на кожній BS у випадку NB-IoT D2D і звичайного NB-IoT, але BS № 18 і BS № 19 були випадково вибрані як приклади. Рис.3.18*A* підтверджує, що в черзі на базовій станції № 18 є лише три CH, а на рис.3.18*B* показано, що в черзі на базовій станції № 19 є лише два CH. На рис.3.19*A, B* показано, що 19 вузлів стоять у черзі на BS № 18 і 17 вузлів у черзі на BS № 19 відповідно. Це практично доводить, що коли використовується модель LEACH, черги на кожній БС мінімізуються. Це зменшує затримку (тобто час затримки) і споживання енергії на кожній базовій станції.

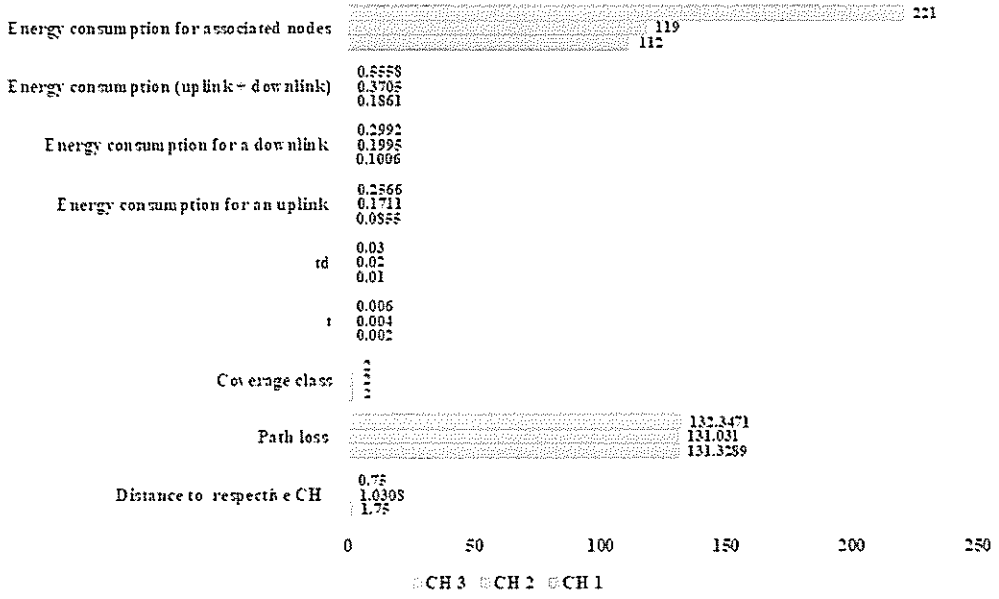
Крім того, існує черга в кожному CH (mtrxCH(:, :, n)), як показано на рис.3.20*A,B*.

Він відображає загальне очікуване споживання енергії для послуг висхідної та низхідної лінії зв'язку, споживання енергії пристроями для запиту низхідної лінії зв'язку (xdj), споживання енергії пристроєм для запиту висхідної лінії зв'язку (xuj), клас покриття, втрати на шляху між пристроями, відстань між CH та його NCH та відповідними асоційованими вузлами кластера. Матриця черги (mtrxCH(:, :, n)) може пояснити чергу в кожному CH у пропонованому симуляторі NB-IoT D2D, але CH № 170 і CH № 171 було вибрано випадковим чином як приклад рис. 20*A,B*. У результаті значення таких параметрів, як споживання енергії та час

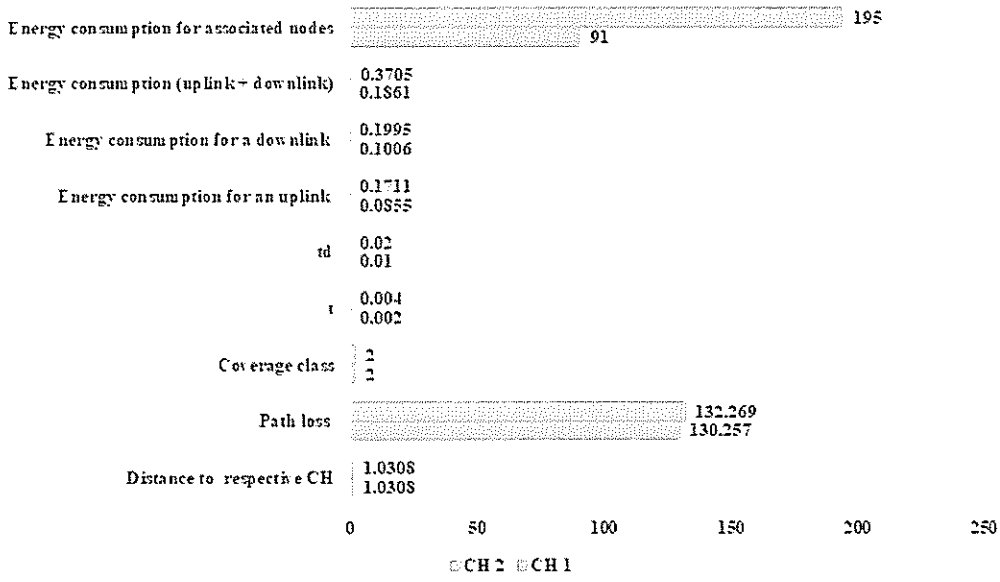
затримки, зменшуються, оскільки втрати на шляху між обладнанням користувачів зазвичай застосовуються в класі 1.

