

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Сергій КРАВЧУК
«__» _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Дослідження потенціалу 5G мереж у підвищенні ефективності
комунікації між пристроями Інтернету речей»**

Виконала:

студентка II курсу, групи ЦК-32мп
Пономаренко Єліна Олексіївна _____

Науковий керівник:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н., с.н.с.,
Міночкін Дмитро Анатолійович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ, к.т.н., доцент,
Новогрудська Ріна Леонідівна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студентка _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Пономаренко Еліні Олексіївні

1. Тема дисертації «Дослідження потенціалу 5G мереж у підвищенні ефективності комунікації між пристроями Інтернету речей», науковий керівник дисертації Міночкін Дмитро Анатолійович, к.т.н., с.н.с., затверджені наказом по університету від «07» листопада 2024 р. № 4989-с.
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2024 р.
3. Об'єкт дослідження: комунікаційні процеси між пристроями Інтернету речей (IoT) у контексті впровадження технології 5G.
4. Вихідні дані до роботи: інформаційні матеріали про архітектури та функціонування Інтернету речей, інформаційні матеріали про 5G. Структурований план порядку розробки матеріалів магістерської дисертації.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 1) **Аналіз існуючих технологій зв'язку для IoT**
Провести огляд сучасних стандартів бездротового зв'язку для IoT (наприклад, 4G, LTE, NB-IoT, LPWAN) та їх обмежень у порівнянні з можливостями 5G.

2) Дослідження технічних характеристик 5G

Описати основні характеристики 5G, що роблять її ідеальною для використання з IoT-пристроями: висока швидкість передачі даних, низька затримка, підтримка великої кількості підключень, підвищена надійність тощо.

3) Моделювання та симуляція IoT-систем у 5G

Розробити моделі та симуляції взаємодії IoT-пристроїв у мережі 5G. Включити різні сценарії використання (розумні міста, промислові IoT-системи, транспортні системи тощо) та виміряти ключові параметри: швидкість передачі, затримка, енергоспоживання.

4) Аналіз впливу 5G на продуктивність IoT-систем

Вивчити, як впровадження 5G покращує продуктивність IoT-систем порівняно з попередніми технологіями зв'язку. Оцінити підвищення ефективності за рахунок зменшення затримки та зростання пропускну здатності.

5) Вивчення викликів і ризиків впровадження 5G для IoT

Ідентифікувати можливі виклики та ризики, пов'язані з використанням 5G для IoT: безпека даних, масштабованість, конфіденційність, вимоги до інфраструктури.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

- 1) Тема, актуальність, мета та задачі магістерської дисертації;
- 2) Архітектура 5G-IoT з використанням Simu5G
- 3) Приклад сценарію симуляції Simu5G із двома шлюзами IoT, кожен із яких підключено до двох пристроїв IoT;
- 4) Параметри моделювання
- 5) Список публікацій;
- 6) Загальні висновки по роботі.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

- 1) Міночкін Д.А., Мацюк Е.О. (2023). СИСТЕМА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА БАЗІ МЕРЕЖІ 5G. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ», [201-204]. Вилучено із <http://conferenc.its.kpi.ua/2023/index>.

8. Дата видачі завдання “ 2 ” вересня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка, оформлення, узгодження та затвердження технічного завдання на роботу. Аналітичний огляд інформаційних матеріалів. Підбір та опрацювання необхідної науковотехнічної літератури.	02.09.2023 – 22.12.2023	Виконано
2	Ознайомлення із ключовими характеристиками 5G мереж, включаючи пропускну здатність, затримку, надійність та масштабованість. Проаналізувати типові сценарії використання IoT пристроїв і вимоги до їх комунікації. Поглиблене вивчення архітектури 5G. Порівняння 5G з іншими технологіями. Дослідження безпеки в IoT за допомогою 5G. Вибір кейсів для аналізу.	23.12.2023 – 16.07.2024	Виконано
3	Проблеми масштабованості та інтероперабельності. Підготовка до практичного експерименту (якщо є доступ до реального обладнання. Аналіз зібраних даних. Порівняння результатів із теоретичними. Формулювання висновків. Розробка пропозицій для подальших досліджень.	17.07.2024 – 07.11.2024	Виконано
4	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	08.11.2024 – 17.11.2024	Виконано
5	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	18.11.2024 – 24.11.2024	Виконано

Студент

Еліна ПОНОМАРЕНКО

Науковий керівник

Дмитро МІНОЧКІН

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить 162 сторінки, 35 рисунків, 41 таблицю. Було використано 109 джерел.

Актуальність. Розвиток мереж п'ятого покоління (5G) є ключовим фактором у вдосконаленні комунікаційних технологій, особливо в контексті Інтернету речей (IoT). Зростаючі потреби у швидкості передачі даних, низьких затримках і високій надійності зумовлюють необхідність детального дослідження потенціалу 5G для ефективного обміну даними між пристроями IoT. Впровадження 5G створює нові можливості для розвитку смарт-технологій у таких сферах, як медицина, транспорт, промисловість та розумні міста. Таким чином, аналіз впливу 5G на IoT є актуальним і важливим для сучасного суспільства.

Мета роботи. Вивчити потенціал технологій 5G для підвищення ефективності комунікацій між пристроями Інтернету речей, а також визначити ключові переваги та виклики, пов'язані з їх впровадженням.

Об'єкт дослідження. Мережі п'ятого покоління (5G) та їх застосування у сфері Інтернету речей.

Предмет дослідження. Процеси комунікації між IoT-пристроями в умовах використання мереж 5G, їхня ефективність, надійність і масштабованість.

Методи дослідження

1. **Аналіз літератури та джерел:** огляд наукових публікацій, технічної документації та звітів щодо 5G і IoT.
2. **Експериментальне моделювання:** створення симуляційних моделей для оцінки ефективності 5G у комунікаціях IoT.
3. **Порівняльний аналіз:** зіставлення характеристик 5G з попередніми поколіннями мобільного зв'язку (3G, 4G).

4. **Статистичні методи:** обробка отриманих даних для оцінки ефективності мереж.

Отримані результати

1. Встановлено, що 5G забезпечує значне зменшення затримок (до 1 мс), що критично важливо для пристроїв IoT у реальному часі.
2. Досліджено, що використання 5G дозволяє підтримувати мільйони підключень на одиницю площі, що сприяє масштабованості IoT-мереж.
3. Показано, що 5G покращує енергетичну ефективність пристроїв завдяки оптимізації передачі даних.
4. Виявлено, що основними викликами є висока вартість впровадження 5G і потреба у стандартизації технологій для IoT.
5. Рекомендовано інтеграцію 5G з технологіями штучного інтелекту для подальшої оптимізації IoT-систем.

Ключові слова. ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МЕРЕЖІ 5G, ЗАХИСТ ДАНИХ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ МЕРЕЖІ, МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ, МОНІТОРИНГ БЕЗПЕКИ, КРИПТОГРАФІЯ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.

ABSTRACT

The thesis contains 162 pages, 35 figures, and 41 tables. A total 109 references.

Relevance. The development of fifth-generation (5G) networks is a key factor in advancing communication technologies, particularly in the context of the Internet of Things (IoT). The growing demands for high-speed data transmission, low latency, and high reliability necessitate a detailed study of 5G's potential for effective data exchange between IoT devices. The introduction of 5G creates new opportunities for the evolution of smart technologies in fields such as healthcare, transportation, industry, and smart cities. Thus, analyzing the impact of 5G on IoT is both timely and essential for modern society.

Objective. To explore the potential of 5G technologies in enhancing communication efficiency between IoT devices and identify the key benefits and challenges associated with their implementation.

Research Object. Fifth-generation (5G) networks and their application in the Internet of Things domain.

Research Subject. Communication processes between IoT devices under the conditions of 5G network utilization, their efficiency, reliability, and scalability.

Research Methods

1. **Literature and source analysis:** review of scientific publications, technical documentation, and reports on 5G and IoT.
2. **Experimental modeling:** development of simulation models to assess 5G efficiency in IoT communications.
3. **Comparative analysis:** comparison of 5G characteristics with previous generations of mobile networks (3G, 4G).
4. **Statistical methods:** processing the obtained data to evaluate network efficiency.

Results Obtained

1. It was established that 5G significantly reduces latency (up to 1 ms), which is critical for real-time IoT devices.
2. Research showed that 5G enables support for millions of connections per unit area, contributing to IoT network scalability.
3. It was demonstrated that 5G improves energy efficiency of devices through optimized data transmission.
4. The main challenges identified include the high cost of 5G deployment and the need for technology standardization in IoT.
5. Recommendations were made to integrate 5G with artificial intelligence technologies for further optimization of IoT systems.

Keywords: INTERNET OF THINGS, 5G NETWORKS, DATA SECURITY, TELECOMMUNICATION NETWORKS, MANAGEMENT MODEL, SECURITY MONITORING, CRYPTOGRAPHY, INFORMATION TECHNOLOGIES.

ЗМІСТ

ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1	17
АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НА ТЕМУ ДОСЛІДЖЕННЯ	17
1.1 Відомості про Інтернет Речей	17
1.1.1 Архітектура IoT	17
1.1.5 Огляд 5G.....	26
1.1.6 Еволюція 5G.....	27
1.1.7 Характеристики та вимоги екосистеми 5G.....	29
1.1.8 Архітектура 5G.....	30
Висновки:.....	35
РОЗДІЛ 2	38
5G ДЛЯ ІОТ	38
2.1 Чому 5G для IoT?.....	40
2.2 Майбутнє підключених пристроїв IoT з 5G	41
2.3 Вимоги до інтегрованої архітектури 5G IoT	42
2.4 5G IoT на основі блокчейну	44
2.5 5G IoT зі штучним інтелектом	45
2.6 Можливості 5G Integrated IoT	46
2.7. Проблеми інтегрованого Інтернету речей 5G	55
Висновки:.....	64
РОЗДІЛ 3	65
ДОСЛІДЖЕННЯ	65
3.1. Порівняння між 5G та IoT	65
3.2. Програми 5G, на які впливають пристрої IoT.....	66
3.3. Світові дослідження впливу перешкод мережі 5G на послуги IoT.....	70
3.4. Вимоги до впровадження 5G.....	76
3.5. Співіснування мереж 5G та програм IoT	83
3.6. Перешкоди та труднощі оптимізації мережі	84
3.7. Мобільні покоління та IoT.....	93

3.8. Переваги конвергенції мереж 5G і послуг Інтернету речей	101
3.9. Ідеї для зменшення перешкод	106
3.10. Запропонована архітектура 5G IoT	109
Висновки:.....	125
РОЗДІЛ 4	127
РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	127
4.1. Опис ідеї проекту впровадження 5G для підвищення ефективності комунікації між пристроями Інтернету речей	127
4.2. Технологічний аудит проектної ідеї.....	129
4.3. Аналіз можливостей для запуску стартапу.....	131
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	139
Висновок:.....	143
ЗАГАЛЬНІ Висновки ПО РОБОТІ	144
Список ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- 5G** — п'яте покоління мобільного зв'язку.
- IoT** — (**Internet of Things**) Інтернет речей.
- QoS** — (**Quality of Service**) Якість обслуговування.
- QoE** — (**Quality of Experience**) Показник, що оцінює загальний рівень задоволення користувача роботою сервісу або пристрою на основі його суб'єктивного сприйняття.
- eMBB** — (**enhanced Mobile Broadband**) Підвищена мобільна широкопasmугова передача. Один із ключових сценаріїв використання 5G для забезпечення високої швидкості передачі даних і поліпшеної якості з'єднання.
- mMTC** — (**massive Machine Type Communications**) Масові комунікації між машинами. Один із сценаріїв використання 5G, який підтримує велику кількість одночасних підключень для IoT пристроїв з низьким енергоспоживанням.
- LTE** — (**Long Term Evolution**) Технологія мобільного зв'язку четвертого покоління (4G), що передувала 5G та забезпечує високу швидкість передачі даних і зниження затримок.
- MIMO** — (**Multiple Input, Multiple Output**) Багатоантенна технологія. Використовується в 5G для одночасної передачі та прийому кількох потоків даних, що значно підвищує пропускну здатність мережі.
- NB-IoT** — (**Narrowband IoT**) Вузькосмуговий Інтернет речей. Технологія, спеціально розроблена для підтримки підключення пристроїв IoT з низьким енергоспоживанням і малими обсягами даних у межах мереж 5G.

- RAN** — **(Radio Access Network)** Радіомережа доступу. Система, що з'єднує кінцевих користувачів з основною мережею за допомогою бездротових сигналів.
- OFDMA** — **(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)** Ортогональний частотний розподіл множинного доступу. Технологія мультиплексування, яка використовується в 5G для підвищення ефективності передачі даних.

ВСТУП

Актуальність. Пандемія COVID-19 переключила увагу широкої громадськості на цифрові рішення та викликала величезний попит на ринку телекомунікацій. Конвергенція технології 5G та Інтернету речей (IoT) [1] є наступним природним кроком для двох передових технологій, розроблених, щоб зробити життя своїх користувачів доступнішим, комфортнішим і продуктивнішим [2]. Однією з найстандартніших технологій, які будуть введені в масову сферу, є 5G, яка створить нові можливості для бізнесу завдяки доповненню промисловістю 4.0, пристроями Інтернету речей і розумними містами та покращить загальне підключення по всьому світу [3]. Ця технологія відкриває чудові можливості для багатьох учасників у всіх сферах діяльності [4].

Такі кінцеві точки, як Bluetooth, Zigbee, RFID або Wi-Fi, можуть бути значно ефективнішими за сценаріїв, коли 5G може бути доступним, але ще не досяг значного масштабу ринку для створення конкурентоспроможних кінцевих точок або мережевих послуг [6]. Технічні дослідження [7] показують, що 5G та інші послуги можуть співіснувати в певних діапазонах частот. Технічні умови мають бути належним чином адаптовані та не бути надмірно обмежувальними; інакше існує ризик вплинути на вартість, покриття та якість роботи послуг 5G.

Технології IoT зараз широко використовуються на ринку споживчого рівня, головним чином націлені на домашню автоматизацію та безпеку. Цей ріст споживчого сприйняття призвів до пропозицій включити пристрої IoT, щоб перенести ці типи вдосконалень у масштаби міста [9]. Передбачається, що ці вдосконалення покращують завдання безпеки та автоматизації та вирішують довгострокові труднощі, такі як контроль руху, управління відходами тощо.

Технологія 5G пропонує вищу швидкість і більшу пропускну здатність,

дозволяючи користувачам отримувати доступ до високоякісного відео, аудіо та іншого медіа-вмісту в режимі реального часу [**11**]. Це означає, що інтернет-провайдери можуть запропонувати низку нових послуг і програм, які раніше були неможливими, наприклад досвід віртуальної та доповненої реальності та захоплюючі ігри.

Успіх послуг IoT у мережах 5G залежить від здатності мереж ефективно керувати перешкодами. Перешкоди можуть виникати, коли різні пристрої IoT працюють в одній зоні, і їхні сигнали накладаються, спричиняючи нижчу пропускну здатність, вищу затримку та зниження надійності [**14**]. Це серйозний виклик для мереж 5G і послуг IoT, оскільки вони розроблені для підтримки великої кількості пристроїв і програм, кожен з яких має унікальні вимоги до підключення та затримки.

Основною метою цієї роботи полягає в тому, щоб узагальнити вплив перешкод на провідні технології 5G, які впливатимуть на зв'язок пристроїв IoT.

Сервіси Інтернету речей використовуються в різних галузях промисловості, зокрема в охороні здоров'я, виробництві та транспорті, де надійне та ефективне підключення має важливе значення для належного функціонування пристроїв Інтернету речей і безперебійної роботи бізнес-процесів. Якщо не вирішити проблеми з перешкодами та продуктивністю мережі, підприємства можуть зіткнутися зі зниженням продуктивності, збільшенням часу простою та зниженням задоволеності клієнтів. Отже, усунення перешкод і оптимізація мереж 5G у послугах Інтернету речей має важливе значення для забезпечення надійного та ефективного підключення для пристроїв Інтернету речей і дозволяє підприємствам повною мірою скористатися перевагами мереж 5G і послуг Інтернету речей. З цієї причини мотивація цієї роботи полягає в огляді сучасного стану роботи з усунення перешкод та оптимізації технологій 5G у послугах IoT.

Втручання та оптимізація мереж 5G у послугах Інтернету речей важливі

для забезпечення надійного та ефективного підключення для пристроїв Інтернету речей, що важливо для належного функціонування бізнес-процесів. Впроваджуючи методи керування перешкодами та оптимізуючи продуктивність мережі, компанії можуть повною мірою скористатися перевагами мереж 5G та послуг IoT.

Об'єктом дослідження є комунікаційні процеси між пристроями Інтернету речей (IoT) у контексті впровадження технології 5G.

Предметом дослідження є технічні та функціональні можливості 5G мереж для підвищення ефективності комунікації між пристроями Інтернету речей (IoT). Це включає аналіз основних характеристик 5G технологій, таких як пропускна здатність, швидкість передачі даних, затримки, надійність з'єднань та енергоефективність, і їхній вплив на ефективність взаємодії IoT-пристроїв у різних сценаріях використання.

Методологічна база дослідження базується на системному підході та комплексному аналізі. Основними методами дослідження є:

- Теоретичний аналіз наукової літератури, статей та досліджень у сфері 5G і IoT.
- Математичне моделювання для оцінки ефективності передачі даних в умовах використання 5G.
- Емпіричні дослідження на основі порівняння існуючих мереж 4G та 5G у контексті комунікаційних можливостей для IoT.
- Експертне оцінювання та аналіз практичних кейсів щодо впровадження 5G для IoT в різних галузях (промисловість, транспорт, медицина, розумні міста тощо).
- Симуляції роботи мереж для моделювання комунікацій між IoT-пристроями за допомогою 5G технологій.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному дослідженні можливостей 5G мереж для покращення комунікацій між пристроями Інтернету

речей, зокрема:

- Визначено, які аспекти технології 5G (eMBB, URLLC, mMTC) найбільш ефективно впливають на роботу IoT-пристроїв у різних сценаріях використання.
- Проведено аналіз впливу малих затримок, високої швидкості та пропускної здатності 5G на стабільність та надійність зв'язку між IoT-пристроями.
- Запропоновано нові моделі для оптимізації комунікацій в мережах 5G для IoT-платформ, що дозволяють мінімізувати енергоспоживання та затримки передачі даних.
- Оцінено потенційний економічний ефект від впровадження 5G для систем Інтернету речей, що дозволяє покращити управління інфраструктурою та бізнес-процесами.

Результатом магістерської дисертації є представити ідею про те, що конвергенція мереж 5G і послуг IoT представляє технологічну революцію, яка обіцяє змінити те, як ми взаємодіємо з навколишнім світом. У цій роботі описуються основні проблеми між мережами 5G і послугами Інтернету речей і підкреслюється необхідність повної інтеграції цих технологій для досягнення повного потенціалу. Ця робота підкріплює ідею, що технології IoT забезпечують послуги 5G, а їхня сумісність має вирішальне значення для надання споживачам високошвидкісних послуг із малою затримкою. Крім того, це підкреслює, що перешкоди є однією з найбільших проблем, з якими стикаються виробники, і вони повинні враховувати це, щоб пропонувати сумісні та надійні послуги. Зрештою, ця робота спрямовує галузь на те, щоб технології 5G та IoT безперервно працювали разом, відкриваючи нескінченні можливості для інновацій та прогресу.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НА ТЕМУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Відомості про Інтернет Речей

«Інтернет речей» (IoT) — це мережа, яка з'єднує різні датчики, пристрої та «речі» в Інтернет та інші мережі. Концепція заснована на вислові «все, що можна з'єднати, буде з'єднане». Це охоплює широкий спектр пристроїв, у тому числі пральних машин, кавоварок, мобільних телефонів, носимих технологій, літаків двигуни, бурова установка для нафтової вишки та багато іншого. Галузей промисловості стає все більше, які готові прийняти IoT технологію, що швидко розвивається, для підвищення продуктивності. Розумні термінали, мобільний Інтернет і хмарні обчислення забезпечують широке підключення.

1.1.1 Архітектура IoT

Архітектура Інтернету речей (IoT) — це складна та багатогранна концепція, яка формує основу систем IoT. Це проект, який описує, як пристрої, програми та технології IoT взаємодіють один з одним, щоб забезпечити бажану функціональність. Архітектура IoT не є універсальною моделлю, а навпаки, вона змінюється залежно від конкретних вимог відповідної системи IoT. Ця стаття заглибиться в тонкощі архітектури IoT, забезпечуючи повне розуміння її визначення, пояснення та випадків використання.

Архітектура IoT (рис.1.1) є критично важливим компонентом екосистеми IoT. Він забезпечує системний підхід до інтеграції різних елементів Інтернету речей, що забезпечує безперебійне спілкування та обмін даними між пристроями. Розуміння архітектури IoT має важливе значення для всіх, хто бере

участь у розробці, впровадженні або управлінні системами IoT. Ця стаття забезпечить детальне дослідження архітектури IoT, проливаючи світло на її складність і роль у ширшому ландшафті IoT.

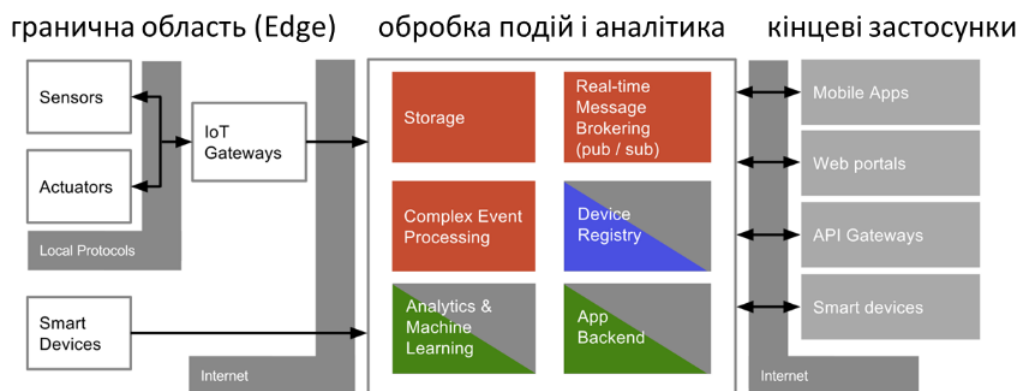


Рис. 1.1. Архітектура Інтернету речей

Архітектура IoT — це більше, ніж просто набір компонентів, розташованих шарами. Це складна система, яка полегшує потік даних із фізичного світу в цифровий, забезпечуючи функціонування системи IoT. Архітектура забезпечує основу для проектування та впровадження систем IoT, керуючи інтеграцією компонентів на кожному рівні та забезпечуючи їх безперебійну взаємодію.

Архітектура системи IoT (рис. 1.2) розроблена з урахуванням конкретних вимог системи. Він враховує такі фактори, як тип використовуваних пристроїв, характер зібраних даних, протоколи зв'язку, що використовуються, вимоги до обробки даних і програми системи. Архітектура є гнучкою та масштабованою, що дозволяє додавати нові пристрої та технології за потреби.

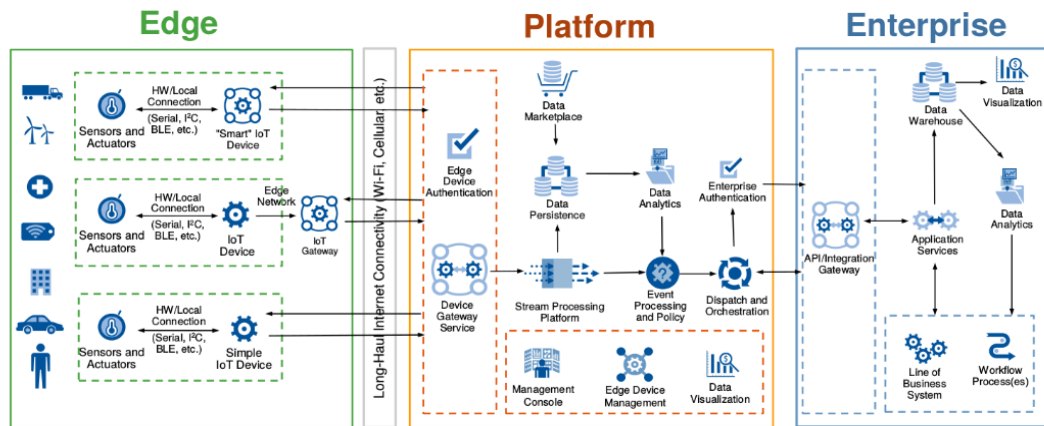


Рис.1.2 Приклад архітектури IoT

1.1.2 Визначення архітектури IoT

Термін «архітектура IoT» відноситься до структурованого розташування компонентів IoT, які взаємодіють один з одним, утворюючи повну систему IoT. Він окреслює рівні, компоненти та зв'язки між ними, надаючи дорожню карту для потоку даних від рівня пристрою до рівня програми. Архітектура розроблена для сприяння ефективному функціонуванню системи IoT, забезпечуючи безперерйну роботу всіх компонентів.

Архітектура IoT — це багаторівнева структура, яка зазвичай складається з чотирьох рівнів: рівня пристроїв, мережевого рівня, рівня керування та рівня додатків. Кожен рівень (рис. 1.3) має певну роль і містить певні компоненти, які сприяють загальній функціональності системи IoT. Архітектура забезпечує основу для проектування та впровадження систем IoT, керуючи вибором та інтеграцією компонентів на кожному рівні.

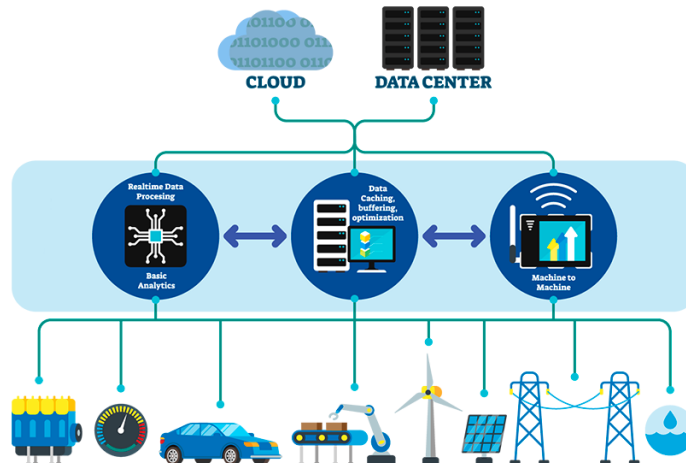


Рис. 1.3 Рівні архітектури IoT

Рівень пристрою

Рівень пристроїв, також відомий як рівень сприйняття або крайовий рівень, є першим рівнем архітектури IoT. Цей рівень складається з фізичних пристроїв IoT, які збирають дані з середовища. Ці пристрої можуть включати датчики, приводи та інші пристрої IoT, які можуть сприймати фізичний світ і взаємодіяти з ним. Рівень пристроїв відповідає за збір даних, і саме тут система IoT взаємодіє з реальним світом.

Пристрої в цьому шарі оснащені різними типами датчиків для збору широкого діапазону даних, таких як температура, вологість, світло, рух тощо. Потім зібрані дані передаються на наступний рівень для подальшої обробки. Рівень пристроїв має вирішальне значення для системи IoT, оскільки він служить основним джерелом даних, що є джерелом життя будь-якої системи IoT.

Мережевий рівень

Мережевий рівень, також відомий як транспортний рівень, є другим рівнем в архітектурі IoT. Цей рівень відповідає за передачу даних від рівня пристроїв до рівня керування. Він включає різні типи мереж, наприклад

локальні мережі (LAN), глобальні мережі (WAN) та Інтернет. Мережевий рівень забезпечує надійну та безпечну передачу даних, що є критично важливим для функціонування системи IoT.

Мережевий рівень використовує різні протоколи зв'язку для передачі даних, такі як Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee та стільникові мережі. Вибір протоколу зв'язку залежить від конкретних вимог системи IoT, таких як дальність зв'язку, енергоспоживання та швидкість передачі даних. Мережевий рівень відіграє вирішальну роль в архітектурі IoT, оскільки він забезпечує підключення, яке є фундаментальним для концепції IoT.

Рівень управління

Рівень керування, також відомий як рівень обробки або рівень проміжного програмного забезпечення, є третім рівнем в архітектурі IoT. Цей рівень відповідає за управління та обробку даних, отриманих від мережевого рівня. Він включає такі компоненти, як сервери, бази даних і хмарні платформи, які зберігають і обробляють дані для подальшого використання.

Рівень керування виконує різні функції, такі як агрегація даних, аналіз даних і керування пристроєм. Він обробляє необроблені дані, отримані від рівня пристрою, перетворюючи їх на корисну інформацію. Цей рівень також керує пристроями в системі IoT, забезпечуючи їх належне функціонування та оновлюючи їх програмне забезпечення за потреби. Рівень керування має вирішальне значення для системи IoT, оскільки він забезпечує потужність обробки, необхідну для функціонування системи.

Рівень програми

Прикладний рівень є останнім рівнем в архітектурі IoT. На цьому рівні оброблені дані використовуються для надання корисних послуг кінцевим користувачам. Додатки можуть варіюватися від простих інструментів візуалізації даних до складних систем прийняття рішень. Рівень додатків — це інтерфейс між системою IoT і користувачами, який надає їм практичну

інформацію на основі даних, зібраних пристроями IoT.

Рівень додатків може включати різні типи додатків, залежно від варіанту використання системи IoT. Наприклад, у системі «розумний дім» програми можуть включати програми домашньої автоматизації, програми керування енергією та програми моніторингу безпеки. Прикладний рівень має вирішальне значення для системи IoT, оскільки він забезпечує користувачам цінність технології IoT.

1.1.3 Характеристики IoT

Існує багато функціональних і нефункціональних потреб IoT для створення інфраструктури. Тут ми обговоримо деякі з найцінніших характеристик IoT.

Доступність

Щоб надати клієнтам можливості будь-де і коли вони їм потрібні, доступність IoT має бути реалізована на апаратному та програмному рівнях. Здатність систем IoT надавати функціональність будь-кому в будь-якому місці називається доступністю програмного забезпечення (Mistry et al. 2020a). Природа комп'ютерів, які завжди сумісні з функціями та протоколами IoT, називається доступністю апаратного забезпечення. Щоб дозволити можливості Інтернету речей, такі протоколи, як IPv6, 6LoWPAN, RPL, CoAP та інші, мають бути реалізовані всередині обмежених пристроїв ресурсу однієї плати. Одним з методів досягнення високої доступності послуг IoT є забезпечення доступності критичного обладнання та засобів (Bahalul Naque 2019).

Мобільність

Незважаючи на те, що більшість утиліт розроблено для надання через смартфони, впровадження IoT ускладнюється доступністю. Ключова передумова IoT полягає в тому, щоб під час переїзду клієнти залишалися

підключеними до своїх бажаних ресурсів. Коли мобільні пристрої переміщуються з одного шлюзу на інший, можуть виникнути перебої в обслуговуванні. Кешування та тунелювання для безперервності обслуговування дозволяють програмам отримувати доступ до даних IoT, навіть якщо Інтернет не працює на короткий час. Величезна кількість інтелектуальних пристроїв, доступних у системах IoT, зазвичай включається в будь-яку надійну структуру для контролю мобільності.

Масштабованість

Масштабованість в Інтернеті речей означає здатність приймати нове клієнтське обладнання, програмне забезпечення та можливості без шкоди для ефективності існуючих систем. Непросто додавати нові процеси та керувати додатковими пристроями, особливо коли існує кілька апаратних платформ і протоколів зв'язку, з якими потрібно боротися. Додатки IoT повинні бути створені з нуля, щоб забезпечити розширювані послуги та операції.

Безпека та конфіденційність

У різноманітних мережах, таких як Інтернет речей, забезпечення безпеки та конфіденційності користувачів суворе. Фундаментальне функціонування Інтернету речей побудовано на передачі даних між мільярдами, якщо не трильйонами, підключених до Інтернету елементів. Однією великою проблемою в безпеці IoT, яка залишилася поза рамками стандартів, є розподіл ключів між пристроями. Зростаюча кількість інтелектуальних об'єктів навколо нас із конфіденційними даними вимагає прозорого та простого керування доступом, наприклад надання можливості одному постачальнику переглядати дані. Навпаки, інший керує пристроєм (Bahalul Naque та ін. 2022).

Продуктивність

Ефективність послуг IoT важко оцінити, оскільки вона базується на продуктивності багатьох компонентів і базовій технології. Інтернет речей, як і інші програми, має постійно розвиватися та розширювати свої пропозиції, щоб

відповідати очікуванням користувачів. Щоб отримати найбільшу цінність за найнижчу вартість для клієнтів, рішення Інтернету речей необхідно відстежувати та перевіряти. Продуктивність IoT можна виміряти за допомогою різних критеріїв, включаючи швидкість обробки, швидкість з'єднання, форм-фактор системи та вартість.

IoT також має керувати більшим обсягом інформації або даних, створених в екосистемі, забезпечуючи взаємодію та якість обслуговування.

1.1.4 Випадки використання архітектури IoT

Архітектура IoT — це не теоретична концепція, а практична структура, яка використовується при проектуванні та впровадженні реальних систем IoT. Архітектура забезпечує дорожню карту для інтеграції компонентів IoT, що дозволяє створювати системи IoT, які забезпечують відчутні переваги. Варіанти використання архітектури IoT такі ж різноманітні, як і сама сфера IoT, охоплюючи різні галузі та програми.

Архітектура IoT відіграє вирішальну роль в успішному впровадженні цих систем: від розумних будинків і розумних міст до промислового Інтернету речей і Інтернету речей у сфері охорони здоров'я. Забезпечуючи структурований підхід до інтеграції компонентів IoT, архітектура забезпечує безперебійне функціонування цих систем, надаючи обіцяні переваги технології IoT.

Розумні будинки

Одним із найпоширеніших варіантів використання архітектури IoT є проектування та впровадження систем розумного будинку (рис.1.4) . У системі розумного будинку архітектура IoT забезпечує основу для інтеграції різноманітних розумних пристроїв, таких як розумні термостати, розумні світильники та розумні замки. Архітектура забезпечує безперебійну взаємодію

цих пристроїв, дозволяючи автоматизувати різні функції будинку.



Рис.1.4. Розумний дім

Наприклад, у системі розумного дому рівень пристроїв включає розумні пристрої, які збирають дані, такі як датчики температури та детектори руху. Мережевий рівень включає мережу Wi-Fi, яка передає дані в хмару. Рівень керування включає хмарну платформу, яка обробляє дані, а рівень додатків включає програму домашньої автоматизації, яка забезпечує інтерфейс користувача. Архітектура IoT забезпечує безперебійне функціонування системи розумного будинку, забезпечуючи зручність і ефективність домашньої автоматизації.

Промисловий IoT

Ще один важливий варіант використання архітектури IoT – промисловий IoT (IIoT) (рис.1.5). У системі IIoT архітектура IoT забезпечує основу для інтеграції різноманітних промислових пристроїв, таких як датчики, виконавчі механізми та системи керування. Архітектура забезпечує безперебійну взаємодію цих пристроїв, дозволяючи автоматизувати та оптимізувати промислові процеси.

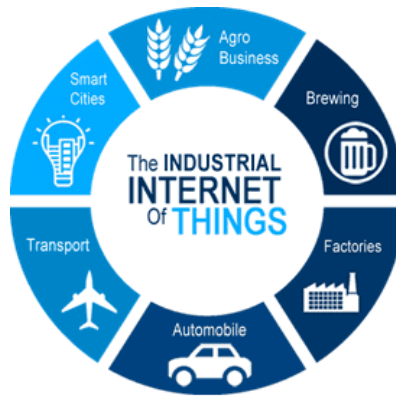


Рис.1.5 Промисловий IoT

Наприклад, у системі IIoT рівень пристроїв включає промислові датчики, які збирають дані, такі як датчики температури та датчики тиску. Мережевий рівень включає промислову мережу Ethernet, яка передає дані в хмару. Рівень керування включає хмарну платформу, яка обробляє дані, а рівень додатків включає програмне забезпечення промислової автоматизації, яке забезпечує інтерфейс користувача. Архітектура IIoT забезпечує безперервне функціонування системи IIoT, забезпечуючи ефективність і продуктивність промислової автоматизації.

1.1.5 Огляд 5G

5G дозволяє наступному поколінню мобільних мереж зробити значний стрибок у бездротовому зв'язку. З кожним днем вимоги багатьох програм зростають. Бездротова технологія, яка швидко змінюється, постійно намагається йти в ногу з цією еволюцією (рис.1.6). Програми, які залежать від великих даних та інших мереж, таких як швидкий переказ грошей, виявлення критичних захворювань, управління запасами тощо, використовують характеристики 5G для підвищення ефективності системи (Ficzere та ін. 2021). 4G і попередні

покоління не можуть підтримувати новітні програми, які вимагають високої здатності обробки даних із високою якістю обслуговування (QoS) і якістю досвіду (QoE). Швидкість передачі також у Гбіт/с, а типова швидкість передачі становить 100+ (Мбіт/с). Тести показують, що 5G може забезпечити швидкість передачі до 20 Гбіт/с, що в 100 разів швидше, ніж 4G. Отже, запровадження 5G у системі мережі може повністю змінити процес зв'язку.



Рис. 1.6 Технологія 5G

1.1.6 Еволюція 5G

У 1950-х роках у Сполучених Штатах були представлені перші рудиментарні портативні засоби зв'язку. Перший портативний (1G) був представлений через три десятиліття. Друге покоління радіозв'язку (2G) було викликано цифровими технологіями, які використовували ефективність SMS із винаходом мікропроцесора. Через кілька років GPRS у поєднанні з мережею 2G забезпечує більш плавний обмін голосовими викликами, MMS, зображеннями тощо. Для вдосконалених систем у двадцять першому столітті була прийнята третя ера (3G) у звуковому обладнанні та оповіщенні, наприклад телебаченні в прямому ефірі та швидкому Інтернеті. Четверте покоління (4G) було розроблено

у відповідь на надто високу динаміку онлайн-з'єднання в гаджетах із підтримкою 4G. Сучасний зв'язок долає бар'єр мобільних телефонів, включаючи холодильні камери, комп'ютери, автомобілі та інші сучасні гаджети для архітектури. Швидкий сайт і функція передачі даних необхідні для розуміння поточного залучення пристроїв і доступу до додаткових пристроїв. Цей факт також надихає на інновації зв'язку п'ятої ери (5G). Простіше кажучи, 5G – це мобільна мережа 5-го покоління. Тут ми обговоримо три типи 5G загалом (Waring 2018).

Low Band 5G

Низькодіапазонний 5G використовує частоти менше 2 ГГц. Це радіо- та телевізійні частоти, які існують найдовше. Вони можуть долати величезні відстані, але особливо великих каналів немає. Low Band 5G вказує на найнижчу можливу швидкість передачі даних. Як наслідок, 5G з обмеженою пропускнуою здатністю працює мляво. Ці канали варіюються від 5 до 15 МГц для різних стільникових мереж, таких як AT&T, T-Mobile і Verizon. Вважається найгіршим варіантом 5G, який дещо швидший за 4G.

Середній діапазон 5G

Середньодіапазонний 5G використовує частоти 2,5 ГГц і 3,5–3,7 ГГц у більшості країн. Це швидше, ніж Low-band 5G, використовуючи частоту менше 6 ГГц. Він може охоплювати більшість частот, які використовуються мобільними телефонами та мережами, підключеними до Wi-Fi, а також кілька частот, трохи вищих за них. Оскільки ці мережі можуть охоплювати радіус кількох миль від вбудованих веж, діаметр яких не перевищує півмилі, вони є функціонуючими мережами з найвищим трафіком 5G у більшості країн.

Високий діапазон 5G

Порівняно зі згаданим вище 5G, міліметровий діапазон хвиль на короткій відстані з підтримкою башти забезпечує високочастотний діапазон 5G. Досі радіохвилі здебільшого були в діапазоні 20–100 ГГц. Ці частоти ніколи раніше не використовувалися для споживчих цілей. Вони використовуються лише на коротких відстанях. Таким чином, проведення тестів на кількох платформах передбачає відстань приблизно 800 футів у густонаселеному міському середовищі від веж. Однак є багато незайнятих сигналів, що дозволяє досягати надзвичайно високих швидкостей, сподіваємось, до 800 МГц за раз.

1.1.7 Характеристики та вимоги екосистеми 5G

5G може збільшити швидкість до 20 разів, ніж 4G. Очікується, що він запропонує швидкість 20 ГБ на секунду, тоді як 4G обіцяють лише 1 ГБ на секунду. Швидкість може відрізнятися залежно від інфраструктури мережі та оператора послуг. За даними Qualcomm, 5G показав швидкість 4,5 ГБ на секунду в своїх тестах і в середньому 1,4 ГБ на секунду. Це принаймні в 20 разів вища швидкість, ніж найшвидша мережа 4G. Увімкнення 5G для досягнення такої швидкості змінить форму HD-трансляції, зробивши кнопку «завантажити» кнопкою «відтворення». Для високої затримки час затримки буде значно скорочено, а перегляд веб-сторінок стане швидше, ніж будь-коли раніше.

Ось деякі з важливих характеристик мережі 5G:

- Дуже низька затримка (близько 1 мс).
- Швидкість до 100 Гбіт/с (у 10–100 разів більше, ніж у 4G і 4,5G).
- Доступність 99,99% по всьому світу.
- Покриття 100% місць.
- Зниження енергії до 90%.

- Збільште термін служби батареї для пристроїв IoT з низьким енергоспоживанням до 10 років.

Щоб мати мережу 5G із такими характеристиками в поєднанні з IoT, в архітектурі повинні бути певні можливості наприклад:

- Ефективне управління ресурсами для IoT і масових операцій.
- Пріоритет якості обслуговування та стандартного контролю.
- Нарізка та експозиція мережі.
- Енергоефективність.
- Застосування в кіберфізичному домені.
- Доступність позиціонування.

Висока надійність є фундаментальною відмінністю порівняно з неліцензійними схемами радіочастотного спектру або традиційними гетерогенними мережами, розробленими за принципом еволюції. Отже, це особливо критично для 5G.

1.1.8 Архітектура 5G

Мережевий рівень, рівень контролера, рівень управління та рівень обслуговування є чотирма рівнями парадигми архітектури 5G. Стек протоколів 5G має два підрівні: керування радіоканалом (RLC) і протокол конвергенції кишенькових даних (PDCP). Замість базових станцій (BS) мережева архітектура 5G використовує адаптивні, віртуальні та гнучкі точки радіодоступу (RAN) і складний розосереджений дизайн. Для встановлення різних точок доступу до даних ці віртуальні RAN включають додаткові інтерфейси, компоненти та композиції (Ngo 2021).

Загальна архітектура для екосистеми 5G (рис.1.7) повинна мати таку функцію:

- **Мережа радіодоступу (RAN):** 5G використовує RAN для підключення багатьох технологій, що забезпечують частоту FDD.
- **Мережа передачі даних:** надає послуги оператора сторонніх служб для доступу до Інтернету.
- **Керування доступом і мобільністю:** Ця функція забезпечує захист цілісності, авторизує доступ, керує мобільністю, зв'язками між пристроями, можливістю підключення тощо.
- **Вибір сегмента мережі:** ця функція визначає екземпляри для обладнання користувача та інформацію для функції допомоги.
- **Функція автентифікації сервера:** виконує роботу з автентифікації для надійного та ненадійного доступу 3GPP.
- **Політика контролю:** ця функція ініціює рамки політики для контролю поведінки мережі.
- **Виявлення мережі:** відкриває мережеву програму та керує зовнішньою та внутрішньою інформацією про захист зв'язку.
-



Рис.1.7 Архітектура 5G

Існує багато інших функцій архітектури 5G, що відрізняються від програми до програми. Однак базовий сценарій кожної функції спрямований на досягнення більшої швидкості, низької затримки, належного керування та безпеки.