Як показано на рис.3.19 і 3.21, черги на базових станціях стають довшими, коли алгоритм маршрутизації LEACH на мережевому рівні NB IoT не використовується, оскільки всі пристрої в традиційній топології мережі attocell NB-IoT подають запити висхідної/низхідної лінії зв'язку на той же час. Це призводить до посилення розсіювання енергії в традиційних зв'язках NB IoT attocell, а час затримки збільшується (рис.3.22 проти рис.3.23), що знижує термін служби батареї. Можна помітити, що втрати на шляху ростуть пропорційно відстані. Отже, багато вузлів у топології мережі attocell NB-IoT повинні підключатися за допомогою класу 2, що також збільшує споживання енергії. Однак у сценарії протоколу LEACH кожен NCH вибирає найближчий CH для приєднання до свого кластера, і, отже, більшість зв'язків здійснюється через клас 1 рис.3.20. На рис.3.24 і 3.25 зображено профіль розсіювання енергії розширеного вузла та нормального вузла відповідно в запропонованій структурі NB-IoT D2D, яка може використовуватися для визначення SOC і SOH батареї пристрою, щоб їх можна було включити в системи батареї. управління. Це значно сприятиме зменшенню накладних витрат. На рис.3.26 зображено кількість переданих пакетів у мережі атосот NB-IOT D2D на раунд r. На рис.3.27 пояснюється пропускна здатність мережі атосот NB-IoT (швидкість успішно отриманих пакетів) за допомогою алгоритму LEACH. Іншими словами, швидкість передачі даних, яка успішно доставляється в контексті протоколу LEACH, є ефективною. На рис.3.28 і 3.29 показано кількість активних вузлів на раунд r у мережі атосот NB-IoT з використанням алгоритму LEACH і без використання LEACH відповідно. За наявності алгоритму LEACHрис. 3.28 усі сенсорні вузли залишаються активними до більш ніж 300 циклів. У той час як без використання протоколу LEACH, як показано на рис.3.29, сенсорні пристрої починають відключатися після раунду 18 і раунду 51, у традиційній мережі атосот NB-IoT немає активного сенсорного пристрою. Проте всі наведені вище вимірювання аналізуються, щоб представити комплексну оцінку запропонованого симулятора з відкритим кодом. Нарешті,

рис.3.30 ілюструє топологію мережі attocell NB-IoT, коли всі пристрої вимикаються: іншими словами, коли всі вузли повністю споживають енергію батарей.

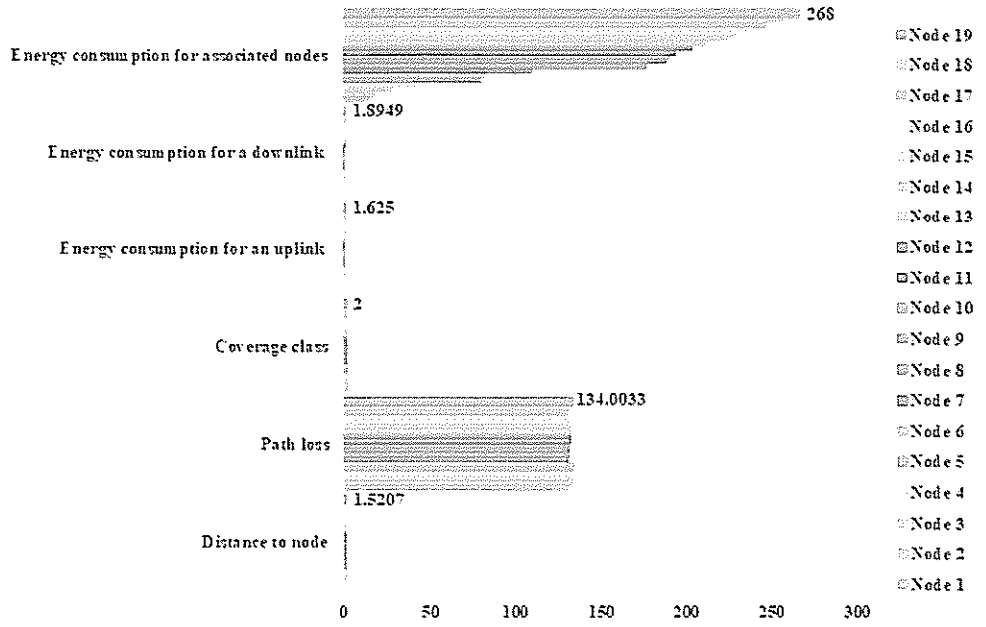


A. Черга на BS №18 з використанням протоколу LEACH (тобто досліджувана структура NB-IoT D2D)

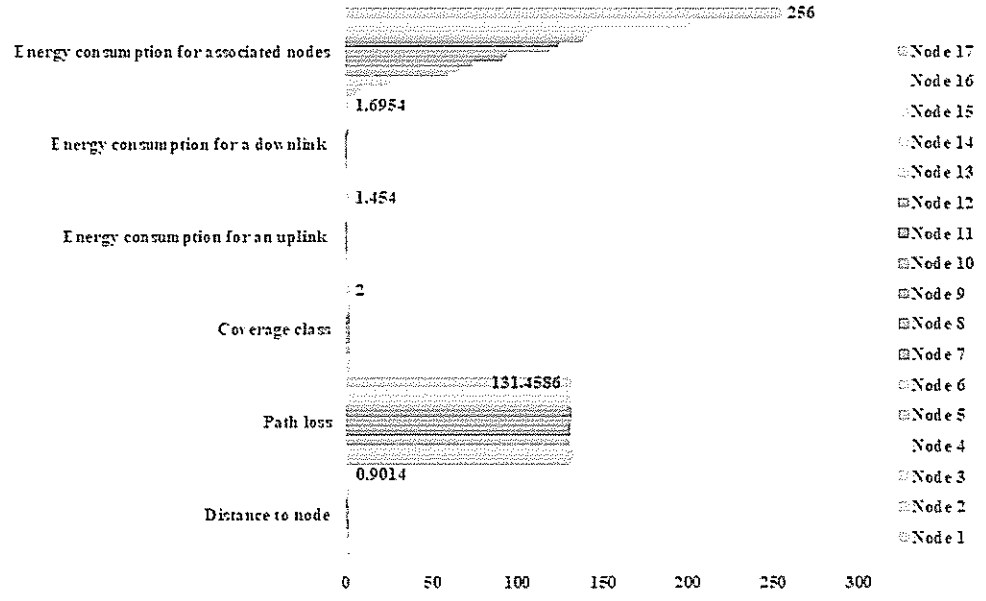


B. Черга на БС № 19 в досліджуваній структурі NB-IoT D2D

Рис.3.18. Черга на базових станціях № 18 і № 19 у досліджуваній структурі D2D NB-IoT

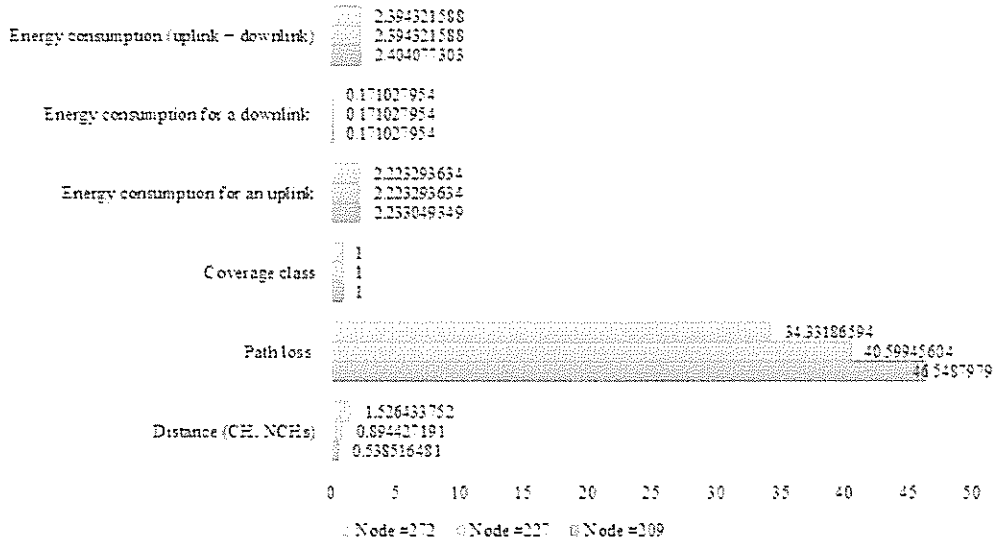


A. Черга в BS № 18 у традиційному NB-IoT

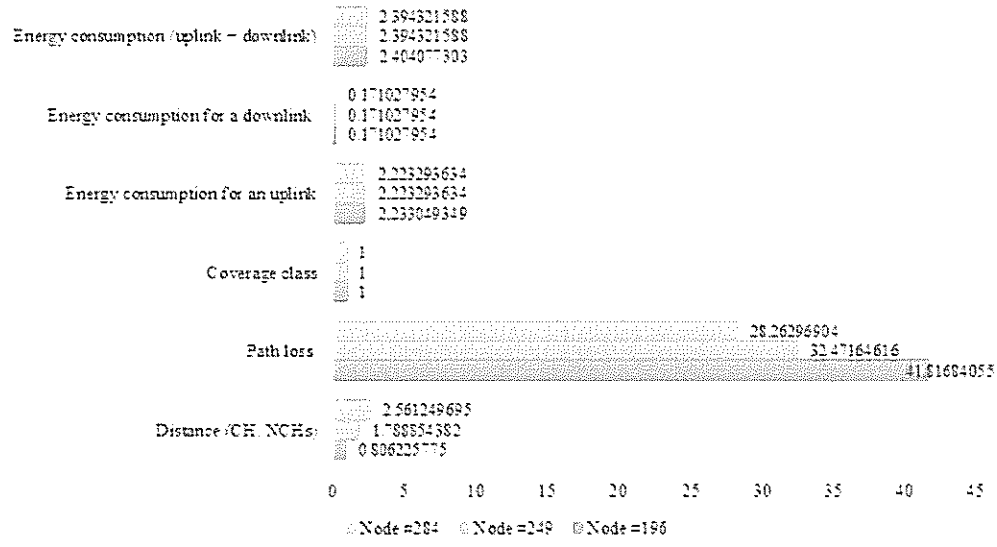


B. Черга в BS № 19 у традиційному NB-IoT

Рис.3.19. Черга на базових станціях № 18 і № 19 у традиційному NB-IoT



A. Черга CH № 170 з використанням протоколу LEACH



B. Черга CH № 171 з використанням протоколу LEACH

Рис. 3.20. Черга CHs № 170 і № 171 з використанням протоколу LEACH

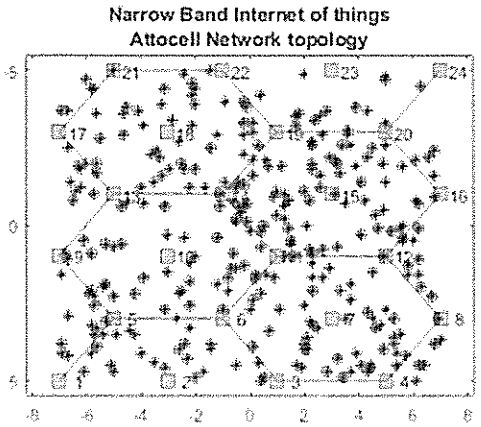


Рис. 3.21. Мережа NB-IoT без схеми LEACH, на якій показано, що всі вузли надсилають дані одночасно (300 користувачів)

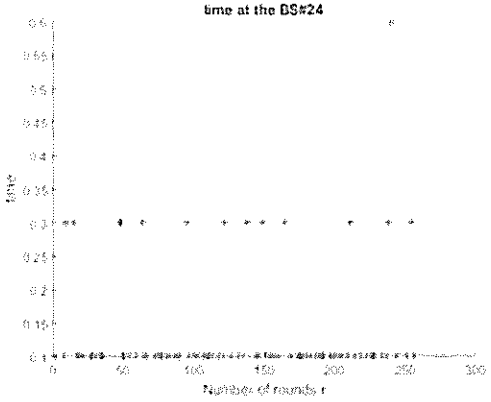


Рис. 3.22. Профіль потужності розширеного вузла (енергоспоживання пристрою користувача № 23)

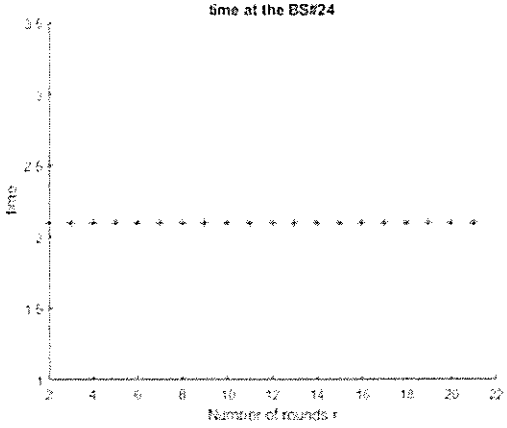


Рис.3.23. Профіль потужності звичайного вузла (споживана потужність для пристрою користувача № 50).