Мережі 5G пропонують кілька ключових характеристик і технічних специфікацій, які роблять їх ідеальними для широкого спектру застосувань. 5G забезпечує значно збільшену пропускну здатність, забезпечуючи більш високу швидкість передачі даних для високошвидкісних програм, таких як віртуальна та доповнена реальність. Він також пропонує меншу затримку, що робить його придатним для додатків зв'язку та реагування в режимі реального часу, таких як автономні транспортні засоби та дистанційна хірургія. 5G є високонадійним із такими функціями, як нарізка мережі та резервні мережеві шляхи, що забезпечує підключення пристроїв. 5G забезпечує масовий зв'язок машинного типу (mMTC) і наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC), що робить його придатним для критично важливих додатків, таких як промислова автоматизація. Крім того, 5G пропонує нарізку мережі, формування променя та використовує частоти міліметрових хвиль (mmWave) для ще вищої пропускну здатності та швидкості передачі даних. Загалом мережі 5G пропонують суттєві покращення в пропускну здатності, затримці, надійності та гнучкості, що робить їх добре підходящими для широкого спектру програм.

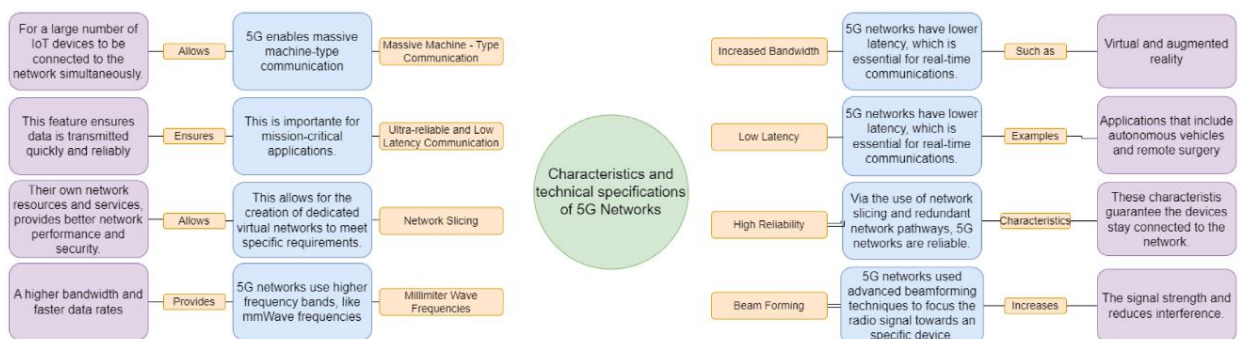


Рис.1.8. Характеристики та технічні характеристики мереж 5G.

1. Massive MIMO: ця технологія відповідає за надсилання та отримання кількох сигналів одночасно, використовуючи той самий радіоканал. У той час як інші технології, такі як Wi-Fi або 4G-LTE, використовують цю технологію, масивний MIMO працює найкраще в поєднанні з технологіями 5G. Ця технологія використовує додаткові антени для переміщення енергії в менші області простору, що означає покращення спектральної ефективності та покриття [[58](#)].

2. NOMA: Неортогональний множинний доступ: технологія радіодоступу, яка відіграє життєво важливу роль у додатках 5G [[59](#)]. Ця технологія пропонує кілька переваг, наприклад низьку затримку та масове високошвидкісне підключення. Кодовий домен NOMA зазвичай поєднується з mMIMO, що значно покращує спектральну ефективність [[60](#)]. Домен потужності NOMA зазвичай використовується з MIMO, формуванням променя та навіть кооперативним зв'язком, будучи однією з найбільш гнучких технологій, які використовуються у впровадженнях 5G.

3. Міліметрові хвилі: Ця технологія використовує діапазон частот від 30 ГГц до 300 ГГц і отримала свою назву від хвиль від 1 до 10 мм, які використовуються цією технологією. Ця технологія, яка зазвичай використовується в радіолокаційних додатках, поєднується з 5G для покращення пропускної здатності та збільшення використання спектру. Основна перевага сполучення цієї технології з 5G – свобода спектру, пов'язана з mmWave. Стандартні технології, такі як GPS, 4G і супутникове підключення, використовують діапазон від 1 ГГц до 6 ГГц, який стає дуже переповненим [[61](#)]. Оскільки mmWave є новим і має великий спектральний діапазон, 5G забезпечує покращений досвід користувача завдяки цій комбінації.

4. Методи машинного навчання: контрольовані та неконтрольовані моделі впроваджуються в технології 5G для покращення загальної пропускної

здатності мережі, прогнозування споживання енергії та оптимізації технологій відстеження, таких як формування променя. У контрольованій категорії деякі мережі 5G використовують алгоритми лінійної регресії для прогнозування планування вузлів [62]. Інші керовані моделі використовують глибокі нейронні мережі для прогнозування векторів формування променя. Потім моделі неконтрольованого навчання використовуються для покращення вибору хэндовера та зменшення переривання послуг, а також вони можуть зменшити затримку шляхом кластеризації туманних вузлів.

5. Безпілотні літальні апарати (БПЛА): будучи найбільш інноваційною пропозицією, поточні дослідники 5G використовують БПЛА для покращення покриття мережі. Ці БПЛА допомагатимуть наземній мережі, слугуючи маяками. Велика висота цих літаків може вирішити багато проблем із перешкодами і навіть повністю замінити наземні стільникові мережі [63]. БПЛА, широко відомі як дрони, стають все більш популярними як для комерційного, так і для особистого використання. З появою мереж 5G та Інтернету речей БПЛА тепер можуть бути оснащені широким спектром датчиків і пристроїв, які можуть передавати дані в реальному часі на наземні станції для аналізу та прийняття рішень [64]. Є кілька потенційних реалізацій БПЛА в контексті 5G та IoT. Одна з таких реалізацій – у сфері точного землеробства. БПЛА можна використовувати для збору даних про ріст культур, стан ґрунту та інші фактори, які впливають на сільськогосподарське виробництво. Ці дані можуть бути передані в режимі реального часу на наземну станцію для аналізу та використані для оптимізації графіків посіву, удобрення та зрошення [65]. Мережі 5G і датчики IoT можуть забезпечити необхідну пропускну здатність і низьку затримку для цього типу додатків. Іншим потенційним застосуванням БПЛА в контексті 5G та IoT є промислове обстеження та обслуговування. БПЛА, оснащені камерами та іншими датчиками, можна використовувати для перевірки та моніторингу обладнання

та інфраструктури, наприклад ліній електропередач і вітрових турбін. Передача даних у реальному часі через мережі 5G може забезпечити дистанційний моніторинг і контроль цих систем, підвищуючи їх надійність і знижуючи витрати на обслуговування [66]. БПЛА також можна використовувати для реагування на надзвичайні ситуації та боротьби зі стихійними лихами. У разі стихійного лиха, такого як ураган або землетрус, можна розгорнути БПЛА для оцінки збитків і надання інформації в режимі реального часу особам, які першими реагують. Зібрані дані можуть бути передані через мережі 5G до центрів управління надзвичайними ситуаціями для аналізу та прийняття рішень. БПЛА можна використовувати для спостереження та безпеки. У програмах громадської безпеки БПЛА можна використовувати для моніторингу пересування натовпу та збору розвідувальних даних про потенційні загрози. У програмах приватної безпеки БПЛА можуть використовуватися для патрулювання та моніторингу об'єктів на наявність зловмисників або інших загроз безпеці. Поєднання БПЛА з мережами 5G і датчиками IoT може забезпечити широкий спектр застосувань у різних галузях. Маючи потенціал для підвищення ефективності, зниження витрат і підвищення безпеки, цілком імовірно, що ми побачимо збільшення кількості використання БПЛА в найближчі роки.

Висновки:

Технологія 5G представляє собою суттєвий стрибок у розвитку мобільних мереж, що забезпечує значні покращення у порівнянні з попередніми поколіннями, такими як 4G. Основними перевагами 5G є висока швидкість передачі даних, низька затримка та здатність підтримувати велику кількість одночасних підключень. Завдяки цьому 5G відкриває нові можливості для різних галузей, таких як телемедицина, автономні транспортні засоби, промислова автоматизація та розумні міста.

Переваги 5G включають:

1. Висока пропускна здатність: 5G забезпечує передачу даних зі швидкістю до 20 Гбіт/с, що в рази перевищує можливості 4G. Це робить можливим використання таких ресурсомістких технологій, як віртуальна реальність (VR) та 4K-стрімінг.

2. Низька затримка: Затримка в мережах 5G може бути менше 1 мілісекунди, що дозволяє використовувати цю технологію в критично важливих системах, таких як системи управління автономним транспортом або дистанційні операції в медицині.

3. Масове підключення: 5G може підтримувати велику кількість пристроїв на одиницю площі (до 1 мільйона пристроїв на квадратний кілометр), що є ключовим фактором для впровадження Інтернету речей у великому масштабі.

4. Енергоефективність: 5G розроблено таким чином, щоб забезпечувати низьке енергоспоживання для підключених пристроїв, що є критичним для IoT-систем.

Висновком є те, що 5G значно розширює можливості бездротових мереж, забезпечуючи підґрунтя для подальшого розвитку технологій, які вимагають високої швидкості, надійності та масштабованості.

Інтернет речей (IoT) є ключовою технологією, яка трансформує сучасний світ, дозволяючи підключати величезну кількість пристроїв до мережі з можливістю взаємодії та обміну даними. Це відкриває нові можливості для автоматизації, оптимізації ресурсів та підвищення ефективності у таких сферах, як промисловість, транспорт, сільське господарство та розумне місто.

Основні висновки щодо IoT:

1. Масштабованість: Інтернет речей дозволяє підключати тисячі і навіть мільйони пристроїв, що дозволяє автоматизувати широкий спектр завдань, від управління домашніми приладами до промислових систем.

2. Економічний ефект: Завдяки IoT можлива оптимізація багатьох процесів, таких як управління запасами, енергоспоживанням та логістикою, що призводить до зниження витрат і підвищення продуктивності.

3. Підвищення ефективності: IoT дозволяє збирати та аналізувати дані в режимі реального часу, що сприяє прийняттю швидких та ефективних рішень у різних галузях.

4. Зменшення затримок у прийнятті рішень: Завдяки постійному зв'язку між пристроями та можливості аналізу великих обсягів даних у режимі реального часу, IoT значно прискорює процеси реагування та управління.

5. Складність та безпека: Однією з ключових проблем IoT є безпека та управління великими обсягами даних. Зростання кількості підключених пристроїв підвищує ризики кіберзагроз, тому важливо впроваджувати ефективні системи безпеки.

Таким чином, IoT забезпечує широкі можливості для автоматизації та підвищення ефективності роботи різних систем. Однак успішне впровадження IoT вимагає уваги до безпеки, ефективності використання енергії та здатності обробляти великі обсяги даних.

РОЗДІЛ 2

5G ДЛЯ ІОТ

Повсюдне поширення пристроїв ІоТ підштовхнуло попит на SigFox, LoRa та інші подібні мережеві протоколи, які пропонують малопотужні та глобальні мережеві можливості. З іншого боку, традиційні стільникові мережі, як-от 4G і LTE, споживали більше електроенергії та погано підходили до додатків, у яких невелика кількість даних передавалася нерегулярно.

Поступово виникла потреба у високій надійності та низькій затримці, що створило можливість для стільникових мереж 5G увійти в домен ІоТ. Наднадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC – підмножина мережевої архітектури 5G) – це вид зв'язку, який є найкращим рішенням для таких програм.

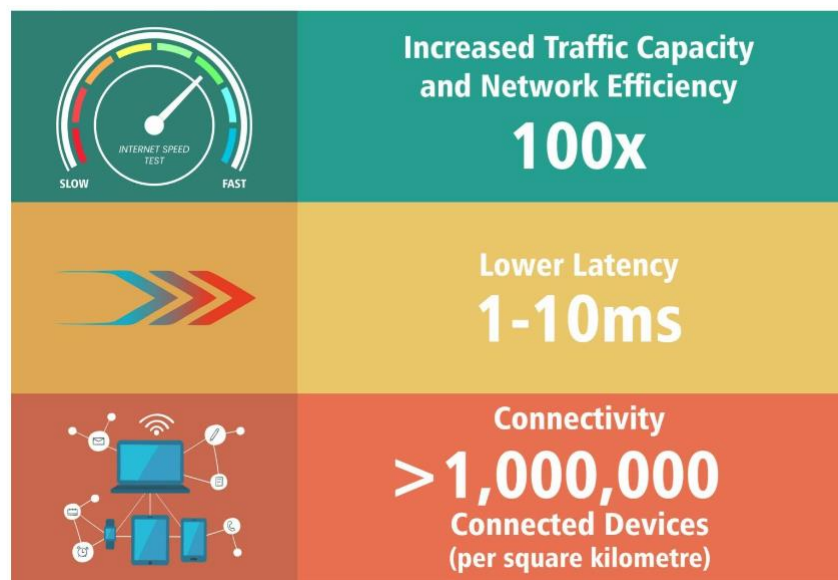


Рис.2.1. Значення 5G для ІоТ

Тому 5G ІоТ вважається кращим завдяки кільком перевагам, таким як краща підтримка мережі, низька затримка тощо, порівняно з іншими

стільниковими мережами. Щоб поставити це в перспективу; мережа IoT може підтримувати близько 2000-4000 пристроїв на квадратний кілометр, тоді як мережа 5G має потужність для підтримки близько одного мільйона пристроїв на кілометр, що робить її кращим варіантом для додатків IoT.

За даними Ookla, глобального спеціаліста з інтелектуального підключення, 5G має на 637% кращу середню швидкість завантаження та на 130% вищу середню швидкість завантаження, ніж 4G. Теоретично 5G може досягати швидкості до 20 гігабіт на секунду (Гбіт/с), тоді як 4G може досягати лише 1 Гбіт/с.

Ось як різні стільникові мережі забезпечують підключення до програм IoT:

Таблиця 2.1.

Продуктивність різних стільникових мереж у додатках IoT

Генерація мережі	Середня швидкість передачі даних (завантажити)	Затримка	Побудова мережі	Споживана потужність	Підходить для IoT
2G	Повільний (15-200 кілобіт на секунду 2G (кбіт/с))	Високий 300–1000 мілісекунд (мс)	Централізована	Низький	Обмежено (голосові дзвінки, обмежені мобільні дані)
3G	Помірний (384 кбіт/с – 8 мегабіт на секунду (Мбіт/с))	Помірний 100-500 мс	Централізована	Середній	Основні програми (електронна пошта, базовий Інтернет + відеодзвінки)
4G	Швидкий (15-100 Мбіт/с)	Низька 10-100 мс	Децентралізована	Високий	Найсучасніші програми IoT+ VoLTE + потокове відео
5G	Надшвидкий (150-200 Мбіт/с)	Наднизький 1-10 мс	Віртуальний, хмарний, децентралізований	Дуже висока	Просунуті додатки IoT (в реальному часі, AR/VR тощо)

З'єднання 2G і 3G поступово виводяться з експлуатації. У деяких частинах світу, включаючи Австралію та США, припинення роботи цих двох мереж уже розпочато. Отже, 2G і 3G незабаром будуть вилючені з додатків як IoT, так і не-IoT, з появою 4G і 5G.

За оцінками Міжнародної корпорації даних (IDC), до 2025 року понад 152 000 пристроїв IoT щодня будуть підключатися до Інтернету, головною причиною цього є зростання мереж 5G.

2.1 Чому 5G для IoT?

Поєднання зв'язку 5G з Інтернетом речей не тільки збільшує швидкість, але й зменшує затримку, пропонує нарізку мережі та багато інших переваг порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж.

Нижче наведено кілька основних можливостей, які надає 5G при з'єднанні з IoT:

- **Менша затримка та висока надійність:** підключення 5G зменшує час, потрібний для передачі повідомлення в мережі, і підвищує надійність доставки. 5G може працювати в 10 разів швидше, ніж у його попередника – 4G. Це збільшення швидкості дозволить пристроям IoT швидше спілкуватися та обмінюватися даними.

- **Збільшена пропускна здатність:** 5G призначений для підтримки 100-кратного збільшення пропускної здатності та ефективності мережі. Усі підключені пристрої матимуть доступ до Інтернету, який у режимі реального часу обмінюватиметься інформацією, сприяючи IoT. Це дуже важливо для чутливих до часу програм.

- **Нарізка мережі:** 5G також дозволяє впроваджувати віртуальні мережі (нарізка мережі), щоб забезпечити підключення, більш адаптоване до

конкретних потреб. Нарізка мережі 5G може створювати незалежні мережі на одній фізичній інфраструктурі, а також дозволяє налаштовувати кожен «зріз» відповідно до різних програм IoT.

Таким чином, проникнення 5G в IoT запровадить потужну комбінацію надзвичайної швидкості, пропускну здатності, енергоефективності та інших удосконалень, які з'єднають мільярди мереж у різних сферах у найближчі роки.

2.2 Майбутнє підключених пристроїв IoT з 5G

У 2023 році було близько 16,7 мільярда пристроїв, підключених до IoT, а Міжнародна корпорація даних (IDC) оцінює, що до 2025 року буде 55,7 мільярда підключених пристроїв (або «речей») IoT.

З наведених вище цифр видно значне зростання кількості пристроїв Інтернету речей – і жодних ознак зменшення. У той час як інші технології задовольняють конкретні потреби, 5G IoT стає найкращим варіантом для світу IoT, що розширюється, пропонуючи неперевершене покриття, низьку затримку, максимальну швидкість і мобільність для програм, які вимагають даних у реальному часі та ширшого підключення.

Прогнозується, що загальна кількість одиниць Інтернету речей 5G, проданих бізнес-бізнесу, зросте з понад 27 мільйонів одиниць у 2025 році до 44,8 мільйонів у 2030 році. За оцінками, світовий ринок 5G IoT також перевищить 116 мільярдів доларів США у 2028 році з дол. 3,25 мільярда у 2021 році, повідомляє Stratview Research .

Оскільки 5G набуває все більшого поширення та інтегрується в існуючу інфраструктуру, ми можемо очікувати, що в найближчі роки з'явиться ще більше інноваційних і трансформаційних програм. Технологічний прогрес невблаганний, час від часу з'являються нові відкриття та ідеї.

Дивлячись на наведені вище цифри та ознаки зростання підключень 5G IoT, можна сказати, що так само, як IoT зарекомендував себе за останні кілька десятиліть, 5G має потенціал зміцнити свої позиції на кілька градусів вперед.

2.3 Вимоги до інтегрованої архітектури 5G IoT

IoT із підтримкою 5G потребує особливої уваги через його неоднорідність, вдосконалення та застосування.

Однак є деякі вимоги, яким має відповідати вся архітектура:

- 5G IoT має забезпечувати низьку затримку в 1 мс, враховуючи чутливу систему Інтернету та медичну точку зору.
- Архітектура повинна забезпечувати низьке енергоспоживання для пристроїв IoT з низьким часом роботи від батареї, але достатньо для передачі даних через 5G.
- Розширені програми, такі як Virtual Reality або Augmented Reality, потребують високої швидкості 25 Мбіт/с, тому архітектура має відповідати майбутнім потребам.
- Безпека має бути найвищого рівня, враховуючи масову передачу даних на дуже високій швидкості.
- Пристрої з фактором мобільності матимуть пріоритет для інфраструктури 5G IoT.

Фундаментальна архітектура 5G IoT загалом складається з п'яти етапів: датчики, шлюз IoT, станція на базі 5G, хмарне сховище та додаток. Ці кроки можуть бути включені в рівні IoT для створення загальної архітектури 5G IoT.

Загальна архітектура 5G IoT:

Граничний рівень 5G IoT

Датчики та шлюз IoT можуть складатися з 5G на цьому рівні. Наприклад, датчики ЕКГ, датчики температури, інтелектуальне виробництво тощо

використовуватимуть цей рівень для передачі та обробки інформації за допомогою технології 5G.

Мережевий рівень 5G IoT

Мережевий рівень буде містити базову станцію 5G і хмарне сховище для обробки даних за допомогою пристроїв IoT.

Прикладний рівень 5G IoT

Прикладний рівень забезпечить всю підтримку для кінцевої системи, як-от «розумний дім», розумний ланцюжок поставок тощо.

Відповідно до вищезазначеної загальної архітектури 5G IoT може підтримувати міліметрові хвилі, зв'язок D2D, наночіп, бездротове програмне забезпечення, мобільні периферійні обчислення, хмарні обчислення аналітики даних та інші, а також багато інших технологій і застосувань.

На рис.2.2. показано узагальнену архітектуру інтегрованої екосистеми 5G IoT.

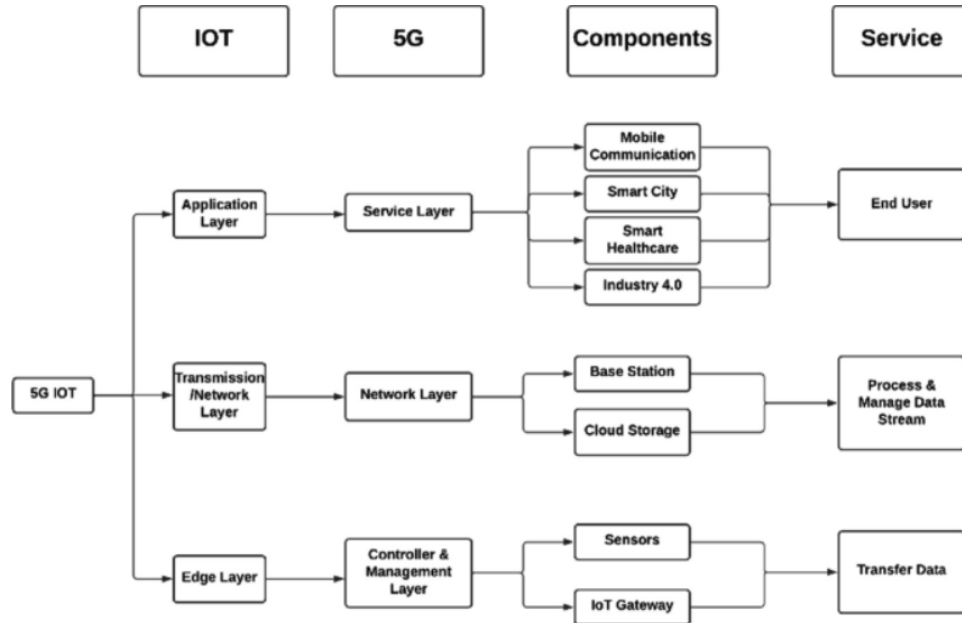


Рис.2.2. Узагальнена архітектура 5G IoT

2.4 5G IoT на основі блокчейну

Блокчейн може принести довіру та покращити безпеку 5G IoT. Він може пришвидшити обмін даними за менших витрат, впровадивши криптографічну систему шифрування в архітектуру. Незмінність і підзвітність, які блокчейн може забезпечити для системи, чудові. Інтегрований у блокчейн 5G IoT (рис.2.3) може принести революцію в промисловий IoT, безпілотний автономний транспортний засіб (БПЛА) тощо. Блокчейн і 5G IoT також можна інтегрувати з глибоким навчанням.

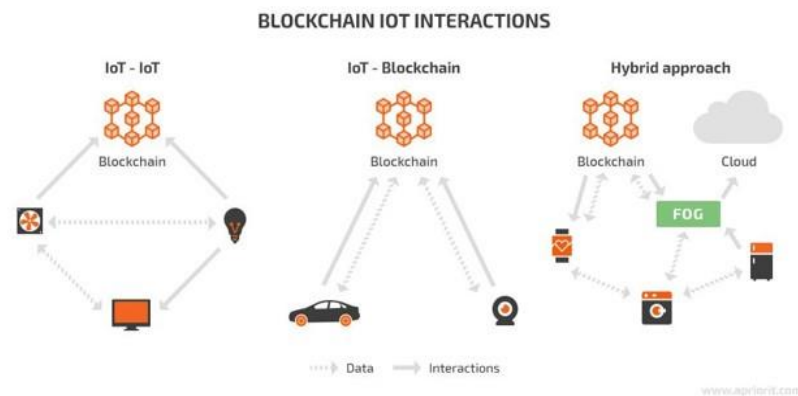


Рис. 2.3. IoT Блокчейн

Архітектура складається з рівня пристрою, мережі блокчейн, мобільної мережі 5G і хмарної мережі. Він забезпечує передачу даних за допомогою смарт-контракту зі швидкістю 5G. Знову ж таки, 5G IoT можна інтегрувати з технологією мм-хвиль 5G для створення центру обробки, об'єктного процесора, областей зондування та рівня додатків. Ці рівні працюють разом, використовуючи хмарне сховище та мережу 5G, щоб надавати такі послуги, як освіта, пожежна станція, транспорт, фабрики тощо.

2.5 5G IoT зі штучним інтелектом

Змагальний штучний інтелект може забезпечити велику підтримку безпеки 5G IoT. Він може використовувати такі технології, як massive MIMO (рис.2.4), cloud RAN (рис.2.5), multi-RAT (рис.2.6), для запобігання загрозам безпеці, таким як метод швидкого градієнтного знака, однопіксельна атака, DeepFool тощо.



Рис.2.4 Масивний MIMO

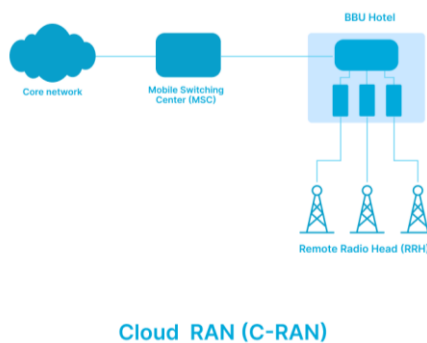


Рис. 2.5 cloud RAN

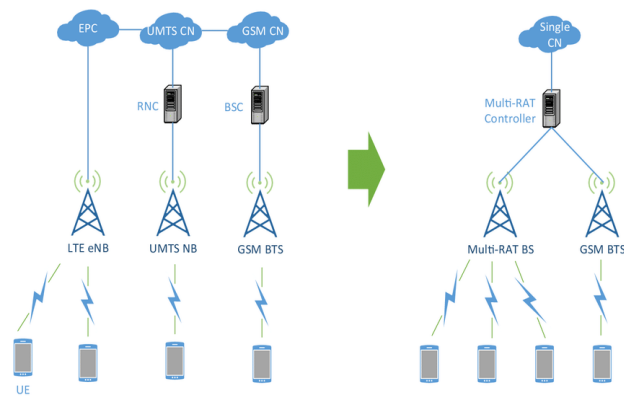


Рис.2.6 multi-RAT

Архітектура підтримує методологію машинного навчання, як-от логістична регресія, наївний метод Байєса, Q-навчання, К- засоби, модель рішення Маркова тощо.

2.6 Можливості 5G Integrated IoT

5G — це бурхлива технологія, яка відкрила багато вікон можливостей. Можливості високої швидкості та широкої смуги пропускання підтримуватимуть понад 60 000 підключень. Крім того, 5G об'єднує всі мережі на одній платформі. Це також дає передплатникам можливість контролювати свої облікові записи та вживати швидких заходів. 5G має зворотну сумісність із попередніми поколіннями мереж. Крім того, 5G розроблено для забезпечення глобального безперебійного та постійного з'єднання. Включення 5G з IoT прискорить розвиток багатьох інших секторів, включаючи технології, бізнес, промисловість тощо.

2.7 Технологічний прогрес

ІоТ включає багато аспектів технології, які 5G може використовувати якнайкраще. 5G може змусити ці технології подолати свої недоліки, забезпечуючи чудові досягнення. Тут ми обговоримо деякі технології, які 5G змінить назавжди.

2.7.1 Віртуалізація мережевих функцій (NFV)

NFV використовується для підвищення стійкості мережевих служб і скорочення часу, необхідного для впровадження нових систем і технологій. Він розділяє вимоги до апаратного та програмного забезпечення для складних операцій. NFV (рис.2.7) виконує роль засобу віртуалізації та сприяє поширенню 5G-ІоТ. Віртуалізовані балансувальники навантаження, системи виявлення вторгнень і брандмауери — це всі екземпляри NFV. Інтеграція 5G з ІоТ дозволить NFV точніше виявляти загрози та надаватимережевим службам гнучкість і розвинену масштабованість.

Network Function Virtualization (NFV)

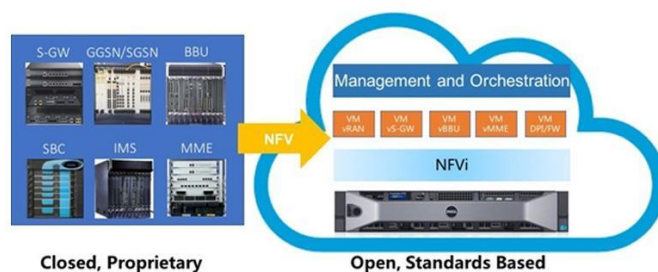
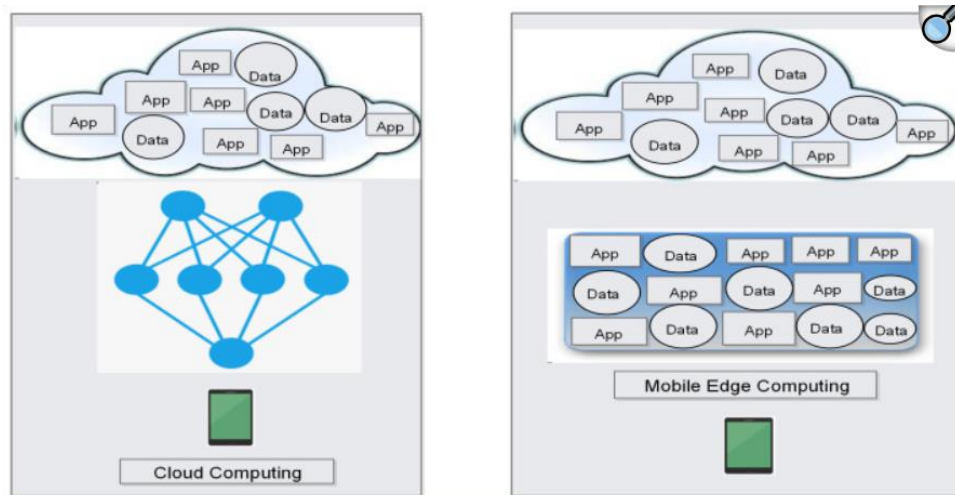


Рис.2.7 Віртуалізація мережевих функцій

2.7.2 Мобільні хмарні обчислення (MCC)

Хмарні обчислення — це послуга, яка дозволяє передати ресурси обробки на аутсорсинг. Кінцеві користувачі можуть отримати авторизований доступ до баз даних, наборів даних та інформації через Інтернет, включаючи можливість аналізу та передачі за допомогою потужності мереж 5G. Хмарні обчислення — це нова фундаментальна технологія в ІТ-архітектурі, яка дозволяє користувачам обчислювати або зберігати дані без створення розгалуженої інфраструктури. МСС поєднав хмарні обчислення з мобільними обчисленнями, щоб надати споживачам гнучкість і послуги на вимогу. Зараз багато сервісів дозволяють користувачам підключати свої мобільні пристрої до хмари. Передача даних за допомогою периферійних обчислень із 5G зменшує час передачі. Крім того, використання цих технологій гарантує, що контекстна інформація має меншу затримку та є більш доступною.



Графічні зображення хмарних обчислень проти мобільних периферійних обчислень.

2.7.3 Зв'язок між пристроями (D2D)

Мережа 5G забезпечує плавний зв'язок D2D (рис.2.8), реалізуючи прямий зв'язок без будь-яких посередників. Існує чотири типи цього D2D-зв'язку, включаючи передачу між пристроями за допомогою керованого оператором

зв'язку, передачу між пристроями за допомогою керованого пристроєм зв'язку, прямий D2D-зв'язок за допомогою керованого оператором зв'язку та прямий D2D-зв'язок за допомогою керованого пристроєм зв'язку.

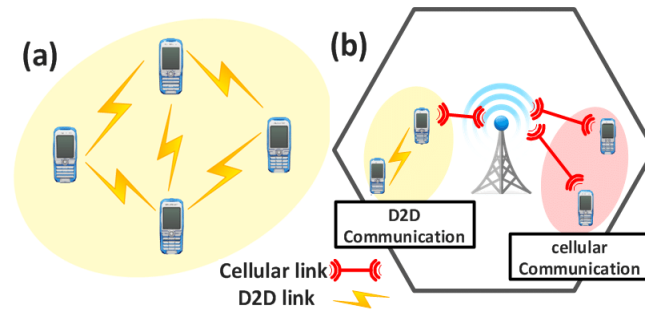


Рис.2.8 Зв'язок між пристроями

2.7.4 Програмно-визначена мережа (SDN)

SDN (рис.2.9) відкриває нове мережеве адміністрування та дизайн. Це виглядає як найбільш багатообіцяюча відповідь на майбутнє Інтернету. Він має дві відмінні риси: розділення площини даних і розширене програмування розробки додатків. Це забезпечує ефективнішу конфігурацію, ефективність і гнучкість під час створення мережевих архітектур. Прототип SDN використовувався для створення мереж 5G, щоб зберегти гнучку та швидшу топологію 5G-ІоТ.

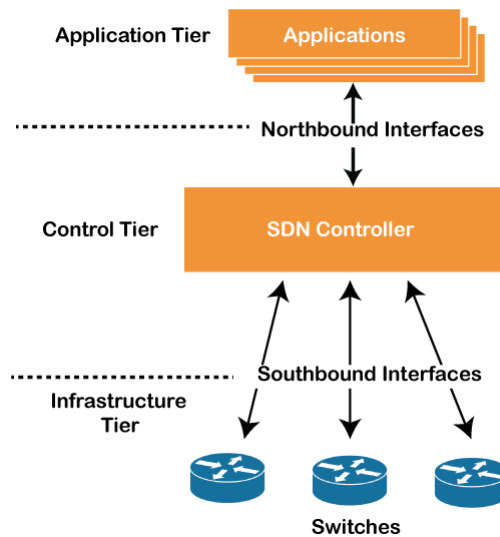


Рис.2.9 Програмно-визначена мережа (SDN)

2.7.5. Зв'язок міліметрових хвиль

Мобільні мережі постійно потребують посиленого утримання для підвищення частоти. Хвиля 5G мм може прокласти шлях для нової розробленої частоти радіохвиль. Це дозволить IoT працювати ефективніше, забезпечуючи високу швидкість (до 20 Гбіт/с) і високу доступність, що супроводжується мобільною мережею, ніж мережа 4G. Крім того, розширений широкосмуговий зв'язок у мобільних мережах завдяки цій еволюції 5G запусить такі додатки, як VR та доповнене відео, прямі трансляції, UHD-відео тощо.



Рис.2.10 Спектр частот для пристроїв

2.7.6. Мобільні периферійні обчислення (MEC)

Значна частина хмарних сервісів стала можливою завдяки розробці кількох передових комп'ютерних програм, таких як штучний інтелект і розумне середовище. Хмарні обчислення мають різні потреби, включаючи низьку затримку, інформацію про місцезнаходження та підтримку мобільності. MEC може наблизити згадані операції та ресурси до краю мережі. Завдяки MEC у 5G IoT, такі додатки, як VR та AR, зростатимуть.

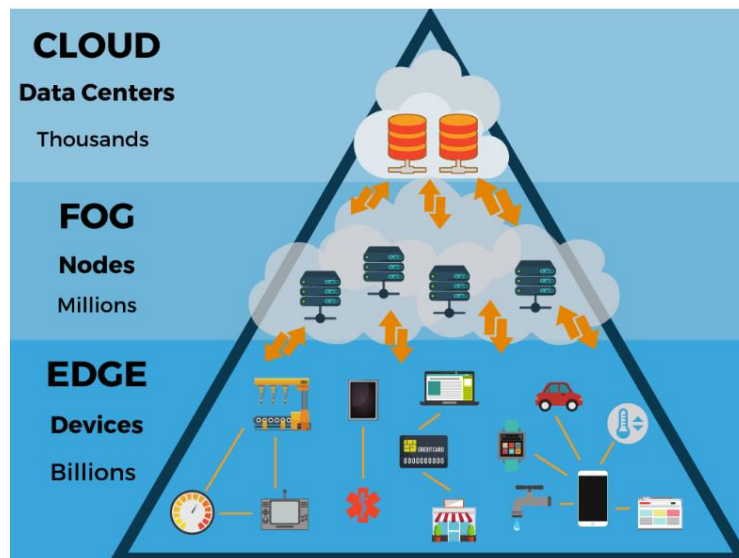


Рис.2.11. Піраміда обчислень

На додаток до цих технологій, багато інших постійно додаються до нашого повсякденного життя в усьому світі. Для пом'якшення цього глобального трафіку необхідно розвивати можливості мережі та покриття. 5G має можливість розвиватися завдяки цим новим інноваціям, а також покращувати свої можливості.

Розумні міста

Від управління ланцюгом постачання всіх необхідних товарів і потреб повсякденного життя до системи домашньої автоматизації та покращеного зв'язку – 5G матиме ширше застосування в програмах розумного міста. «Розумні» міста отримують вигоду від мережі 5G з розвиненими датчиками, які покращують міську інфраструктуру. 5G зможе керувати величезними обсягами даних і поєднувати різні інтелектуальні технології, які постійно з'єднуються одна з одною, щоб ще більше зблизити одне з одним по-справжньому об'єднане місто.

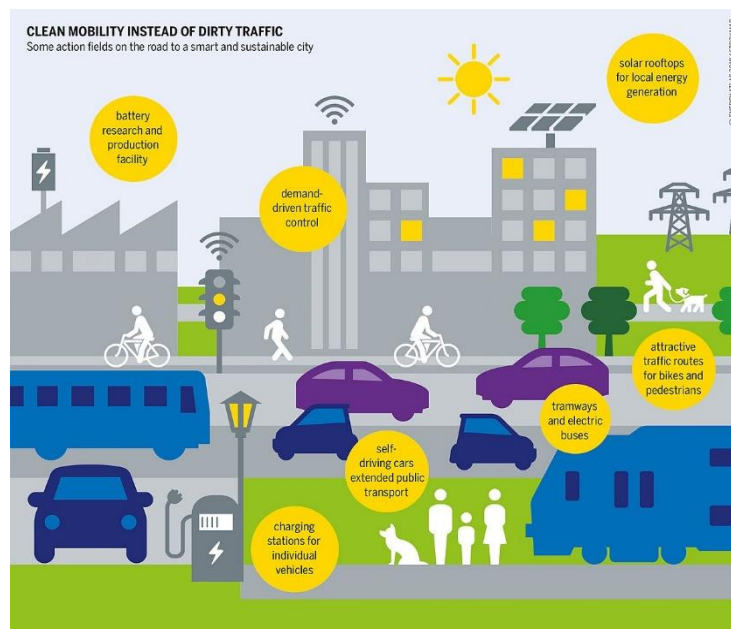


Рис.2.12 Розумне місто

Розумна охорона здоров'я

Оскільки 5G матиме вплив на IoT, це також матиме вплив на сфери, яких торкається IoT. Internet of Medical Things, або IoMT, є найважливішим із них.

Сільські та інші подібні ізольовані місця, де немає належних медичних послуг, можуть отримати величезну користь від підключення до Інтернету речей. Після тривалого прагнення до того, щоб медичні послуги світового рівня були доступними дистанційно, як дистанційні операції, стає можливою.



Рис.2.13 Розумна охорона здоров'я

Розумна логістика

Розширені пристрої відстеження IoT, які можуть виконувати логістичні дії, зможуть використовувати підключення 5G. Передача даних у режимі реального часу буде швидше, ніж будь-коли раніше, завдяки високій швидкості та низькій затримці 5G. Крім того, він буде енергоефективним у разі довгого ланцюга поставок, який вимагає часу. Наприклад, споживач може дізнатися, де вирощені фрукти, при якій температурі вони зберігаються під час транспортування та коли їх доставляють до роздрібного продавця.

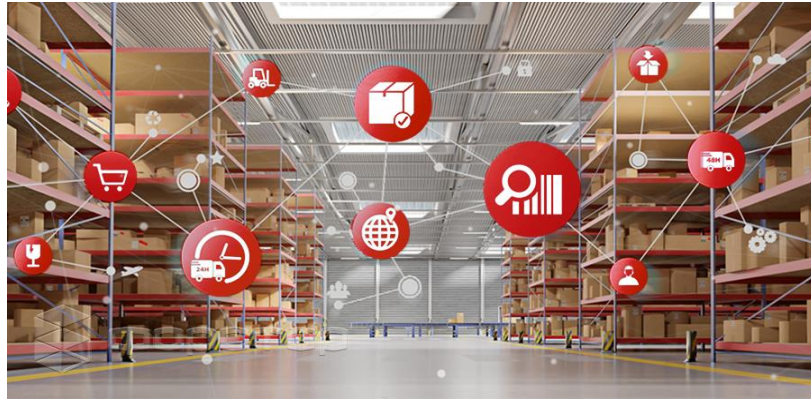


Рис.2.14 Розумна логістика

Бізнес

Передбачається, що IoT із підтримкою 5G забезпечить більше, ніж просто технічний прогрес; також оцінюється, що він підтримує 22 мільйони робочих місць у всьому світі. Модернізація транспорту, промисловості, сільського господарства та інших фізичних галузей, ймовірно, спричинить це зростання. Позитивно вплинуть на такі сфери, як будівництво нафтових копалин, вантажних флотів і залізниць, які потребують швидшої передачі через природу продукту. 5G має можливість розвивати інтелектуальне виробництво та інтелектуальне обладнання. У найближчому майбутньому 5G дозволить IoT майже миттєво керувати мережевим трафіком, розв'язувати його, підвищувати безпеку та громадську безпеку, а також працювати віддалено.

Повітряні та супутникові дослідження

Розвиток мережі 5G також відкриває широкі можливості повітряного та супутникового зв'язку та досліджень. Система High Altitude Performance (HAP) досліджується разом із супутником. Модифікація мережі 5G за допомогою вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT) робить її бездоганною інтеграцією. Це може дозволити помірно структурованим супутникам спілкуватися з

низьким бітрейтом. Також можливо розширити мобільну мережу 5G за допомогою комбінованих супутниково-наземних мереж.

Пом'якшення пандемічної ситуації

5G може оновити технології для пом'якшення проблем у ситуації пандемії. Інтеграція 5G та IoT покращує послуги телемедицини, щоб дистанційно перевіряти пацієнтів за допомогою Massive Machine Type Communication (mMTC). Крім того, IoT-пристрої на базі Bluetooth Low Energy (BLE) з підтримкою 5G можуть керувати виявленням та моніторингом пацієнтів з COVID-19. Величезне підключення даних не потребує жодного шлюзу та забезпечує тривалу підтримку батареї для малопотужних пристроїв IoT.

Штучний інтелект (AI)

Щоб побудувати галузь на основі ШІ, потрібно багато даних для навчання та тестування моделі алгоритму ШІ. IoT із підтримкою 5G може забезпечити розвинену інфраструктуру для збору цього величезного обсягу даних. Використовуючи ці дані, ШІ може генерувати цінну інформацію для галузі, а також надавати чіткий контекст мережі для її подальшого розвитку.

2.7. Проблеми інтегрованого Інтернету речей 5G

5G, інтегрований з IoT, надав нам надзвичайні функції повсюдно. Сучасні дослідження показали, що завдяки широкому підключенню, що забезпечує надійну якість обслуговування (QoS), можна отримати більше програм і вдосконалити. З цими досягненнями з'являється набагато більше проблем, про які потрібно подбати. Тут ми обговоримо деякі важливі проблеми 5G інтегрованого IoT.

Загальні виклики. 5G IoT може формуватися з іншими технологіями, але створює схожі проблеми незалежно від їх застосування.

Низький контроль використання та зберігання даних. У мережі 5G IoT створюється величезна кількість даних. Його створюють за допомогою пристроїв, унікальних для багатьох компаній. Як наслідок, ці дані часто виходять з-під контролю всіх зацікавлених сторін або користувачів. Дані можуть бути підпорядковані всім постачальникам, чиє обладнання створює мережевий вузол, усім постачальникам послуг, які використовують спільну мережеву архітектуру 5G, або всім користувачам, які спільно використовують одну хмарну платформу, коли її використовують усі сторони. Як наслідок, це складне завдання відстежити, які дані від кого надходять, хто є автором і системою обробки.