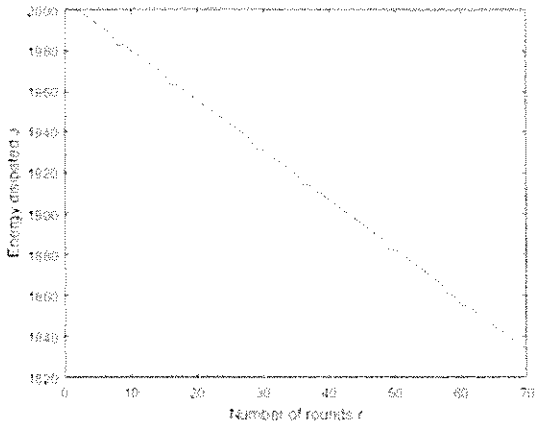


Рис. 3.24. Час затримки на БС № 24 у запропонованій структурі NB-IoT D2D

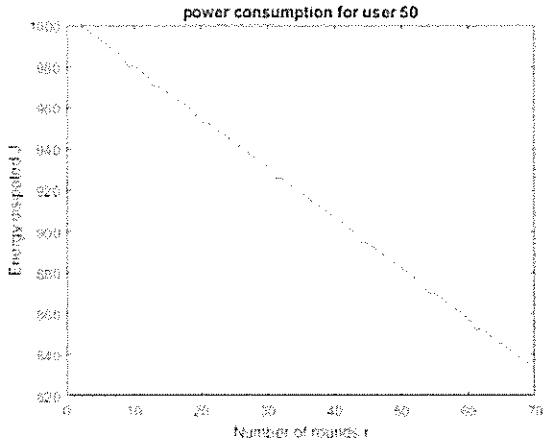


Рис.3.25. Час затримки на БС № 24 у звичайному NB-IoT

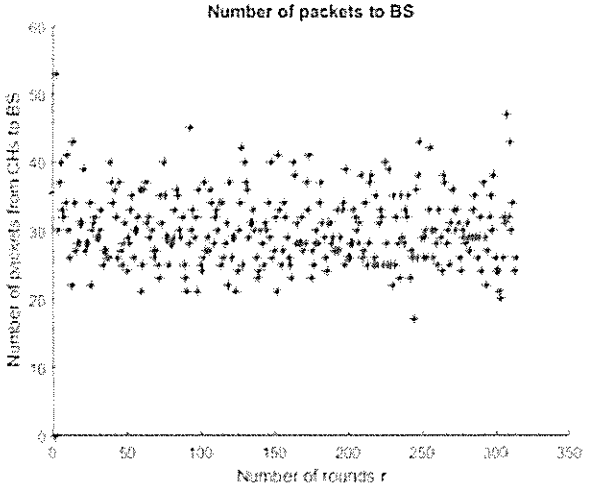


Рис. 3.26. Кількість пакетів на раунд r у мережі attocell NB-IoT D2D

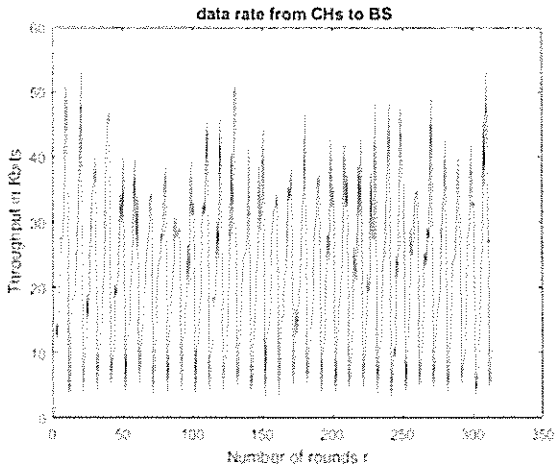


Рис.3.27. Пропускна здатність мережі NB-IoT D2D attocell

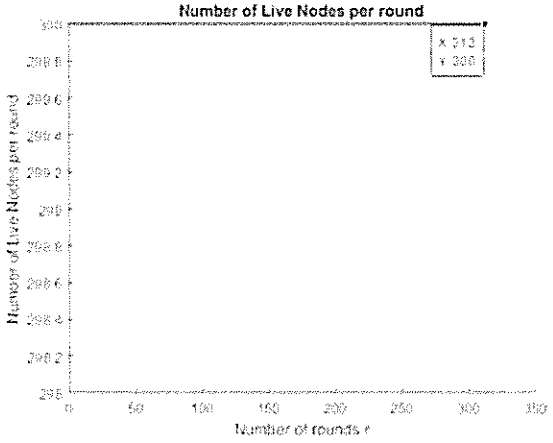


Рис.3.28. Кількість активних вузлів на раунд r з використанням алгоритму LEACH у мережі attocell NB-IoT D2D

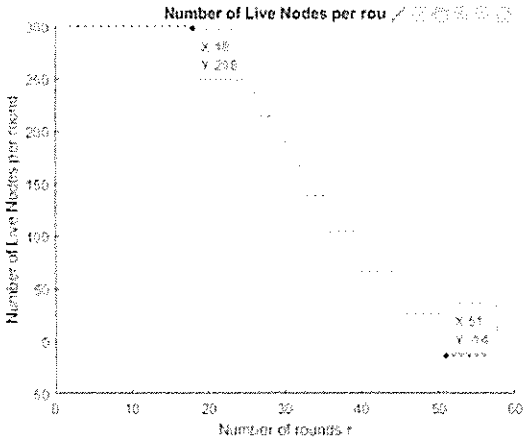


Рис.3.29. Кількість активних вузлів на раунд r без алгоритму LEACH (тобто звичайний NB-IoT)

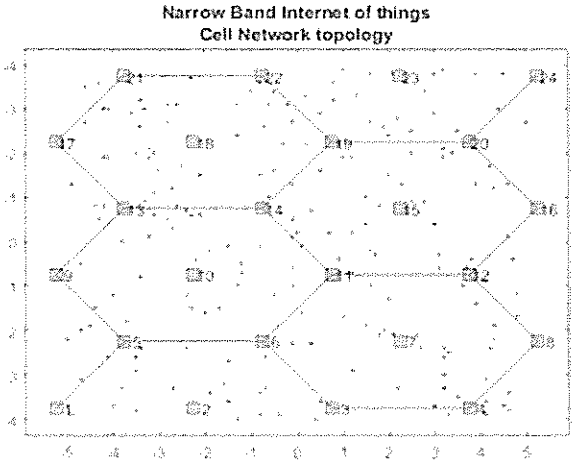


Рис. 3.30. Кінцевий результат, коли всі вузли гинуть

ВИСНОВКИ

Виконуючи поставлені завдання, у магістерській кваліфікаційні роботі, в першу чергу, мною було виконано аналіз стану та перспектив розвитку сучасних мобільних технологій. Наведено перспективи розвитку, сфери застосування, особливості організації та представлено можливі стратегії розгортання NB-IoT, розглядаючи підтримку NB-IoT для малих стільників у співіснуванні зі старим LTE.

У рамках прогнозування поширення технології Інтернет речей було розглянуто ринок IoT та фактори впливу на його зростання, до яких належать економіка, політичні подій, екологічні фактори і технологічний прогрес. Аналіз показав, що незважаючи на зниження прогнозів зростання, IoT залишається дуже актуальною технологічною темою для подальшого розвитку систем зв'язку.