Масштабованість. Хмарна архітектура дозволяє 5G IoT контролювати та керувати мережею в цілому. Іншими словами, вузли в мережі створюють дані для обробки в загальній хмарі. Потім вузли мережі надсилають сигнали керування для виконання таких завдань, як перерозподіл сховища, керування трафіком, керування несправностями, маршрутизація тощо. Проте зі збільшенням кількості підключених пристроїв зростає і обсяг даних, які вони генерують, тому збільшення потужності та обчислювальної потужності централізованих хмарних серверів стає проблемою, що наближається. Крім того, пристрої підключаються до хмарних вузлів через шлюз або периферійний вузол в екосистемі 5G та IoT. Через велику кількість пристроїв, які намагаються підключитися до хмари, передня, проміжна та зворотна мережі, розташовані безпосередньо поблизу вузлів шлюзу, часто стають звуженими, зменшуючи масштабованість усієї мережі.

Складна взаємодія між пристроями. Технологічні стандарти, вбудовані

в пристрої, які використовуються в екосистемі 5G IoT, мають різну сигнальну хвилю, різні біти даних, різні протоколи PHY і MAC, структуру кодування, інтерфейс користувача тощо. Робота цих пристроїв також підтримується різними операційними системами. Таким чином, це дуже складне завдання ініціювати взаємний стандарт зв'язку, який буде дотримуватись у всій інфраструктурі 5G IoT. Знову ж таки, спільну програму чи операційну систему, яка може підтримувати різні протоколи зв'язку для кількох пристроїв, також дуже важко представити. Таким чином, він може заборонити розширення певної програми та навіть обмежити використання деяких пристроїв у середовищі 5G IoT.

Аудиторність даних. Дані, створені в мережах 5G IoT, мають кілька власників і є надзвичайно невідповідними, що ускладнює відстеження та аудит. Бувають також ситуації, коли немає загальних стандартів або протоколів для даних, як обговорювалося раніше, для спільного використання між пристроями, що належать різним компаніям. Крім того, дані можуть не оброблятися або передаватися між різними підрозділами організації через різні протоколи зв'язку, а також через труднощі довіри. Подібні типи даних, як-от метеорологічні дані та дані про навколишнє середовище, іноді не передаються чи не взаємодіють кількома суб'єктами, щоб прийти до узгодженого міркування.

Неоднорідність даних 5G та IoT. І екосистеми 5G, і IoT мають різноманітну природу, що викликає кілька проблем із сумісністю під час впровадження різних програм. Оскільки дані, створені в мережах IoT і стільникових мережах 5G, різноманітні та багатовимірні, точні характеристики та результат передбачити майже неможливо. Як наслідок, для навчання цього типу даних потрібні перші операції, такі як очищення, упорядкування та попередня обробка, оскільки інтеграція такого різноманітного набору даних

призводить до неправильних обчислень. Отже, тестування наборів даних у різних ситуаціях має приділяти більше уваги цьому аспекту для навчання наборів даних і вибору функцій. Датчики та люди, наприклад, створюють дані для мереж IoT у розумних будинках. Однак загальний або центральний сервер повинен містити всі дані, які використовуються в цій програмі. Цей сервер відповідатиме за об'єднання та навчання даних із багатьох джерел, щоб він міг справлятися з різними даними та досягати вищої точності прогнозування.

Проблеми з інтеграцією блокчейну 5G IoT. Блокчейн, інтегруючись із 5G IoT, відкриває можливості для багатьох програм. Але багато з них також стикаються з різними проблемами. Тут обговорюються деякі серйозні проблеми для інтегрованої в блокчейн екосистеми 5G IoT.

Час обробки. Щоб побудувати ланцюжок в екосистемі блокчейну, потрібно кілька самовиконуваних завдань, таких як перевірка транзакцій і блоків. Ці обчислення виконуються за певними криптографічними процедурами для підтримки автентичності блоків у блокчейні, що займає багато часу. Це може бути рішенням для зменшення обсягу навчальних даних, але в контексті IoT існують певні обчислювальні обмеження, які можуть призвести до проблем безпеки. Як наслідок, велике занепокоєння щодо реалізації блокчейну в контексті IoT полягає в тому, що він потребує меншої кількості ресурсомістких замін для скорочення часу обробки.

Конфіденційність і безпека. IoT сам по собі створює багато проблем із конфіденційністю інтегрованої в блокчейн мережі 5G для величезної кількості пристроїв, які використовують численні датчики, підключені по всьому світу. Крім того, блокчейн віддає перевагу публічній перевірці транзакції. Дотримання процедури шифрування блокчейну разом із захистом даних 5G є серйозною проблемою. Існують деякі дослідження для подолання цієї проблеми, які пропонують гомоморфні обчислення для приховування даних під час доступу будь-якого користувача. Але контроль понад 51% даних з екосистеми 5G IoT

може призвести до проблеми зворотних транзакцій або подвійних витрат. Отже, комбіноване рішення все ще є великою проблемою.

Масштабованість сховища. Головною потребою технології блокчейн є постійне зберігання транзакцій і блоків. Кожен вузол теоретично повинен мати копію книги, яка зростає разом із транзакціями. З точки зору масштабованості, ефект зберігання екосистеми IoT матиме вплив на роботу всієї системи. Змінні транзакції, пов'язані з розширенням системи, потребують, зокрема, великого обсягу пам'яті.

Вартість. Блокчейн має власні проблеми з масштабованістю, але, з іншого боку, пропускну здатність або вартість є ще однією великою проблемою цієї технології. Для IoT важко встигати за зростаючою кількістю транзакцій та їх розміром. Ще дві проблеми, які часто виникають, це затримка та пропускну здатність транзакцій. Через те, що приватний блокчейн генерує менше даних, ніж публічний блокчейн, він кращий перед середовищем IoT. Але 5G IoT генерує великі дані, і аналіз цієї величезної пропускну здатності блокчейном збільшує обчислювальні витрати.

Проблеми з мм-хвилями 5G. Додаток 5G мм-хвиль має багатообіцяюче значення для підвищення надійності екосистеми IoT, низької затримки та більшого розподілу ємності для технологій MIMO (Multiple Input Multiple Output). Але він має обмеження діапазону спілкування. Крім того, ядро 5G мм-хвиль поєднується з різними за характеристиками пристроями, такими як LTE і мм-діапазон. Знову ж таки, він чутливий до блокування, що обмежує його рухливість через багате середовище розсіювання. Він також споживає багато енергії через інтенсивне використання обладнання. Отже, перешкоди, пов'язані з погодними умовами, ускладнюють використання з інфраструктурою IoT.

Захист від загроз 5G IoT. Навіть після чіткого пом'якшення проблем 5G та IoT загрози безпеці знову з'являться в інтегрованій інфраструктурі 5G IoT. Існує багато загроз безпеці, як-от DoS-атаки, сигнальні шторми, крадіжка

фрагментів, атаки на проникнення, атака Man-in-the-middle (MITM), атака на рівні TCP, скидання експозиції ключа безпеки та атака IP-спуфінгу тощо. наприклад SDN, NFV, хмарний сервер тощо. Ці атаки можуть не тільки викрити загальну програму 5G IoT, але й значно вплинути на конфіденційність даних. Існують деякі рішення для цих атак, як-от використання малопотужних вузлів і датчиків, захист хмари та додатків для SDN і NFV тощо. Але це все ще викликає занепокоєння щодо майбутнього 5G IoT .

Таблиця 2.2.

Короткий огляд основних проблем і можливих шляхів їх вирішення інтегрованої системи Інтернету речей 5G.

Домен	Виклики	опис	Рішення
Загальні виклики	Низький контроль використання та зберігання даних	Різні типи даних використовуються різними об'єктами Важко відстежити джерело шкідливих даних	Система флеш-пам'яті NAND на основі BICM-ID оптимізована за допомогою алгоритму EREXIT для керування зберіганням даних
	Масштабованість	Здатність і обчислювальна потужність для масштабування вузлів даних зменшуються зі зростанням маршрутів даних Спроба великої кількості даних отримати доступ до хмари призводить до звуження шлюзу	Економічний SDN з оптимізацією даних у кількох секторах промислового Інтернету речей і 5G

Домен	Виклики	опис	Рішення
	Складна взаємодія між пристроями	Відсутність загальної операційної системи серед взаємодіючих пристроїв	Протокол під назвою oneM2M з використанням онтології
	Аудитуємость даних	Відсутність сумісності між об'єктами для обробки, передачі та спільного використання даних	Обхід ядра за допомогою RDMA і DPDK
Неоднорідність	Невідповідність даних	Різноманітність технологій 5G та IoT привертає додаткову увагу до попередньої обробки даних. Тестування набору даних і вибір функцій скомпрометовано	Запропоновані можливі рішення для управління мобільністю 5G HetNet на основі процедури пейджингу, реєстрації та доступу

Продовження таблиці 2.2.

Інтегрована система ШІ	Попит на пропускну здатність	Для керування складним алгоритмом потрібна висока пропускну здатність	Запропонував фреймворк 5G, здатний працювати з високою пропускну здатністю
	Вартість	Вартість оптимізації, як правило, вища через використання великої кількості даних для навчання та тестування	Пропонується недорога адаптація, оптимізована для VNF, для операцій ШІ
Інтегрована система блокчейн	Час обробки	Потрібна менш ресурсомітка структура 5G IoT для скорочення загального часу обробки	Інтеграція блокчейну на основі смарт-контрактів
	Конфіденційність і безпека	Процес шифрування даних 5G важко встановити	У поєднанні з глибоким навчанням пропонується чотирирівневий фреймворк на основі блокчейна
	Масштабованість сховища	Великий ланцюжок блоків зменшує масштабованість сховища	Використовуючи туманне обчислення та обладнання для хмарного виробництва, представлено структуру Hyperledger Fabric

Продовження таблиці 2.2.

	Пропускна здатність	Менше генерування даних є кращим для приватного блокчейну, але 5G IoT потребує великих даних, що збільшує обчислювальні витрати	Блокчейн із VNF за новим консенсусним алгоритмом
Спектр	Проблема з мм-хвилями 5G	Відсутність узгодженості між пристроями з підтримкою LTE та 5G Впливають погодні умови	Запропоновано конструкцію антени з використанням гібридного формування променя для мобільної передачі
Стандарт пристрою	Загальні протоколи	Дефіцит загальних протоколів і стандартів, незалежно від пристроїв і застосування	Для платформи роботи з кількома пристроями пропонується система IoT на основі ZigBee
Загрози безпеці	Кібератаки, такі як атака на рівні TCP, підробка IP-адрес тощо	Загрожує конфіденційності даних і викриває систему в цілому	Представлено систему виявлення зловмисного програмного забезпечення на основі згорткової нейронної мережі
Інфраструктура	Масштабованість мережі та взаємодію	Обмеження апаратного забезпечення та передових технологій для поєднання 5G з IoT	Розроблено багаточастотні антени з потужністю передньої радіочастоти, дуплексер і триплексер

Окрім зазначених проблем, у системах і програмах 5G IoT з'являться інші недоліки та проблеми. Таким чином, це забезпечить майбутні напрямки для великої кількості областей досліджень і розробок.

Висновки:

Мережа 5G має можливість підключати понад 100 мільярдів пристроїв і обмінюватися даними принаймні в 10 разів швидше, ніж LTE, що змінює гру в середовищі IoT. Метою має бути впровадження масштабованої, доступної та ефективної мережевої архітектури для 5G IoT, що з'єднує величезну кількість пристроїв. Застосування 5G IoT у кількох областях для підвищення ефективності може принести багато можливостей разом із викликами. Архітектурні аспекти та аспекти безпеки потребують великої уваги. Крім того, виробники повинні проводити тестування якості та технічного обслуговування, щоб гарантувати прийняття майбутнього програмного та апаратного забезпечення для виконання своїх функцій у різних сценаріях. 5G IoT може дати великі економічні переваги підприємствам, які прагнуть охопити цей новий світ, у поєднанні з такими важливими технологіями, як хмарна безпека, штучний інтелект і віддалені обчислення. У цьому розділі ми спробуємо проаналізувати можливості інтегрованої екосистеми 5G IoT для усунення недоліків IoT, що описують особливості 5G. Архітектура 5G IoT також показує, що існує багато проблем і майбутні напрямки досліджень. Ми сподіваємося, що ці ілюстрації дадуть повне розуміння та надихнуть на розробку додатків 5G IoT.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Порівняння між 5G та IoT

На малюнку 3.1. показано порівняння між 5G та IoT, що є темою, яка цікавить світ технологій. Для впровадження 5G існують особливі вимоги, включаючи інфраструктуру та спеціалізоване обладнання, тоді як еволюція бездротових мереж призвела до швидшої та надійнішої швидкості передачі даних. Розвиток Інтернету речей дозволив створювати малопотужні та недорогі пристрої, які можна підключати до Інтернету. Технології бездротового зв'язку, такі як Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee та LoRa, підходять для різних типів додатків IoT, а хмарні рішення використовуються для зберігання та обробки величезних обсягів даних, створених пристроями IoT. Програми 5G включають автономні транспортні засоби, дистанційну хірургію, віртуальну та доповнену реальність, і для цього потрібна висока пропускна здатність, низька затримка та надійне підключення. Однак існують проблеми, пов'язані з мережами 5G, такі як перешкоди та труднощі з оптимізацією мережі. Співіснування мереж 5G і додатків IoT викликає занепокоєння, і потрібно вирішити проблеми оптимізації в мережах 5G, щоб забезпечити ефективне впровадження.

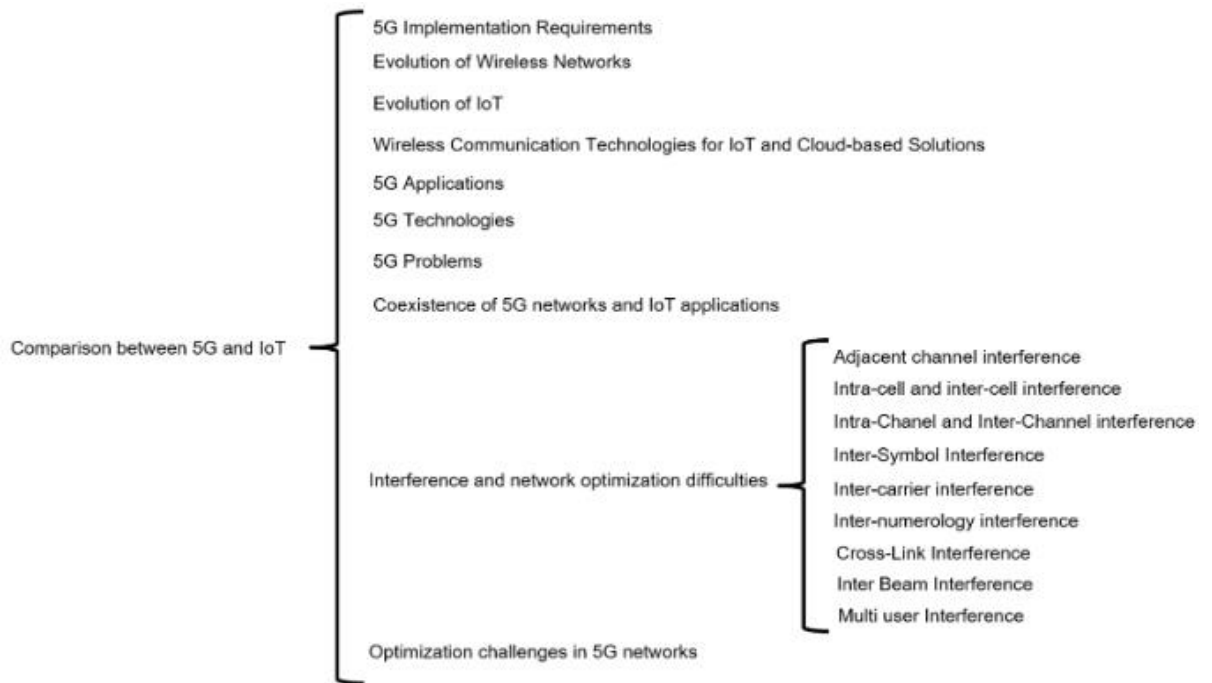


Рис.3.1. Резюме концептуальних схем

3.2. Програми 5G, на які впливають пристрої IoT.

На рис.3.2. показано, як технологія IoT і 5G можуть працювати разом, щоб забезпечити низку додатків у різних сферах. У першому додатку «розумні міста» пристрої IoT можна використовувати для збору даних у режимі реального часу про транспортні потоки, якість повітря та споживання енергії. Ці дані можна використовувати для оптимізації роботи міста та покращення якості життя. Мережі 5G можуть підтримувати ці програми, забезпечуючи необхідну пропускну здатність і низьку затримку. У промисловій автоматизації пристрої IoT можна використовувати для моніторингу та контролю виробничих процесів і обладнання в режимі реального часу. Це може допомогти підвищити ефективність і скоротити час простою. Мережі 5G можуть забезпечити необхідну пропускну здатність, надійність і низьку затримку для підтримки цих програм. У сфері охорони здоров'я пристрої IoT можна використовувати для

віддаленого моніторингу пацієнтів і спілкування в режимі реального часу між постачальниками медичних послуг. Це може допомогти покращити результати лікування пацієнтів і зменшити витрати на охорону здоров'я. Мережі 5G можуть забезпечити необхідну пропускну здатність, низьку затримку та надійність для підтримки цих програм. У транспорті пристрої IoT можуть надавати дані в режимі реального часу про моделі руху та характеристики транспортних засобів, які можна використовувати для оптимізації потоку транспорту та підвищення безпеки. Мережі 5G можуть підтримувати ці програми, забезпечуючи необхідну пропускну здатність, низьку затримку та надійність. У сільському господарстві пристрої IoT можна використовувати для моніторингу посівів і худоби в режимі реального часу, що може допомогти оптимізувати виробництво та зменшити відходи. Мережі 5G можуть підтримувати ці програми, забезпечуючи необхідну пропускну здатність, надійність і низьку затримку. У роздрібній торгівлі пристрої IoT можна використовувати для збору даних у режимі реального часу про поведінку клієнтів і рівень запасів, які можна використовувати для оптимізації роботи магазину та покращення досвіду клієнтів. Мережі 5G можуть забезпечити необхідну пропускну здатність, надійність і низьку затримку для підтримки цих програм. Загалом у тексті показано, як технології IoT і 5G можуть працювати разом, щоб забезпечити низьку додатків у різних сферах. Забезпечуючи необхідну пропускну здатність, низьку затримку та надійність, мережі 5G можуть підтримувати збір і аналіз даних у реальному часі, що може допомогти підвищити ефективність, зменшити витрати та підвищити якість життя в різних секторах.

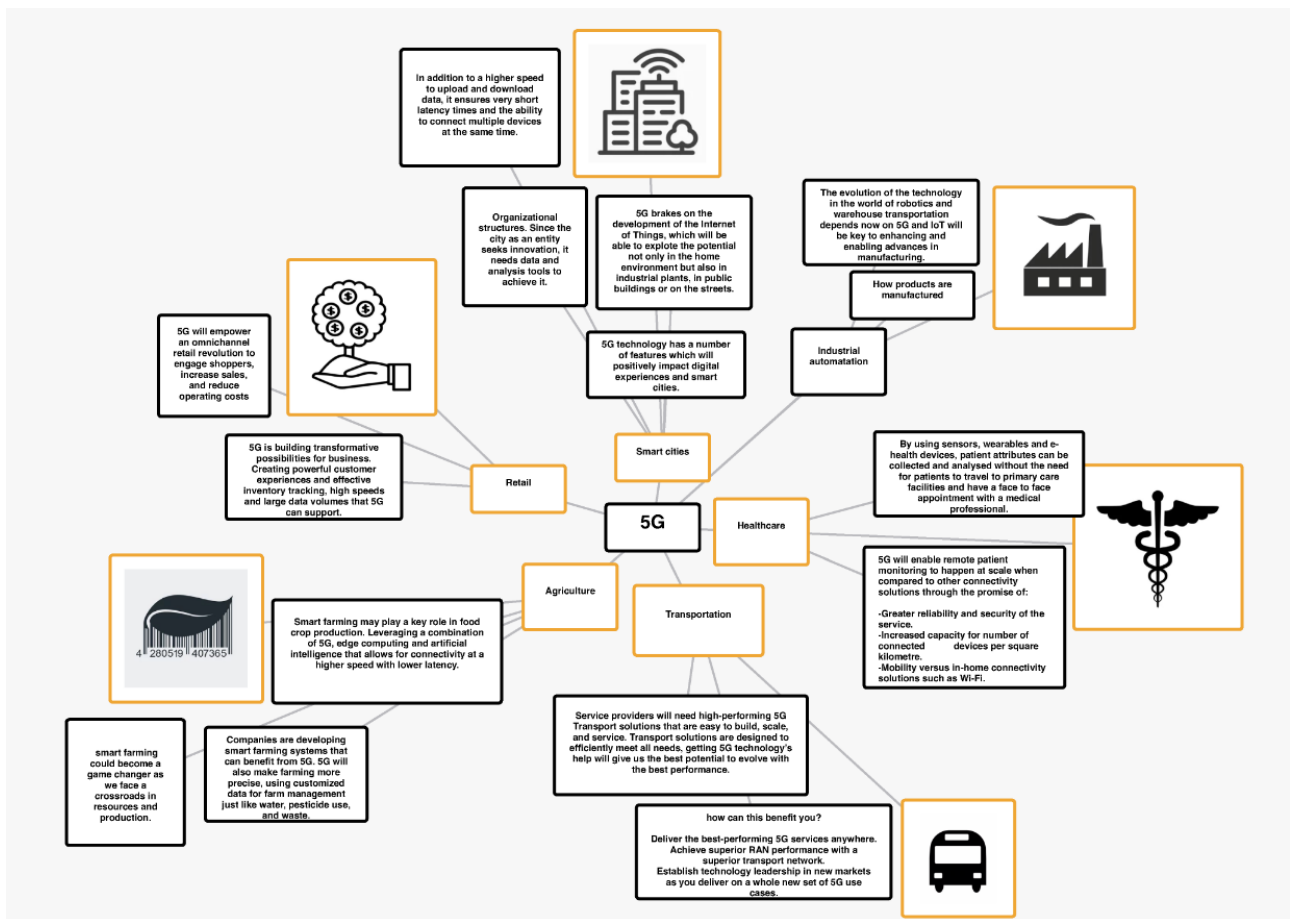


Рис. 3.2. Програми 5G, на які впливають пристрої IoT

Характеристики радіосигналу нових бездротових додатків подібні до характеристик існуючих мобільних технологій [5]. Саме тут інтерес цієї роботи полягає в детальному розгляді впливу та типів перешкод технологій 5G, які співіснують з пристроями IoT. Нові додатки використовують однакові потужності передачі та працюють у тих самих діапазонах частот.