У другому розділі роботи увагу приділено дослідженню технічних особливостей технології NB-IoT в мережах LTE. Описано вимоги та особливості побудови радіоінтерфейсу NB-IoT, досліджено технічну складову, архітектуру та принципи розгортання.

У третьому розділі надається детальна інформація про принципи D2D-фреймворку та симулятора NB-IoT. Слід зазначити, що структура моделювання NB-IoT на основі MATLAB (тобто вихідні коди) і її результати є загальнодоступними на веб-сайті MDPI як додатковий матеріал і на GitHub.

Топологія мережі NB-IoT у реалізації протоколу LEACH зменшила затримки в черзі (затримку) на базовій станції, таким чином зменшивши споживання енергії, збільшивши час роботи батареї, мінімізувавши витрати на зв'язок, дозволивши краще обернути мережу, підтримуючи ефективне використання пропускної здатності та запобігаючи зловмисним програмам. атаки вузлів.

Ці переваги збільшили термін служби та продуктивність усієї мережі. Більше того, наш фреймворк NB-IoT D2D дозволяє дослідникам і розробникам систем оцінювати різні параметри та розробляти покращені проекти NB-IoT,

підвищувати продуктивність і зменшувати вартість їх створення, експлуатації та обслуговування, оскільки бездротовий зв'язок майбутнього буде під значним впливом. завдяки досвіду QoS у зв'язку та очікуваному терміну служби батареї пристроїв.

У майбутньому це дослідження може бути використане для передачі мережі атосот NB-IoT D2D на домотичні додатки в мікросотах, таких як розумні будинки, і промислові програми, які будуть включені в більші системи, такі як приміські та міські сценарії, що включають розумні міста, розумні мережі. , розумні транспортні засоби та сільські райони, що складаються з розумних ферм, а також впровадження обладнання для мобільних користувачів. Це дослідження також можна використати для виявлення різних вибіркових атак зловмисних вузлів, які порушують протоколи маршрутизації на мережевому рівні систем NB-IoT, вивчення їх ефектів і використання керування мережевим зв'язком на основі машинного навчання. Цей інструмент моделювання також міститиме моделі Simulink як пристрої для представлення комунікаційних функцій на фізичному та прикладному рівнях, включаючи набори даних Excel для керування вхідними та вихідними змінними для цілей аналізу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zayas, A.D.; Merino, P. The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Paris, France, 21–25 May 2017.

2. Imran, M.A.; Hussain, S.; Abbasi, Q.H., Narrowband Internet of Things (NB-IoT) for Industrial Automation. In Wireless Automation as an Enabler for the Next Industrial Revolution; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2020; pp. 65–87.

3. Bao, L.;Wei, L.; Jiang, C.; Miao, W.; Guo, B.; Li, W.; Cheng, X.; Liu, R.; Zou, J. Coverage Analysis on NB-IoT and LoRa in Power Wireless Private Network. Procedia Comput. Sci. 2018, 131, 1032–1038.

4. Chen, J.; Hu, K.; Wang, Q.; Sun, Y.; Shi, Z.; He, S. Narrowband Internet of Things: Implementations and Applications. IEEE Internet Things J. 2017, 4, 2309–2314.

5. Boyes, H.; Hallaq, B.; Cunningham, J.;Watson, T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. Comput. Ind. 2018, 101, 1–12.

6. Liao, Y.; Loures, E.d.F.R.; Deschamps, F. Industrial Internet of Things: A systematic literature review and insights. IEEE Internet Things J. 2018, 5, 4515–4525.

7. Huang, X. Quality of service optimization in wireless transmission of industrial Internet of Things for intelligent manufacturing. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019, p. 1007–1016.

8. Sachan, V.K.; Imam, S.A.; Beg, M. Energy-efficient communication methods in wireless sensor networks: A critical review. Int. J. Comput. Appl. 2012, 39, 35–48.

9. Jamali, J.; Bahrami, B.; Heidari, A.; Allahverdizadeh, P.; Norouzi, F. Towards the Internet of Things; Springer International Publishing AG: Cham, Switzerland, 2020.

10. L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "SIoT: Giving a Social Structure to the Internet of Things," IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 11, pp. 1193 - 1195, November 2020.

11. W. Abdelghani, C. A. Zayani, I. Amous, and F. Sedes, "Trust Management in Social Internet of Things: A Survey," in the 15th IFIP Conference on e-Business, e-Services and e-Society (I3E2016), Swansea, UK, 13 - 15 September 2016.

12. R. Girau, S. Martis, and L. Atzori, "Neighbor discovery algorithms for friendship establishment in the social Internet of Things," IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp. 1 - 6, 2016.

13. E. Rastogi, N. Saxena, A. Roy, and D. R. Shin. Narrowband internet of things: A comprehensive study. Computer Networks, 173:1 – 40, May 2020.

14. G. Berardinelli, L. A. M. Ruiz de Temino, S. Frattasi, M. I. Rahman, and P. Mogensen. OFDMA vs. SC-FDMA: performance comparison in local area imt-a scenario. IEEE Wireless Communications, 15(5):64 –72, October 2018.

15. 3GPP. 3GPP TS 36.101, User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 13, v13.9.0). Technical report, 3GPP, November 2017.

16. 3GPP. 3GPP TS 36.211, Physical channels and modulation (Release 13, v13.9.0). Technical report, 3GPP, April 2018.

17. R. Frank. Polyphase codes with good nonperiodic correlation properties. IEEE Transactions on Information Theory, 9(1):43 – 45, January 1963.

18. D. Chu. Polyphase codes with good periodic correlation properties. IEEE Transactions on Information Theory, 18(4):531 – 532, July 1972.

19. H. Kr¨oll, M. Korb, B. Weber, S. Willi, and Q. Huang. Maximum-Likelihood Detection for Energy-Efficient Timing Acquisition in NBIoT. In proc. of WCNCW'17. San Francisco, CA, March 2017.

20. Nauman, A.; Jamshed, M.A.; Ahmad, Y.; Ali, R.; Zikria, Y.B.; Kim, S.W. An intelligent deterministic D2D communication in narrow-band Internet of Things. In Proceedings of the IEEE 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), Tangier, Morocco, 24–28 June 2019; pp. 2111–2115.

21. Asadi, A.; Wang, Q.; Mancuso, V. A survey on device-to-device communication in cellular networks. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2014, 16, 1801–1819.20.

22. Zhang, Y.; Pan, E.; Song, L.; Saad, W.; Dawy, Z.; Han, Z. Social network aware device-to-device communication in wireless networks. IEEE Trans. Wirel. Commun. 2014, 14, 177–190.