Щоб пом'якшити перешкоди, ми можемо синхронізувати або координувати всі мережі або запровадити великі захисні смуги, які втрачають цінний спектр [15]. На практиці потрібна тісна співпраця між усіма операторами в кожному частотному діапазоні, і не всі режими використання та всі типи розгортань 5G можуть підтримуватися одночасно. Регулюючі органи

повинні враховувати ці технічні проблеми та їхні наслідки, вирішуючи, як розподілити частоти в цих діапазонах.

Різні методи керування перешкодами, такі як керування живленням, розподіл каналів і формування променя, можуть бути реалізовані, щоб гарантувати, що пристрої IoT в одній мережі не заважають один одному. Однак ці методи можуть бути складними та вимагати значних змін у мережевій інфраструктурі [[16](#)]. Крім того, можуть знадобитися нові методи керування перешкодами, оскільки пристрої IoT продовжують розвиватися та стають все більш складними.

Іншою серйозною проблемою в управлінні перешкодами в мережах 5G є різноманітність пристроїв і програм, які використовують ці мережі. Послуги IoT можна використовувати в різних галузях, включаючи охорону здоров'я, виробництво та транспорт, кожна з яких має унікальні вимоги до підключення та затримки [[17](#)]. Наприклад, у сфері охорони здоров'я такі пристрої Інтернету речей, як портативні монітори та системи дистанційного моніторингу пацієнтів, вимагають низької затримки та надійного підключення для надання точних даних і сповіщень. Навпаки, пристрої IoT, які використовуються в промисловій автоматизації, вимагають високої пропускної здатності та низької затримки для ефективного роботи [[18](#)]. Таким чином, керування перешкодами в мережах 5G вимагає комплексного підходу, який враховує різноманітні вимоги до підключення та затримки різних пристроїв і програм IoT.

Ще одним важливим викликом є можливість зовнішнього втручання; хоча методи керування перешкодами можуть гарантувати, що пристрої IoT в одній мережі не заважають один одному, зовнішні перешкоди можуть виникати, коли пристрої IoT працюють у зонах з іншими бездротовими пристроями, такими як маршрутизатори Wi-Fi, пристрої Bluetooth та інші стільникові мережі. Це може призвести до погіршення сигналу, зниження пропускної здатності та зниження надійності мережі [[19](#)]. У зв'язку з цим важливо враховувати зовнішні

перешкоди при проектуванні та впровадженні мереж 5G для послуг IoT, а також використовувати такі методи, як координація частот і спільне використання спектру, щоб ефективно керувати зовнішніми перешкодами.

Щоб краще зрозуміти тему перешкод 5G, ми дотримуємося структури, описаної на рис.3.3.

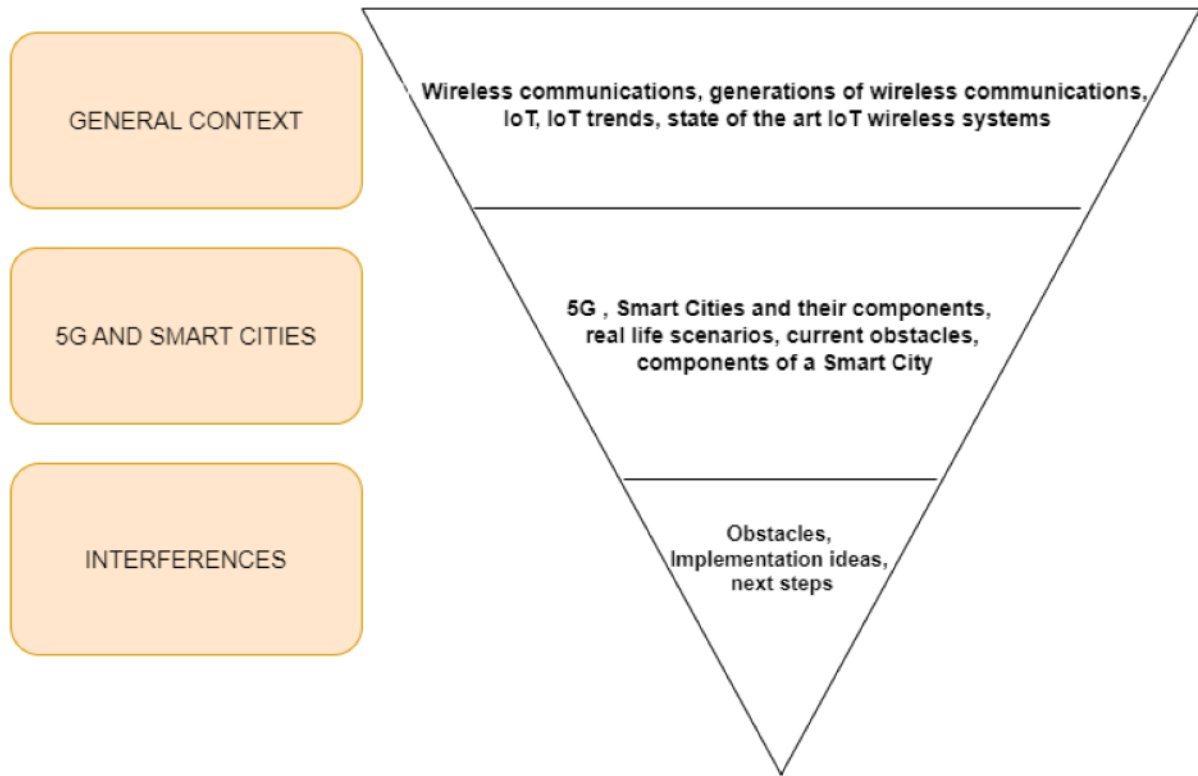


Рис.3.3. Схема впливу технологій 5G та IoT

3.3. Світові дослідження впливу перешкод мережі 5G на послуги IoT

Вплив перешкод мережі 5G на послуги IoT є областю активних досліджень. Кілька досліджень досліджували вплив перешкод на продуктивність пристроїв і програм IoT. Одне нещодавнє дослідження Chandra et al. проаналізували вплив перешкод на надійність мереж 5G для послуг IoT

[[20](#)]. Дослідження показало, що перешкоди можуть значно знизити надійність мереж 5G для послуг Інтернету речей, особливо в щільних розгортаннях, де кілька пристроїв працюють в одній зоні. Дослідження рекомендувало використовувати передові методи керування перешкодами, такі як динамічний розподіл каналів і контроль потужності, щоб пом'якшити вплив перешкод і підвищити надійність мережі.

Ще одне недавнє дослідження Azari et al. [[21](#)] досліджували вплив перешкод на продуктивність мереж 5G для додатків IoT. Дослідження показало, що перешкоди можуть спричинити значне погіршення продуктивності мережі, особливо для програм, які потребують низької затримки та високої пропускну здатності. Дослідження рекомендувало використовувати адаптивне формування променя та динамічний розподіл каналів для зменшення перешкод і підвищення продуктивності мереж 5G для додатків IoT. Крім того, дослідження підкреслило необхідність додаткових досліджень методів керування перешкодами, які можуть ефективно пом'якшити вплив перешкод на мережі 5G для послуг IoT.

Кілька досліджень також вивчали вплив перешкод на споживання енергії пристроями IoT, підключеними до мереж 5G. Одне нещодавнє дослідження Al-Turjman et al. [[22](#)] виявили, що перешкоди можуть призвести до того, що пристрої IoT споживають більше енергії для підтримки зв'язку, що призводить до скорочення терміну служби батареї та збільшення витрат на обслуговування. Дослідження рекомендувало використовувати методи управління перешкодами, такі як енергоефективний розподіл каналів і планування для зменшення перешкод і підвищення енергоефективності пристроїв IoT у мережах 5G. Дослідження прийшло до висновку, що ефективні методи управління перешкодами є вирішальними для забезпечення стійкості та економічної життєздатності послуг IoT у мережах 5G.

Ще одна важлива область досліджень, пов'язана з мережевими перешкодами 5G у послугах Інтернету речей, – це наслідки методів керування

перешкодами для безпеки та конфіденційності. Методи керування перешкодами, такі як формування променя та розподіл каналів, вимагають обміну інформацією між пристроями IoT та мережею, що потенційно може відкрити конфіденційну інформацію для перехоплювачів і зловмисників. Недавнє дослідження Хасана та ін. [23] досліджував ризики безпеки та конфіденційності, пов'язані з формуванням променя, і запропонував безпечну схему формування променя, яка використовує шифрування та автентифікацію для захисту конфіденційної інформації. Дослідження прийшло до висновку, що під час проектування мереж 5G для послуг Інтернету речей слід ретельно враховувати наслідки техніки керування перешкодами для безпеки та конфіденційності. Ефективні заходи безпеки та конфіденційності можуть допомогти зменшити ризики, пов'язані з методами керування перешкодами, і забезпечити цілісність і конфіденційність даних IoT у мережах 5G.

Загалом, поточний рівень техніки та відповідна робота щодо впливу перешкод мережі 5G на послуги IoT підкреслюють важливість ефективних методів керування перешкодами для забезпечення надійності та продуктивності мереж 5G для додатків IoT. Дослідження рекомендують використовувати передові методи керування перешкодами, такі як динамічний розподіл каналів, контроль потужності, адаптивне формування променя та спільне використання спектру, щоб пом'якшити вплив перешкод і покращити продуктивність мережі. Однак необхідні додаткові дослідження для розробки нових і більш ефективних методів управління перешкодами, які можуть вирішити унікальні проблеми мереж 5G і послуг IoT.

У таблиці 3.1 представлено порівняння послуг Інтернету речей на основі впливу перешкод мережі 5G на їх продуктивність.

Він описує шість параметрів таким чином:

1. Сервіс IoT: у цьому параметрі перераховуються різні сервіси IoT, які розглядаються під час порівняння.

2. Надійність: цей показник представляє надійність мереж 5G при використанні для підтримки відповідної служби IoT. Надійність – це показник здатності мережі надавати послідовне та надійне обслуговування. Значення в цьому стовпці варіюються від низького до високого.

3. Працюють кілька пристроїв: цей показник показує, чи може служба IoT працювати з кількома пристроями. Це важливий фактор, який слід враховувати, оскільки багато послуг IoT передбачають підключення кількох пристроїв, і мережа повинна підтримувати одночасний зв'язок цих пристроїв.

4. Затримка: цей параметр вимірює кількість затримки або часу затримки під час передачі даних між пристроями IoT і мережею. Затримка є важливим показником, який слід враховувати для послуг IoT у реальному часі, таких як підключені транспортні засоби та моніторинг охорони здоров'я. Значення в цьому стовпці коливаються від низьких до наднизьких.

5. Методи керування перешкодами: цей параметр містить перелік різних методів, які можна використовувати для керування перешкодами в мережі. Управління перешкодами має вирішальне значення для підтримки високої продуктивності за наявності інших пристроїв і мереж, які можуть використовувати ті самі діапазони частот. Методи, перелічені в цій колонці, включають динамічний вибір частоти, стрибкоподібне перемикання каналів, формування променя, скоординовану багатоточкову передачу, динамічний контроль потужності, уникнення перешкод, MIMO (багато входів, багато виходів) [24], когнітивне радіо, масивний MIMO та інтерференційне вирівнювання.

6. Споживання енергії: цей показник вказує на кількість енергії, споживаної пристроями IoT і мережею. Споживання енергії є важливим фактором для послуг Інтернету речей, особливо для тих, які працюють у віддалених місцях або покладаються на пристрої, що живляться від акумулятора. Значення в цьому стовпці варіюються від низького до високого.

У таблиці 3.1. порівнюються десять послуг Інтернету речей, включаючи автоматизацію розумного дому, розумне сільське господарство, промисловий Інтернет речей, підключені транспортні засоби, моніторинг охорони здоров'я, розумні міста, моніторинг навколишнього середовища, управління розумною мережею, доповнену реальність і дрони. Для кожної послуги IoT у таблиці перераховані параметри в кожному стовпці, що стосуються впливу перешкод мережі 5G на її продуктивність. Зверніть увагу, що значення в таблиці є лише прикладами та повинні бути замінені відповідними даними з відповідних документів. У таблиці наведено корисний огляд того, як перешкоди в мережі 5G можуть вплинути на різні служби Інтернету речей і які фактори важливо враховувати під час оцінки продуктивності цих послуг за наявності перешкод.

Таблиця 3.1.

Вплив перешкод мережі 5G на послуги IoT.

Сервіс IoT	Надійність	Кілька пристроїв	Затримка	Управління перешкодами	Енергоспоживання
Автоматизація розумного будинку [7]	Високий	так	Низький	Динамічний вибір частоти	Низький
Розумне сільське господарство [25]	Середній	так	Середній	Перемикання каналів	Високий
Промисловий IoT [26]	Високий	так	Низький	Формування променів	Середній
Підключені транспортні засоби [27]	Високий	так	Ультранизький	Координація багатоканова передача	Високий
Моніторинг охорони здоров'я [28]	Високий	так	Низький	Динамічний контроль потужності	Низький
Розумне місто [29]	Високий	так	Низький	Уникнення перешкод	Високий
Екологічний моніторинг [30]	Середній	так	Середній	MIMO	Низький

Продовження таблиці 3.1.

Інтелектуальне управління електромережами [31]	Високий	так	Низький	Пізнавальне радіо	Високий
Доповнена реальність [32]	Високий	немає	Ультранизький	Масивний МІМО	Високий
Дрони [33]	Високий	так	Ультранизький	Вирівнювання інтерференції	Середній

Мережі 4G засновані на технології LTE, яка використовує частотний спектр приблизно від 700 МГц до 2600 МГц. Ці частоти розділені на різні діапазони, які використовуються для різних цілей, наприклад для передачі голосу та даних. Мережі 4G використовують комбінацію методів дуплексного зв'язку з частотним поділом (FDD) і дуплексного зв'язку з часовим поділом (TDD) для передачі та отримання даних. FDD використовує окремі частоти для передачі та отримання даних, тоді як TDD використовує однакову частоту для обох.

З іншого боку, пристрої IoT використовують різноманітні технології та протоколи для зв'язку один з одним та з Інтернетом. Ці пристрої можуть працювати в різних частотних діапазонах, наприклад 2,4 ГГц, 5 ГГц і субдіапазонах ГГц. Деякі пристрої IoT використовують неліцензований спектр, що означає, що вони можуть працювати на будь-якій частоті без потреби в ліцензії, тоді як інші використовують ліцензований спектр, для якого потрібна ліцензія від відповідного регуляторного органу.

Одна з головних проблем із послугами та мережами 4G полягає в тому, що вони можуть створювати перешкоди для пристроїв IoT, особливо тих, що працюють на тих самих діапазонах частот. Ці перешкоди можуть спричинити проблеми зі зв'язком і навіть призвести до втрати чи пошкодження даних. Щоб пом'якшити цю перешкоду, можна використовувати різні методи, такі як стрибкоподібні зміни частоти, методи розширення спектру та керування потужністю.

На рис.3.4. узагальнено цей розділ, де розглядаються основні концепції, пов'язані з впливом мереж 5G на послуги IoT. Ми аналізуємо впровадження, еволюцію та типи бездротових технологій, які впливають на поточні послуги, провідні технології та проблеми 5G, а також співіснування мереж наступного покоління. Ми розглядаємо перешкоди як серцевину дослідження проблем цього типу мережі.

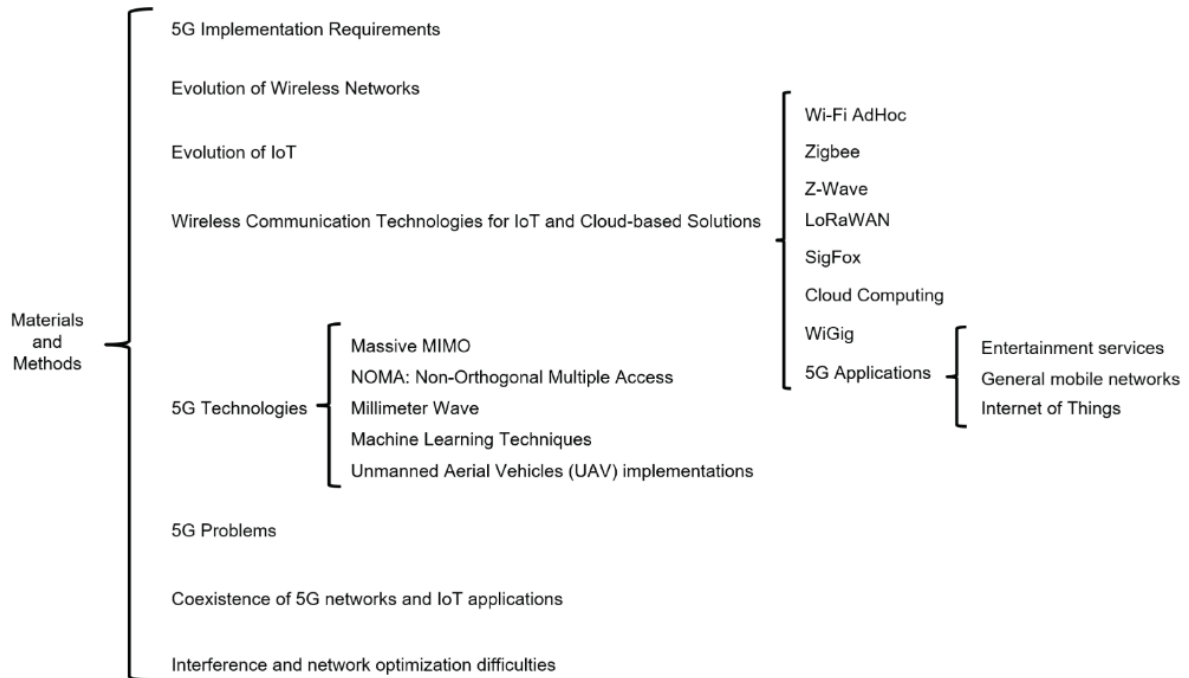


Рис.3.4. Матеріали та методи для послуг 5G та IoT

3.4. Вимоги до впровадження 5G

Мережі 5G пропонують кілька функцій, які є важливими для послуг Інтернету речей (IoT), як показано на рис.3.5. 5G забезпечує збільшену пропускну здатність і меншу затримку, дозволяючи пристроям IoT швидко й ефективно передавати дані для зв'язку та відповіді в реальному часі. 5G забезпечує масовий зв'язок машинного типу (mMTC), який дозволяє великій кількості пристроїв IoT підключатися до мережі одночасно. Також надається

наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC), що забезпечує швидку та надійну передачу даних, придатну для критично важливих послуг IoT. Нарізка мережі — це ще одна функція мереж 5G, яка створює виділені віртуальні мережі для пристроїв IoT для забезпечення кращої продуктивності та безпеки мережі.

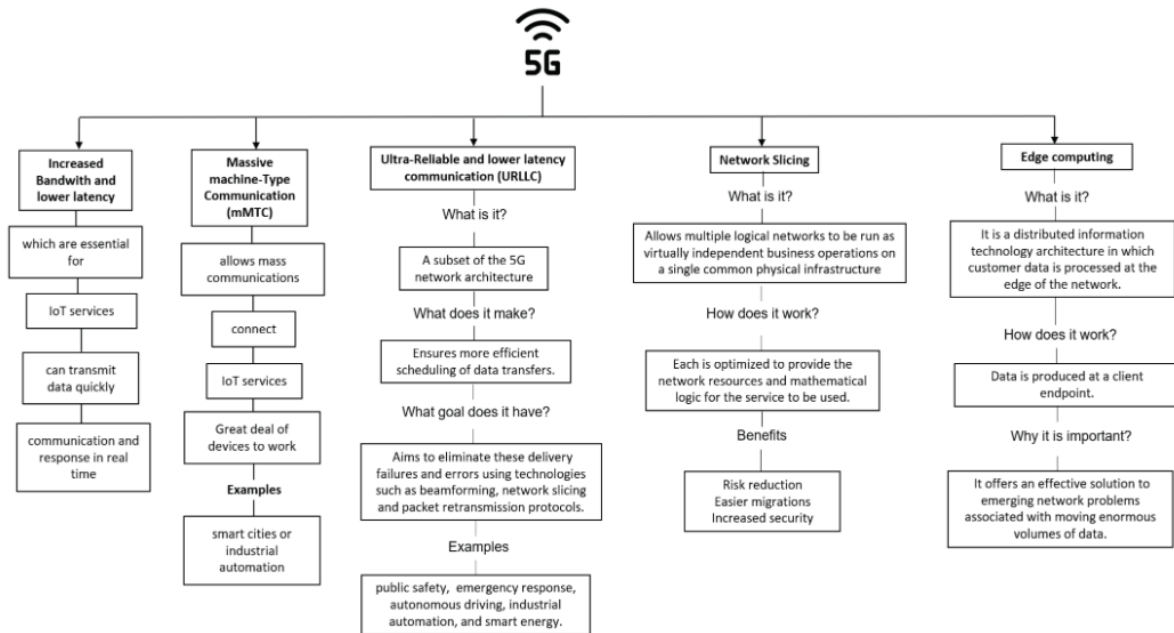


Рис.3.5. Функції 5 G, необхідні для послуг IoT

Слід згадати деякі важливі моменти щодо споживання енергії 5G. По-перше, енергоефективність залежить від трафіку в мережі. Згідно зі статтею «Енергоефективний 5G для більш екологічного майбутнього» [40], коли навантаження трафіку низьке, базова станція може заощадити 98,75% енергії, але якщо навантаження трафіку велике, споживання електроенергії може зрости.