23. Al-Samman, A.M.; Rahman, T.A.; Hindia, M.; Daho, A.; Hanafi, E. Path loss model for outdoor parking environments at 28 GHz and 38 GHz for 5G wireless networks. Symmetry 2018, 10, 672.

24. Pawa, T.D.S. Analysis of Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) Protocol. BTech Thesis, Department of Computer Science and Engineering, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela-769 008, Orissa, India, 2011.

25. Althobaiti, O.S.; Dohler, M. Cybersecurity Challenges AssociatedWith the Internet of Things in a Post-QuantumWorld. IEEE Access 2020, 8, 157356–157381.

26. da Cruz, R.M. Network Planning Model for NB-IoT. Master's Thesis, Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto, Porto, Portugal, 2019.

27. Malik, H.; Pervaiz, H.; Alam, M.M.; Le Moullec, Y.; Kuusik, A.; Imran, M.A. Radio resource management scheme in NB-IoT systems. IEEE Access 2018, 6, 15051–15064.

28. Singh, A.; Kumar, A.; Kumar, A.; Dwivedi, V. Radio Frequency global positioning system for real-time vehicle parking. In Proceedings of the IEEE 2016 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), Noida, India, 26–28 December 2016; pp. 479–483.

29. Rappaport, T. Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed.; Pearson Education: London, UK, 2010.

30. 30. Piro, G.; Grieco, L.A.; Boggia, G.; Capozzi, F.; Camarda, P. Simulating LTE cellular systems: An open-source framework. IEEE Trans. Veh. Technol. 2010, 60, 498–513.

31. Azari, A.; Stefanovic´, C˘ .; Popovski, P.; Cavdar, C. On the latency-energy performance of nb-iot systems in providing wide-area iot connectivity. IEEE Trans. Green Commun. Netw. 2019, 4, 57–68.

32. Azari, A.; Miao, G.; Stefanovic, C.; Popovski, P. Latency-energy tradeoff based on channel scheduling and repetitions in NB-IoT systems. In Proceedings of the

2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–13 December 2018; pp. 1–7.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

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

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:
"МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ СТАНДАРТУ NB-IOT"

Виконав: студент 6 курсу групи АРДМ-61
Бакута І.І.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ

Мета роботи - підвищення показників якості мережі зв'язку на базі технології NB-IoT.

Об'єкт дослідження – процес підвищення енергоефективності мереж зв'язку.

Предмет дослідження - мережа безпроводового зв'язку NB-IoT

Завдання магістерської роботи:

1. Аналіз стану та перспектив розвитку сучасних безпроводових технологій зв'язку;
2. Дослідження технічних особливостей мережі NB-IoT;
3. Моделювання NB-IoT D2D.

АНАЛІЗ СВІТОВОГО РИНКУ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ

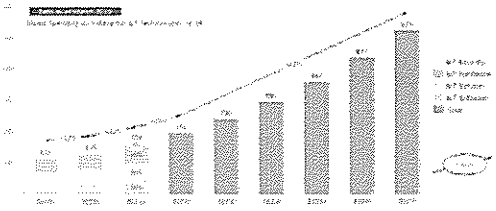


Рис 1. Аналіз та прогноз зростання ринку [6]

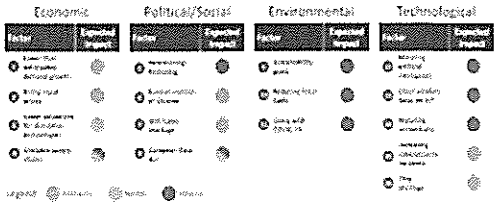


Рис 2. Фактори впливу на ринок [6]

ОГЛЯД ПОШИРЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ МЕРЕЖ



Рис 3. Географічне розгортання NB IoT та LTE-M

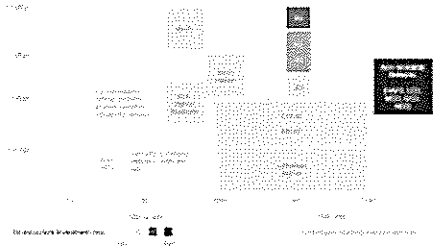


Рис 4. Технології для підключення до інтернет речей

Таблиця 1. Порівняння технологій LTE-M і NB-IoT

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ ВІДМІННОСТЕЙ МЕРЕЖ ТА ПОДАЛЬШІ ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ

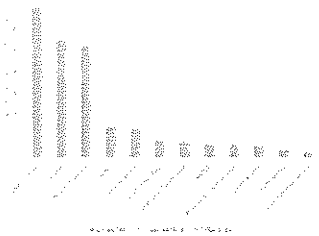


Рис 5. IoT підключення в 2030 р

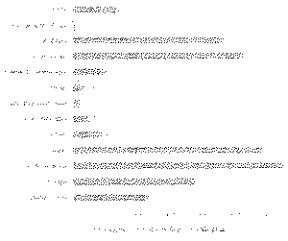


Рис 6. IoT підключення на душу населення в 2030 р

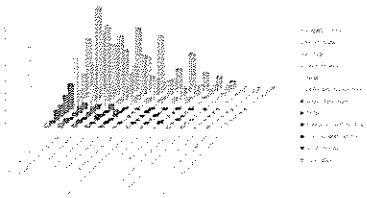


Рис 7. IoT дохід на душу населення порівняно з 2030 р

АРХІТЕКТУРА ТЕХНОЛОГІЇ NB-IOT

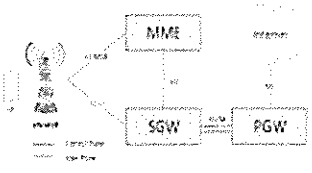


Рис. 8. Розподіл CP- і UP-інтерфейсів у класичній архітектурі LTE

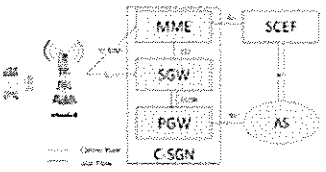


Рис. 9 Розподіл CP- і UP-інтерфейсів для NB-IoT

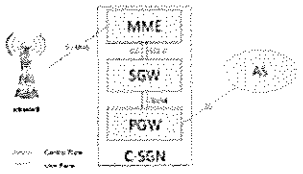


Рис. 10. Приклад передачі даних

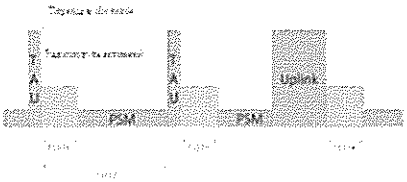


Рис. 11. Структура механізму управління енергоспоживанням

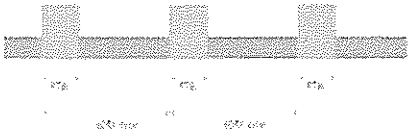


Рис. 12. Структура механізму роботи в режимі розширеного переривчастого прийому

ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ NB-IOT



Рис. 13. Багатоплатформність NB-IoT в режимі stand-alone

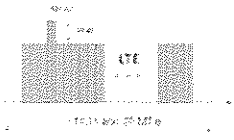


Рис. 14 Розміщення NB-IoT в режимі in-band

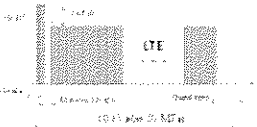


Рис. 15 Розміщення NB-IoT в режимі guard band



Рис. 16. Шестикластерна схема DL

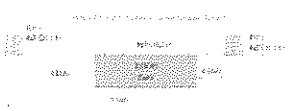


Рис. 17. Шестикластерна схема UL

Таблиця 2. Рекомендовані діапазони частот для мереж NB-IoT

Регіон/країна	DL (BS передає, UE приймає), МГц	UL (UE передає, BS приймає), МГц	Дуплекс
A1	925–960 МГц	880–915 МГц	FDD
A2	869–894 МГц	824–849 МГц	FDD
A3	791–821 МГц	832–862 МГц	FDD
A4	1805–1880 МГц	1710–1785 МГц	FDD
A5	2110–2170 МГц	1920–1980 МГц	FDD
A6	2620–2690 МГц	2500–2570 МГц	FDD
A7	1930–1990 МГц	1850–1910 МГц	FDD
A8	1805–1880 МГц	1710–1785 МГц	FDD

NB-IOT D2D ФРЕЙМВОРК, МОДЕЛЬ І СИМУЛЯЦІЯ

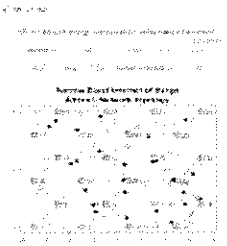


Рис. 18. Графічний інтерфейс користувача GUI для авторського симулятора NB IoT

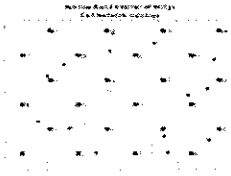


Рис. 19. Топологія мережі NB IoT абонентів у рівнині

Таблиця 3 Параметри системи моделювання NB-IoT D2D в середовищі MATLAB

Параметр	Значення
Частотний діапазон	900 МГц
Ширина смуги	180 кГц
Потужність передавача	23 дБм
Модель поширення	Okumura-Hata
Висота антени BS	30 м
Висота антени UE	1.5 м
Чутливість приймача	−141 дБм
Кількість UE	100
Кількість BS	7
Радіус комірки	1 км
Швидкість UE	3 км/год
Модель руху	Random Walk
Період моделювання	1000 с
Крок часу	1 с
Кількість ітерацій	100
Алгоритм вибору BS	Найближча BS
Алгоритм планування	Round Robin
Модель каналу	Rayleigh fading
Затримка передачі	10 мс
Ймовірність втрати пакета	0.01
Розмір пакета	200 байт
Інтервал між пакетами	1 с

Таблиця 4 Структура класів імітаційної моделі інтернет речей (NB IoT) на основі MATLAB (OOP)

Сутність	Призначення	Примітки
NB_IoT_Device	Основний клас пристрою	Містить координати, швидкість, напрямок руху, стан (активний/сплячий)
NB_IoT_BaseStation	Базова станція	Містить координати, радіус покриття, список підключених пристроїв, методи обробки запитів
UserEquipment	Користувацьке обладнання	Наслідує NB_IoT_Device, додає параметри енергоспоживання
SensorNode	Сенсорний вузол	Наслідує NB_IoT_Device, додає параметри датчика та генерації даних
SimulationEngine	Керування симуляцією	Містить головний цикл, обробку подій, збір статистики

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ КАНАЛІВ

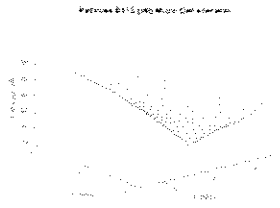


Рис. 20 Модель втрат на трасі для БС № 15 у сценарії макростільників

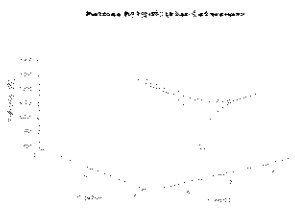


Рис. 21 Модель втрат на трасі для БС № 15 у сценарії міських макростільників

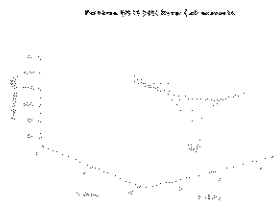


Рис. 22 Модель втрат на трасі для БС № 15 у сценарії макростільників в сільській місцевості

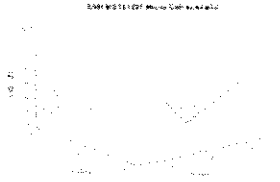


Рис. 23 Відношення сигнал/шум (SNR) для БС № 15 у сценарії макростільників

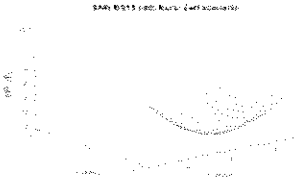


Рис. 24 SNR для БС № 15 у сценарії макростільників в сільській місцевості

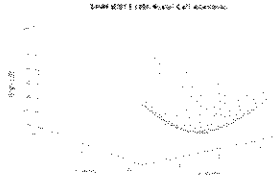
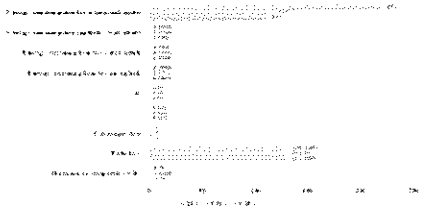
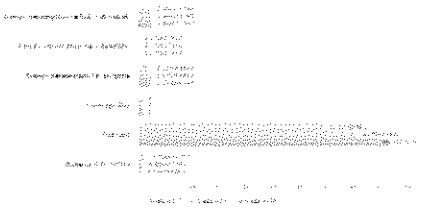


Рис. 25 Відношення сигнал/шум (SNR) для БС № 15 у сценарії макростільників в сільській місцевості

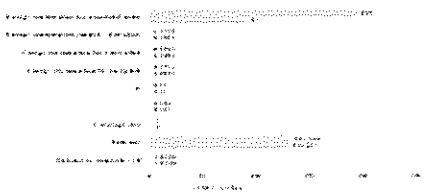
РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛЮВАННЯ



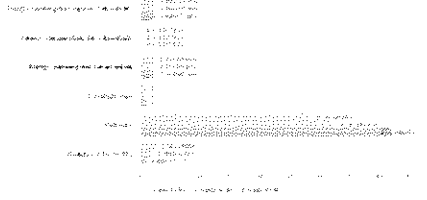
а Черга на БС № 18 з використанням протоколу LEACH



в Черга СВЗ № 170 з використанням протоколу LEACH



б Черга БС № 19 з використанням протоколу LEACH



г Черга СВЗ № 171 з використанням протоколу LEACH

Рис 26. Черга на базових станціях № 18 і № 19 у локалізації структури D2D NB-IoT

Рис. 27 Черга СВЗ № 170 і № 171 з використанням протоколу LEACH

РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛЮВАННЯ

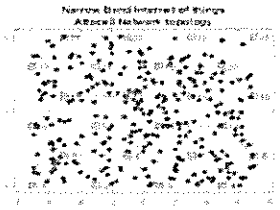


Рис. 28 Мережа NB IoT без дани LEACH на вибірковому від'ємі відповідальної кількості користувачів

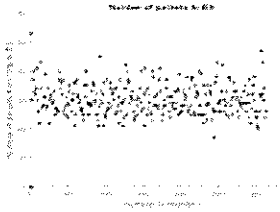


Рис. 29 Кількість пакетів, що надходять через вибірку NB IoT D2D

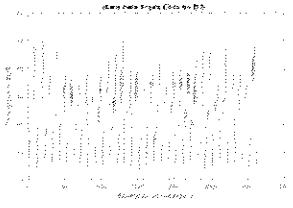


Рис. 30 Пропускна здатність мережі NB-IoT D2D даних

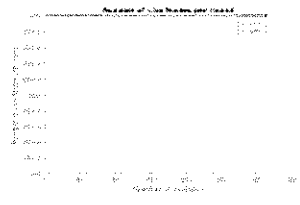


Рис.31 Кількість активних вузлів на раунді з використанням алгоритму LEACH у мережі вибірці NB-IoT D2D



Рис. 32 Кількість активних вузлів на раунді при алгоритму LEACH (модель локальний NB IoT)

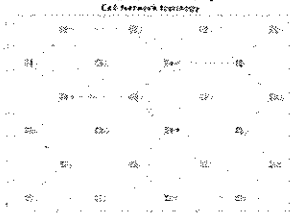


Рис. 33 Кінцевий результат, коли всі вузли спять

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Таким чином, у роботі виконано аналіз стану та перспектив розвитку сучасних мобільних технологій. Наведено порівняльну роль, сфери застосування, особливості організації та представлено можливі стратегії розгортання NB-IoT, розглянувши патрунку NB-IoT для малих стільників у співіснуванні зі старою LTE.

У рамках прогнозування поширення технології Інтернет речей було розглянуто ринок IoT та фактори впливу на його зростання, до яких належать економіка, політичні полії, екологічні фактори і технологічний прогрес. Аналіз показав, що незважаючи на економічна прогнози зростання IoT залишається дуже актуальною технологічною течією для подальшого розвитку систем зв'язку.

Досліджено технічні особливості NB-IoT в мережах LTE. Описано вимоги та особливості побудови радіоінтерфейсу NB-IoT, досліджено технічну складову, архітектуру та принципи розгортання.

У практичній частині надається детальна інформація про принципи D2D-фреймворку та симулятора NB-IoT.

Аналіз показав, що топологія мережі NB-IoT у реальній промисловій LEACH зменшує затримки в черзі на базовій станції, таким чином зменшуючи споживання енергії, збільшивши час роботи батареї, мінімізувавши витрати на зв'язок, дозволивши краще оберігати мережу, підтримуючи ефективне використання пропускної здатності та запобігаючи зловмисним програмам атакувати вузли.

Це перевищує збільшують термін служби та продуктивність мої мережі. Більше того фреймворк NB-IoT D2D дозволяє дослідникам і розробникам систем оцінювати різні параметри та розробляти покращені протоки NB-IoT, підвищувати продуктивність і мінімізувати витрати за створення, експлуатації та обслуговування, основані бездротовій зв'язок, майбутнього буде під значним впливом таких ключів якості QoS з зв'язку та очікуваному терміну служби батареї пристроїв.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

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

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

на тему: Методи підвищення продуктивності роботи мобільних мереж на базі стандарту NB-IoT

Магістерська робота і рецензія додаються.

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

Довідка про успішність

Бакута І.І. 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 6 %, добре 44 %, задовільно 50%;
шкалою ECTS: A 6 %; B 11 %; C 33 %; D 44%; E 6 %.

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

Висновок керівника магістерської роботи

Студент Бакута Ілля Ігорович 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 Бакута Ілля Ігорович 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 Бакута І.І.
(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 Бакути Іллі Ігоровича
на тему: «МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ СТАНДАРТУ NB-IOT»

Актуальність:

Вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT) демонструє високоякісне підключення, яке підтримується мережами п'ятого покоління (5G), щоб охопити широкий спектр програм IoT. Реалізація пристроїв та їх інтеграція в різні інтелектуальні системи вимагають постійного контролю, нагляду та вивчення для визначення продуктивності топології мережі та вимірювання ефективності застосування. Головною «продаючою позицією» NB-IoT є низьке енергоспоживання, яке збільшує час роботи батареї вбудованих пристроїв. Саме тому дана технологія дозволить операторам мобільного зв'язку негайно забезпечити надання комерційних рішень у сегменті IoT. Але постійні зростаючі вимоги споживачів зумовлюють на нові дослідження та постійне вдосконалення систем. Тому актуальною задачею є дослідження та застосування різного роду методів та засобів підвищення показників якості мережі NB-IoT.

Позитивні сторони:

Поставлені завдання виконані у повному обсязі. Отримані результати магістерської кваліфікаційної роботи сприяють зниженню енергоспоживання, мінімізації затримок у черзі та дозволяє знизити вартість зв'язку, що робить її актуальною та своєчасною.

Недоліки:

1. Доцільно було б приділити увагу питанню безпеки передачі інформації на базі досліджуваної технології.
2. У магістерській кваліфікаційні роботі не у повній мірі розглянуто технічні особливості обладнання технології NB-IoT.

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку **відмінно**, а студент Бакута Ілля Ігорович – 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 _____
(_____П.І.Б._____)
доц. каф. ТСМ Лавріненко К.Г.