5G— це останнє покоління стільникових мереж, яке розроблено таким чином, щоб запропонувати значні покращення в продуктивності, пропускній здатності та гнучкості порівняно з попередніми поколіннями. Щоб досягти цих покращень, мережі 5G використовують кілька ключових технологій. Однією з

цих технологій є частоти міліметрових хвиль (mmWave), які є діапазонами вищих частот, які можуть забезпечити вищу пропускну здатність і вищу швидкість передачі даних. Однак ці частоти мають короткі довжини хвиль і вимагають зв'язку між передавачем і приймачем у межах прямої видимості. Ще одна технологія, яка використовується в мережах 5G, — це технологія масивного MIMO (кілька входів, множинний вихід), яка використовує велику кількість антен для збільшення кількості просторових потоків і підвищення ефективності бездротового каналу. Це може допомогти збільшити швидкість передачі даних і загальну пропускну здатність мережі. Формування променя також є ключовою технологією, яка використовується в мережах 5G, оскільки вона використовує передові методи для фокусування радіосигналу на певному пристрої, збільшуючи силу сигналу та зменшуючи перешкоди. Ця технологія має вирішальне значення для забезпечення надійного та високошвидкісного з'єднання в щільному та динамічному середовищі. Нарізка мережі — це ще одна функція мереж 5G, яка дозволяє створювати виділені віртуальні мережі для задоволення конкретних вимог різних програм. Це означає, що пристрої можуть розподіляти власні мережеві ресурси та служби, забезпечуючи кращу продуктивність мережі та безпеку. Граничні обчислення також використовуються в мережах 5G, які забезпечують обробку та аналіз даних у реальному часі на межі мережі. Це може допомогти зменшити затримку та підвищити продуктивність чутливих до часу програм, таких як автономні транспортні засоби та віртуальна реальність. Низька затримка — це ще одна особливість мереж 5G, важлива для додатків, які вимагають зв'язку та реагування в реальному часі, таких як автономні транспортні засоби та дистанційна хірургія. Мережі 5G прагнуть досягти затримки менше 1 мілісекунди. Висока надійність також є важливою характеристикою мереж 5G, завдяки таким функціям, як нарізка мережі та резервування мережевих шляхів, що забезпечує підключення пристроїв. Це важливо для критично важливих

додатків, які потребують високої доступності та малого часу простою. Мережі 5G підтримують повнодуплексний зв'язок, що дозволяє одночасно передавати та отримувати дані. Ця технологія може допомогти підвищити ефективність і пропускну здатність мережі, забезпечуючи вищу швидкість передачі даних і зменшуючи затримку.

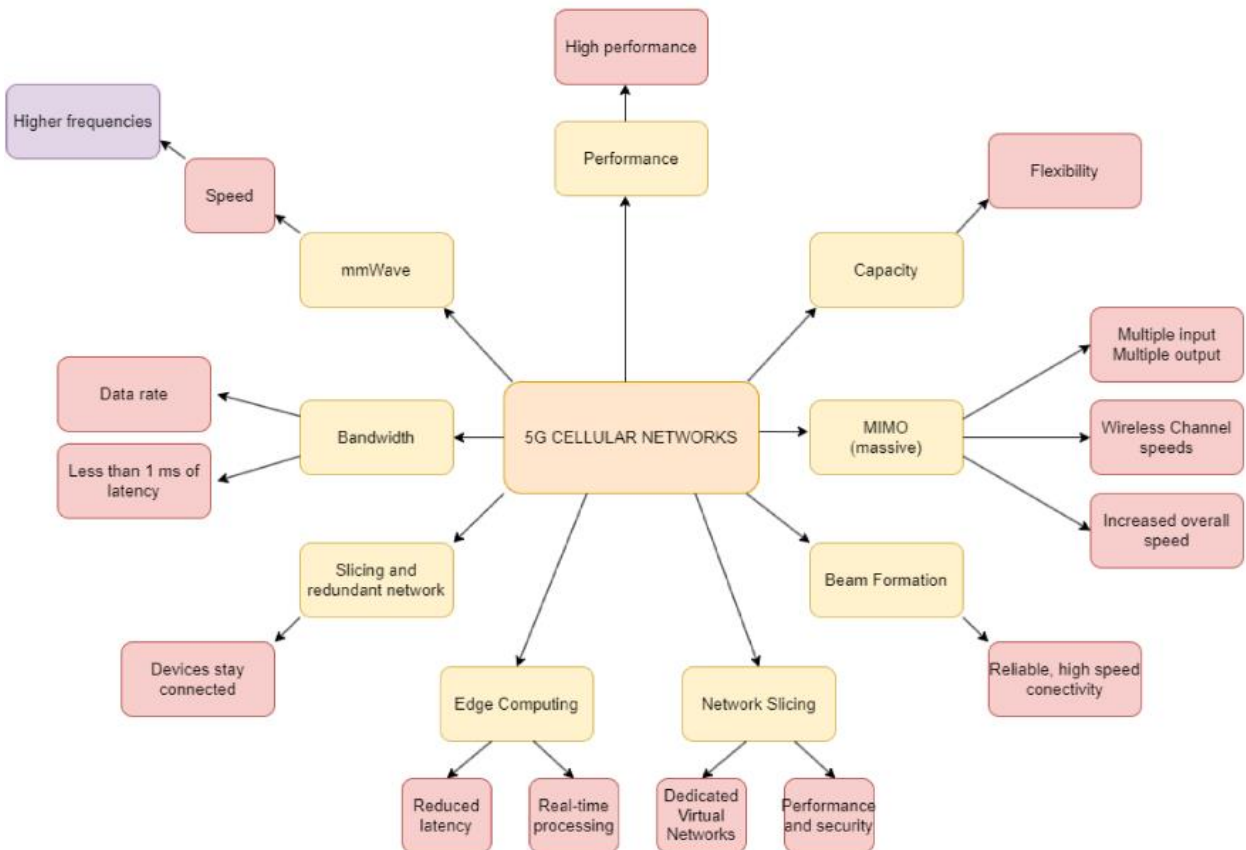


Рис.3.6. Вимоги до реалізації 5G

Виходячи з наведених вище вимог, наступні вимоги до розгортання мережі 5G:

- Частоти міліметрових хвиль (mmWave) для вищої пропускну здатності та швидкості передачі даних.
- Масивна технологія MIMO (кілька входів і виходів) для збільшення просторових потоків і підвищення ефективності бездротового каналу.

- Формування променя, щоб сфокусувати радіосигнал на певному пристрої, збільшуючи силу сигналу та зменшуючи перешкоди.

- Нарізка мережі для створення виділених віртуальних мереж відповідно до конкретних вимог різних додатків, підвищення продуктивності та безпеки мережі.

- Граничні обчислення для обробки та аналізу даних у реальному часі на межі мережі, зменшення затримки та підвищення продуктивності чутливих до часу програм.

- Низька затримка для зв'язку та відповіді в реальному часі, прагнучи досягти затримки менше 1 мілісекунди.

- Висока надійність для критично важливих додатків, що забезпечує високу доступність і низький час простою.

- Повний дуплексний зв'язок для одночасної передачі та прийому даних, підвищення ефективності, пропускну здатності та зменшення затримки.

Поєднання цих технологій у мережах 5G може забезпечити широкий спектр додатків, від послуг IoT до програм із високою пропускну здатністю, таких як віртуальна реальність і доповнена реальність. Мета мереж 5G – забезпечити необхідні показники продуктивності для підтримки цих додатків, сприяючи зростанню екосистеми IoT і новій ері підключення.

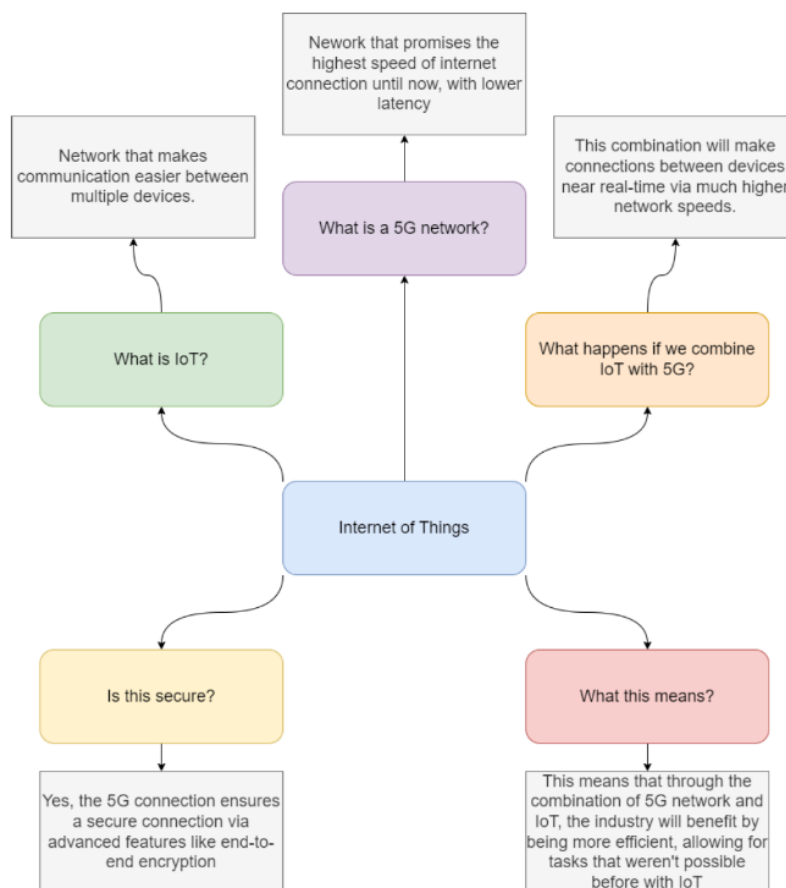


Рис.3.7. Визначення 5G і функцій, які є важливими для послуг Інтернету речей.

У таблиці 3.2. порівнюються проблеми, пов'язані з послугами 5G та IoT, у кількох ключових областях, а саме безпека, затримка, перешкоди, вартість і сумісність. З точки зору безпеки, мережі 5G вразливі до ряду загроз, таких як DDoS-атаки, крадіжка особистих даних і атаки типу "людина посередині", тоді як пристрої IoT можуть постраждати від порушень безпеки через слабе шифрування, паролі та застарілі прошивки. Що стосується затримки, мережі 5G мають нижчу затримку, що може бути проблемою для певних додатків IoT, які вимагають відповіді в реальному часі, тоді як служби IoT можуть страждати від затримки через перевантаження мережі, відстань від сервера та кількість пристроїв, підключених до мережі. Перешкоди є ще одним фактором,

який може вплинути як на послуги 5G, так і на послуги IoT, причому обидві чутливі до перешкод від інших бездротових пристроїв і факторів навколишнього середовища. Вартість також викликає занепокоєння, оскільки висока вартість інфраструктури та послуг 5G може обмежити її корисність для багатьох додатків IoT, тоді як послуги IoT також можуть бути дорогими для розгортання та обслуговування, особливо якщо вони потребують високої пропускної здатності або спеціалізованого обладнання. Нарешті, сумісність є потенційною проблемою як для служб 5G, так і для служб IoT, оскільки деякі пристрої IoT несумісні з мережами 5G, а послуги IoT обмежені проблемами сумісності з пропрієтарним апаратним або програмним забезпеченням.

Таблиця 3.2.

Порівняння проблем, пов'язаних із послугами 5G та IoT.

Проблема	5G	Сервіси IoT
Безпека	Мережі 5G вразливі до різноманітних загроз безпеки, таких як DDoS-атаки, крадіжки особистих даних і атаки типу "людина посередині".	Пристрої IoT вразливі до порушень безпеки через погане шифрування, слабкі паролі та застаріле мікропрограмне забезпечення.
Затримка	Мережі 5G мають меншу затримку, що може бути проблемою для певних додатків IoT, які вимагають обробки в реальному часі.	Сервіси IoT можуть страждати від затримки через перевантаження мережі, відставання в обробці та кількість пристроїв, підключених до мережі.
Втручання	Мережі 5G можуть відчувати перешкоди від інших бездротових пристроїв, які можуть порушити передачу даних.	Сервіси IoT також можуть страждати від перешкод через фактори навколишнього середовища та втручання від інших бездротових пристроїв.
Вартість	Вартість інфраструктури та послуг 5G може бути неприйнятно високою для багатьох додатків IoT, особливо для тих, що потребують широкомасштабного розгортання.	Сервіси IoT можуть потребувати високої пропускної здатності або спеціального обладнання, що робить їх дорожчими для розгортання та обслуговування.
Сумісність	Деякі пристрої IoT можуть бути несумісними з мережами 5G, що може обмежити їхню корисність у певних форматах.	Сервіси IoT також можуть бути обмежені проблемами сумісності, особливо якщо вони покладаються на фіксоване апаратне або програмне забезпечення.

3.5. Співіснування мереж 5G та програм IoT

Співіснування мереж 5G і додатків IoT має потенціал для революції в кількох галузях, забезпечуючи наднадійний зв'язок із малою затримкою, масовий зв'язок машинного типу та нарізку мережі для багатьох сервісів і програм [18]. У таблиці 3.3. наведено зведення про співіснування різних послуг і мереж 5G із додатками IoT. У ньому висвітлюється бездротова технологія, використовувані алгоритми та співіснування послуг із 4G і Wi-Fi. Таблиця містить кілька сервісів 5G, як-от 5G NR, 5G-V2X, 5G mMTC, 5G-UHD, 5G-IoT, 5G-eMBB, 5G-URLLC, 5G-mIoT, 5G-gNB і 5G-Slicing, і описує їхні потенційні застосування та опис системи. Таблиця надає корисний огляд співіснування послуг 5G та IoT і може бути корисною для розуміння потенційних переваг і проблем спільного розгортання цих технологій.

Таблиця 3.3.

Співіснування послуг і мереж 5G і додатків Інтернету речей.

Сервіс	Бездротова технологія	Використані алгоритми	Спілкування послуги	Програми та опис системи
5G NR	HP-V	NOMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Надійний зв'язок із малою затримкою для промислової автоматизації та автономних транспортних засобів
5G-V2X	ПК5	OFDMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Комунікації між транспортними засобами і всім для управління дорожнім рухом і безпеки
5G mMTC	NR-MTC	NOMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Масивні комунікації машинного типу для розумних міст і сільського господарства

Продовження таблиці 3.3.

5G-UHD	HP-V	OFDMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Відеозв'язок надвисокої чіткості та віртуальна реальність
5G-IoT	NR-MTC	NOMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Комунікації в Інтернеті речей для розумних будинків і переносних пристроїв
5G-eMBB	NR-eMBB	OFDMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Покращений мобільний ширококутовий зв'язок для високошвидкісної передачі даних і потокового передавання
5G-URLLC	NR-URLLC	NOMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Надійний зв'язок із малою затримкою для систем критично важливих додатків
5G-nMTC	NR-nMTC	NOMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Масштабні комунікації IoT для розумних міст і сільського господарства
5G-nB	NR-nB	OFDMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Зв'язок гігабітного класу для високошвидкісної передачі даних і потокового передавання
5G-навігація	NR-навігація	NOMA	Спілкування 4G і Wi-Fi	Навігація мережі для кількох служб і програм

3.6. Перешкоди та труднощі оптимізації мережі

Перешкоди в мережах 5G можуть мати значний вплив на пристрої IoT, ефективна робота яких залежить від стабільного та надійного з'єднання.

Пристрої IoT розроблені для передачі невеликих обсягів даних протягом тривалого часу, часто використовуючи мережі з низьким енергоспоживанням і низькою пропускну здатністю. Перешкоди в мережах 5G можуть спричинити затримки або перерви в передачі даних між пристроями IoT і хмарними системами, на які вони покладаються. Ці збої можуть вплинути на важливі функції, такі як моніторинг навколишнього середовища в реальному часі, керування трафіком і споживання енергії. Крім того, перешкоди в мережах 5G можуть призвести до збільшення затримки, через що пристроям Інтернету речей може бути важко своєчасно спілкуватися один з одним.

Іншим критичним аспектом втручання в мережі 5G є можливість порушення безпеки. Зі збільшенням кількості підключених пристроїв зростає й

ризик кібератак. Втручання в мережі 5G може полегшити хакерам отримання несанкціонованого доступу до пристроїв IoT і даних, які вони передають. Це може мати серйозні наслідки, особливо для пристроїв, які використовуються в критично важливих інфраструктурах, таких як системи охорони здоров'я, електромережі та транспортні мережі.

Щоб пом'якшити вплив перешкод у мережах 5G на пристрої IoT, важливо переконатися, що мережа правильно налаштована та керована. Це включає стратегічне розгортання точок доступу для мінімізації перевантаження, використання спрямованих антен для фокусування сигналів і зменшення перешкод, а також впровадження заходів безпеки для запобігання несанкціонованому доступу. Крім того, нові технології, такі як периферійні обчислення та нарізка мережі, можуть допомогти зменшити затримку та підвищити надійність зв'язку пристроїв IoT.

Перешкоди можуть зменшити зону покриття бездротової мережі шляхом підвищення порогового значення співвідношення сигнал/шум (SNR), необхідного для надійного зв'язку. За наявності шуму, багатошляхового поширення або перешкод від інших бездротових мереж сигнали можуть не досягати такої відстані або проникати так глибоко в будівлі, що призводить до зменшення загального покриття. Іншим аспектом, на який можуть вплинути перешкоди, є затримка. Перешкоди можуть збільшити затримку, вносячи затримки в передачу або прийом сигналу. Наприклад, багатошляхові перешкоди можуть спричинити надходження сигналів до приймача в дещо інший час, що призводить до спотворення сигналу та збільшення затримки. Ця затримка може бути особливо проблематичною для додатків у реальному часі, таких як ігри чи відеоконференції. Перешкоди також можуть впливати на доступність бездротової мережі. Якщо є перешкоди в одному каналі або перешкоди від інших пристроїв, це може спричинити колізії або насичення каналу, що призведе до зниження доступності. Це може призвести до втрати пакетів або

розриву з'єднання, що ускладнить доступ користувачів до мережі та призведе до поганої взаємодії з користувачем. На доступ до бездротової мережі також можуть впливати перешкоди. Перешкоди можуть ускладнювати підключення пристроїв до мережі, що призводить до збоїв підключення або зменшення пропускної здатності. Це може бути особливо проблематично в районах із високою щільністю пристроїв, наприклад у містах. Перешкоди також можуть впливати на модуляцію та кодування. За наявності перешкод якість сигналу може погіршитися, що ускладнить демодуляцію та декодування сигналу приймачем. Це може призвести до помилок і знизити загальну пропускну здатність мережі.

Таблиця 3.4.

Типи перешкод, які впливають на мережі 5G та IoT.

Тип перешкод	Покриття	Затримка	Доступність	Доступ	Модуляція	Кодування
Шум	Зменшені	Збільшені	Зменшений	Зменшені	Зменшені	Зменшені
Багатошляховість	Зменшені	Збільшені	Зменшений	Зменшені	Зменшені	Зменшені
Міжклітинна інтерференція	Зменшені	Збільшені	Зменшений	Зменшені	Зменшені	Зменшені
Перешкоди в одному каналі	Зменшені	Збільшені	Зменшений	Зменшені	Зменшені	Зменшені
Перешкоди від інших пристроїв	Зменшені	Збільшені	Зменшений	Зменшені	Зменшені	Зменшені
Глушіння	Зменшені	Збільшені	Зменшений	Зменшені	Зменшені	Зменшені
Перешкоди від інших бездротових мереж	Зменшені	Збільшені	Зменшений	Зменшені	Зменшені	Зменшені

Перешкоди сусідніх каналів виникають, коли суміжні частоти або канали перекриваються через недосконалість фільтрів або нелінійність підсилювачів. Міжстільникові перешкоди виникають, коли два користувачі з сусідніх

стільників намагаються одночасно використовувати один і той же діапазон частот через обмеження ресурсів у мережі. Внутрішньоканальні та міжканальні перешкоди виникають відповідно через фізичну близькість пристроїв і низьку потужність у мережі макросот. Міжсимвольна інтерференція є результатом спотворення сигналу через фазову або амплітудну дисперсію в каналі. Міжнесучі виникають через зміщення частоти між піднесучими. Міжнумерологічні перешкоди виникають через неортогональність системи, що спричиняє труднощі для вирівнювання символів. Перехресні перешкоди виникають, коли сигнали передаються сусіднім клітинам у різних напрямках одночасно. Міжпроменеві перешкоди виникають через використання багатопробієвих антенних систем, викликаючи перешкоди від сусідніх променів. Багатокористувацькі перешкоди виникають, коли кілька користувачів намагаються передати свої інформаційні запити одночасно, і MU-MIMO використовується для збільшення пропускної здатності та продуктивності систем бездротового мовлення.

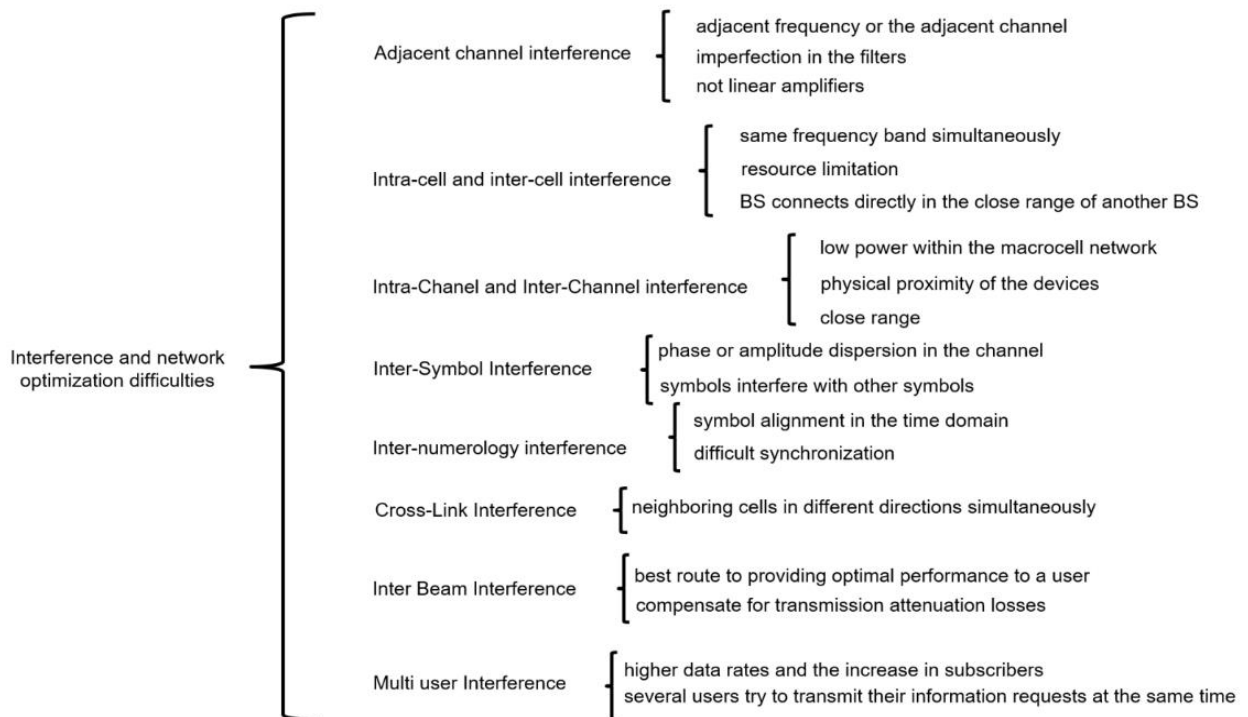


Рис.3.8. Основні концепції перешкод у 5G.

Ми повинні враховувати, що з еволюцією вищих швидкостей передачі даних ми шукаємо реалізацію в частотному спектрі, який щодня стає все більш насиченим. Розвиток цих частот змушує оператора повторно використовувати ті самі частоти для сусідніх стільників, щоб зберегти спектр. Цей розвиток спричиняє високу взаємодію між клітинами [[81](#)]. Окрім них, у мережах також виникають інші перешкоди. Класифікація цих перешкод виглядає наступним чином:

- Перешкоди на сусідньому каналі: Перешкоди на сусідньому каналі є проблемою, яка виникає в багатьох пристроях і в багатьох діапазонах частот. Це відбувається, коли суміжна частота або сусідній канал того, який використовує наш пристрій, перекривається. Ця проблема виникає в 5G, як і в інших мобільних технологіях. Цей тип перешкод в основному викликаний, як зазначено в [[82](#)], недосконалістю фільтрів, коли вони не можуть правильно фільтрувати потрібний сигнал. Ці недоліки призводять до того, що найближчі частоти переходять у смугу пропускання. У свою чергу, це відбувається тому, що підсилювачі не є лінійними.

- Внутрішні та міжстільникові перешкоди: міжстільникові перешкоди є однією з найважливіших причин погіршення продуктивності мережі. Це відбувається, коли два користувачі з сусідніх стільників намагаються використовувати один і той же діапазон частот одночасно. Це відбувається, як зазначено в [[83](#)], через обмеження ресурсів у мережі через фактор повторного використання частоти. Таким же чином, інтерференція між стільниками визначається, коли базова станція підключається безпосередньо в близькому діапазоні іншої BS, і це коли є одночасна передача під час повторного використання. Спотворення з'являється через перешкоди, які створюють користувач та інше обладнання в одній комірці.

- Внутрішньоканальні та міжканальні перешкоди: міжканальні перешкоди зазвичай виникають, коли в мережі макростільника є низька потужність. Далі при спілкуванні інформація передається на найближчу базову станцію. Коли передача здійснюється, вона завершується шляхом швидкого перемикавання та обмежує затримки та втрати при розповсюдженні. Однак це створює внутрішньоканальні перешкоди, які впливають на цінний сигнал. З іншого боку, міжканальні перешкоди виникають через фізичну близькість пристроїв, коли дві окремі смуги частот створюють перешкоди один одному. Оскільки ці пристрої працюють на близькій відстані, передавач сигналу високої потужності створює перешкоди приймачу слабого сигналу. Важливо підкреслити, що мережі 5G IoT або пристрої з каналами в діапазоні МГц чутливі до такого типу перешкод через близькість і кількість пристроїв поблизу. Одним із способів пом'якшити цей тип перешкод є просторова модуляція через MIMO [84].

- Міжсимвольна інтерференція: міжсимвольна інтерференція виникає, коли один або більше символів взаємодіють з іншими символами. Це викликано дисперсією фази або амплітуди в каналі, що призводить до спотворення сигналу. Це можна побачити в OFDMA, де відбувається багатошляхове поширення. Одне дослідження [85] показало, що цей тип перешкод може бути відмінним викликом для мережевих систем і його слід шукати для підвищення ефективності смуги пропускання, одночасно шукаючи альтернативи в модуляції. Це зроблено для того, щоб протидіяти цьому типу втручання.

- Інтерференція між нумерологіями: множинна нумерологія – це модель, яка забезпечує гнучкість для пристроїв у різних службах. Для цих нумерологій використовуються канали 15, 30, 60, 120 і 240 кГц. Вони спрямовані на підвищення продуктивності та значної пропускну здатності. Як зазначено в [86], автори вводять неортогональність у систему, що спричиняє

труднощі для вирівнювання символів у часовій області. При вибірці з однаковою частотою нумерологія має тенденцію вирівнюватись по-різному, що ускладнює синхронізацію в кадрі. Це відоме як інтерференція між нумерологіями.

- **Перехресні перешкоди:** ці перешкоди виникають, коли сигнали передаються сусіднім коміркам у різних напрямках одночасно, або за частотою часу, або за довільним накладанням ресурсів. Як зазначено в [87], існують різні типи перешкод і різні способи їх виникнення. Наприклад, базова станція отримує перешкоди від пристроїв користувачького обладнання в суміжних стільниках, або користувальницьке обладнання низхідної лінії зв'язку отримує перешкоди від другої бази даних.

- **Міжпроменеві перешкоди:** з високим попитом на технологічні послуги метою було покращити спектральну ефективність і продуктивність мережі. У компромісах для таких мереж, як 5G, де якість і пропускна спроможність мають бути високими, було шукано рішення щодо включення багатопроменевої антени, такої як mMIMO, як детально описано в [88]. Цей метод визначає найкращий шлях до забезпечення оптимальної продуктивності для користувача. Такий підхід допомагає компенсувати втрати на ослаблення передачі, особливо при зв'язку міліметрового діапазону. У цьому випадку базова станція генерує кілька вузьких променів переважно радіочастотної енергії в усіх напрямках зони покриття. Це призводить до просторового поділу кількох променів, що створює перешкоди. Сусідні промені викликають перешкоди від тієї самої комірки або сусідньої комірки.

- **Багатокористувацькі перешкоди:** Багатокористувацькі перешкоди викликані галузевими пошуками вищих швидкостей передачі даних у додатках і різким збільшенням кількості абонентів бездротового зв'язку [89]. Методи, які використовуються для цього типу технології, надаються MU-MIMO, технікою покоління 5G, яка допомагає збільшити пропускну здатність і продуктивність

систем бездротового мовлення. Багатокористувацьке втручання виникає, коли кілька користувачів намагаються передати свої інформаційні запити одночасно.

Було досліджено різні класифікації перешкод. Зараз це є частиною сучасного розвитку, щоб зрозуміти перешкоди в 5G. Буде шукатися збагачення перешкод у таких технологіях, як Hetnets, IoT, D2D, Relay Node і New Radio 5G.

- Втручання в Hetnets: Hetnets — це гетерогенні мережі 5G. Вони спрямовані на забезпечення бездротового покриття для абонентів мобільного зв'язку, а також для використання в приміщеннях і на вулиці. Hetnets — це багаторівневі мережеві системи, які розгортають невеликі комірки в населених пунктах. Ці клітини характеризуються малим радіусом дії і низьким енергоспоживанням. Ця мережа містить точки доступу, які забезпечують високу щільність, покращення гнучкості мережі тощо [90]. Завдяки інфраструктурі та місцям для розгортання цього типу мережі вони схильні до різних типів перешкод, таких як внутрішньостійні, міжстільникові та суміжні канали. Цей тип проблеми пов'язаний із поганою систематизацією та організованістю в проекті мережі. Існують типи перешкод у неоднорідних мережах через їх інфраструктуру або групування залежно від потреби, яку потрібно задовольнити. Перша перешкода, яка з'являється, - це перешкода одного рівня. Цей тип перешкод з'являється здебільшого у фемтостільниках, де існує великий попит на вищі швидкості передачі даних. Це середовище дозволяє охоплювати, наприклад точки радіодоступу малої потужності, надавати різні послуги вдома [91]. Цей тип перешкод спостерігається, коли кілька користувачів знаходяться на одному мережевому рівні, де передача відбувається через суміжні комірки в фемтостільнику. Подібно до однорівневих, міжрівневі перешкоди можуть виникати. Різниця полягає в тому, що співрівень – це інтерференція між осередками, а перехресний ярус – це перешкоди між фемтосотою та макростільниками, враховуючи, що фемтосота знаходиться всередині

макросоти [92]. І останнє, але не менш важливе: у [93] перешкоди керування каналом говорять, що одним із найбільш критичних факторів керування каналом є канал індикатора формату фізичного керування. Цей канал передає інформацію про планування та синхронізацію для каналів даних висхідної та низхідної лінії зв'язку. Оскільки транспортування здійснюється фізичним способом, це спричинить перешкоди.

- Перешкоди в D2D: з появою 5G найкращі бездротові системи постійно шукали рішення, яке забезпечує найкращу якість зв'язку. Мережі «пристрій-пристрій» є одним із кандидатів стати майбутнім мереж 5G. Прямий контакт між двома мобільними телефонами підвищує ефективність спектра. Однак це завжди приносить певні труднощі, в даному випадку пов'язані з перешкодами. Як обговорювалося в описі Hetnets вище, вони використовують високу пропускну здатність підключення завдяки своїй структурі з макросотою та фемтосотою. Вони забезпечують хорошу продуктивність [94]. З впровадженням D2D шукається стільникова мережа, яка значно покращує спектральну ефективність і продуктивність. Однак є деякі труднощі, пов'язані з потребою в більшій безпеці, яку створює цей тип технології, і перешкодами. З боку інтерференції вони, здається, пов'язані з інтерференцією між клітинками. Крім того, внутрішньоклітинна частота може бути пов'язана із суміжною частотою. Крім того, ми повинні пам'ятати, що існують типи перешкод, типових для вузлів D2D, перешкоди D2D-CU та перешкоди між вузлами D2D, серед інших.

- Втручання в IoT та розумні міста: коли обговорюємо Інтернет речей, ми не можемо обмежити свою думку лише однією програмою. Однак все, від пристроїв D2D і V2X до розумних будинків або будівель, є його частиною. Концепція IoT з 5G розвивалася у великих і малих екосистемах. IoT у деяких програмах використовується в неліцензованому діапазоні ISM, який використовується для різних фізичних пристроїв, щоб належним чином

використовувати спектр для дотримання умов і правил короткого радіозв'язку. Інтернет речей розглядається як ще один великий стрибок в еволюції Інтернету. З огляду на це, розвиток розумних міст допоможе створити більш сталу та економічно ефективну екосистему [95]. Поєднання таких технологій, як 5G, IoT та інших, дозволить використовувати великі дані, пропонувати комплексні послуги спільноті, додавати учасників у розумних містах і забезпечувати сумісність. Однак слід зазначити, що перешкоди необхідно характеризувати. Говорячи про розумні міста, які використовують Wi-Fi через використання міліметрового діапазону, слід пам'ятати про фізичні перешкоди, такі як стіни, на додаток до перекриття каналів і перешкод між операторами [96].

3.7. Мобільні покоління та IoT.

Еволюція мобільних мереж від 3G до 4G, а тепер до 5G значно вплинула на послуги та пристрої Інтернету речей. Кожне нове покоління забезпечувало більш високу швидкість передачі даних, збільшену пропускну здатність і підвищену надійність, уможливаючи появу нових послуг і програм, які раніше були недоступні на мобільних пристроях. Оскільки мережі 5G набувають все більшого поширення, вони продовжуватимуть відкривати нові можливості для інновацій, змінюючи спосіб взаємодії з нашими пристроями та світом навколо нас.

Таблиця 5 показує вплив кожного мобільного покоління, починаючи з 3G, і пояснює вплив у контексті IoT.

Мобільні покоління та IoT.

Рік	Технології	Вплив на IoT
2000 рік	3G дозволяє пристроям підключатися до Інтернету, оскільки 3G забезпечує мобільне та бездротове підключення до Інтернету.	З підключенням до Інтернету електронні пристрої починають передавати дані через Інтернет, що є першим кроком до розробки пристроїв IoT.
2008 рік	4G забезпечує технологію хмарних обчислень і передачу інформації за допомогою протоколу IP. Крім того, 4G збільшує пропускну здатність кожної передачі.	Передача даних через протокол IP забезпечує простий спосіб зв'язку з електронними пристроями. Хмара дозволяє розробляти доступніші рішення. Крім того, вартість підключення до Інтернету зменшується, оскільки 4G забезпечує дешевий спосіб передачі даних, оскільки IP-протоколи керують даними ефективніше. Це покоління є найважливішим у контексті IoT, оскільки галузь має всі ресурси для підключення пристроїв до хмари.
2019 рік	Важливою особливістю 5G є ширина променя, важлива в контексті IoT.	Якщо ми матимемо більшу пропускну здатність, ми зможемо надати кращі рішення, наприклад системи моніторингу в реальному часі. У нашому суспільстві ці рішення життєво важливі, якщо ми хочемо автоматизувати процеси. З цієї причини 5G відіграє важливу роль у контексті IoT, оскільки галузь намагається автоматизувати всі свої процеси.

З розвитком таких технологій, як 5G, з'явилися нові функції для забезпечення/виконання способів надсилання та отримання даних. IoT продемонстрував більше переваг, допомагаючи з іншими технологіями, такими як машинне навчання, хмарні обчислення та інші. Оскільки дані можна обробляти, кожен пристрій формує ройовий інтелект, який дозволяє автоматизувати роботу й уникає марнування ресурсів у галузі.

Іншим фактором для аналізу є перешкоди з каналами, оскільки наші будинки, офіси та навіть природні місця мають електронні пристрої, які зазвичай використовують діапазон 2,4 ГГц, що спричиняє перешкоди в цьому діапазоні. Таким чином, 5G включає нові діапазони, щоб уникнути перешкод, спричинених цим масовим споживанням 2,4 ГГц. Нам потрібно порівняти

характеристики 3G, 4G і 5G, щоб зрозуміти, чому 5G є важливим ключем у розумних містах. Основні технічні характеристики цих трьох поколінь технологій можна побачити в таблиці 6 .

Таблиця 3.6.

Важливі функції 3G, 4G, 5G

Покоління	3G	4G	5G
Особливість	WCDMA, CDMA2000	OFDMA, MC-CDMA	CDMA, BDMA
Швидкість передачі даних	2 Мбіт/с	2 Мбіт/с – 1 Гбіт/с	1 Гбіт/с і вище
Частота	1,8 – 2,5 ГГц	2 – 8 ГГц	3 – 300 ГГц
Мережа основного типу	Пакетна мережа	Вся IP мережа	IP-мережа та 5G-NI

Таблиця 3.7. представляє очікування щодо використання технології 5G в IoT. Першою згаданою характеристикою є пропускна здатність. Пропускна здатність означає кількість даних, які можна передати через мережу або канал зв'язку за певний проміжок часу. У контексті 5G більша пропускна здатність означає, що більше даних можна передати через радіохвилі за короткий період часу, що може призвести до швидшої та надійнішої передачі 5G. Ще одна особливість, яку виділяють, — це штучний інтелект, який може аналізувати всі дані, створені пристроями IoT, для прийняття точних рішень. Завдяки штучному інтелекту пристрої IoT можуть ідентифікувати закономірності, робити прогнози та вживати заходів на основі зібраних даних. Ця функція є важливою для підтримки додатків Інтернету речей, які вимагають прийняття рішень у реальному часі, таких як розумні міста та інтелектуальні транспортні системи. Третя функція — моніторинг і керування в режимі реального часу, що означає можливість моніторингу та керування електронними пристроями. Ця функція дозволяє централізовано контролювати та керувати пристроями IoT, що може

бути дуже корисним для великомасштабних додатків, таких як промислова автоматизація або управління розумними мережами. Swarm Intelligence є ще однією згаданою функцією, яка означає, що кожен пристрій IoT може бути вузлом і працювати з іншими вузлами для створення swarm інтелекту. Ця функція дозволяє пристроям IoT працювати спільно й ефективно, забезпечуючи кращу продуктивність і надійність у складних програмах. Якість обслуговування (QoS) також вказана як важлива функція, яку 5G може забезпечити в з'єднаннях IoT. Завдяки 5G пристрої IoT можуть мати кращий зв'язок, меншу затримку та вищу пропускну здатність, що може покращити загальну якість обслуговування та продуктивність додатків IoT. У контексті підключень IoT QoS означає здатність мережі забезпечувати надійне та високоефективне підключення до пристроїв IoT. 5G є багатообіцяючою технологією для підключень IoT, оскільки вона може надати кілька функцій, які можуть покращити загальну якість обслуговування та продуктивність додатків IoT. 5G розроблено для забезпечення значно покращеної якості обслуговування порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж. Це досягається завдяки поєднанню передових технологій і функцій, вбудованих у стандарт 5G. Однією з ключових особливостей 5G, яка може сприяти кращому QoS, є використання передових технологій радіодоступу. Ці технології, такі як масивний MIMO та формування променя, дозволяють ефективніше використовувати радіоспектр і покращити якість сигналу. Це означає, що 5G може забезпечити кращий зв'язок і потужність сигналу, що може підвищити надійність і доступність мережі. Ще одна важлива функція 5G, яка може сприяти кращому QoS, — це використання нарізки мережі. Розрізання мережі дозволяє розділити мережу на кілька віртуальних мереж, кожна з яких адаптована до конкретних випадків використання та вимог. Це означає, що різним програмам і службам можна надавати різні рівні пріоритету, пропускну спроможності і вимоги до затримки залежно від їхніх потреб. Це може покращити QoS для кожної окремої програми

та користувача. Крім того, 5G може забезпечити меншу затримку, вищу пропускну здатність і кращу підтримку для масового розгортання IoT, що все може сприяти кращому QoS. Менша затримка означає меншу затримку між передачею даних і їх отриманням, що може забезпечити зв'язок у реальному часі та швидший час відповіді. Вища пропускну здатність означає, що більше даних можна передати через мережу за певний час, що може покращити продуктивність програм, які потребують передачі даних із високою пропускну здатністю. Нарешті, краща підтримка масового розгортання IoT означає, що мережа може обробляти велику кількість підключених пристроїв і трафік даних без шкоди для QoS для окремих пристроїв або програм.

Таблиця 3.7.

Очікування для 5G в IoT.

Особливість	Опис
Пропускна здатність	Більша пропускна здатність для високошвидкісного забезпечення програм.
ШІ	Штучний інтелект може аналізувати всі дані, створені пристроями IoT, щоб приймати точні рішення.
Моніторинг і управління в реальному часі	Можливість віддалено контролювати та керувати електронними пристроями.
Ройовий інтелект	Кожен пристрій IoT може бути вузлом, і, працюючи з іншими вузлами, може працювати як інтелект рою.
QoS	5G може забезпечити кращу якість обслуговування в підключеннях IoT.
Низька затримка	5G зменшує затримки, що означає, що пристрої IoT можуть приймати миттєві рішення.
Хмарні обчислення	5G може забезпечити кращу з'єднаність з хмарою, що означає, що кожен пристрій IoT може використовувати всі ресурси хмари.

Низька затримка — ще одна функція, яку може запропонувати 5G, зменшуючи затримку між передачею та прийомом даних. Ця функція особливо важлива для додатків, які вимагають негайного прийняття рішень, таких як автономні транспортні засоби або дистанційна хірургія. Хмарні обчислення згадуються як функція, яку 5G може надати в з'єднаннях IoT. Завдяки 5G

пристрої IoT можуть підключатися до хмари ефективніше, і кожен пристрій може використовувати всі ресурси хмари, такі як пам'ять і потужність обробки. Ця функція може значно підвищити продуктивність і масштабованість IoT-додатків, особливо тих, які потребують обробки та зберігання великих обсягів даних.

Низька затримка особливо важлива для додатків, які вимагають негайного прийняття рішень, наприклад для автономних транспортних засобів або дистанційної хірургії. За допомогою 5G затримку можна зменшити до однієї мілісекунди, що може забезпечити зв'язок у реальному часі та швидший час відповіді. Крім того, 5G може забезпечити більш високу пропускну здатність, що означає кількість даних, які можна передати через мережу за певний час. Завдяки вищій пропускній здатності пристрої IoT можуть передавати й отримувати більші обсяги даних, що може підвищити продуктивність додатків IoT, які вимагають передачі даних із високою пропусковою здатністю, наприклад потокове відео або дані датчиків у реальному часі. Хмарні обчислення – це ще одна функція, яку 5G може запропонувати для з'єднань IoT. Завдяки 5G пристрої IoT можуть підключатися до хмари ефективніше, і кожен пристрій може використовувати всі ресурси хмари, такі як пам'ять і потужність обробки. Ця функція може значно підвищити продуктивність і масштабованість IoT-додатків, особливо тих, які потребують обробки та зберігання великих обсягів даних.

Оскільки розумні міста використовують пристрої IoT для забезпечення рішень у нашій повсякденній рутині, 5G має важливе значення для надання більш стабільного, масштабованого та точного рішення за допомогою інших технологій, таких як хмарні обчислення, машинне навчання тощо. Іншими словами, 5G є ключовим у розумних містах, оскільки це покоління оптимізує спосіб передачі та отримання даних і виконує спосіб отримання даних. На основі цих даних електронні пристрої можуть приймати точні рішення після

обробки.

Таблиця 3.8. була розділена на частини, у якій перша частина стосується виключно опису та впливу на 5G, а друга частина описує випадки та способи запобігання цим перешкодам.

Таблиця 3.8.

Втручання	Опис	Вплив 5G
Перешкоди сусіднього каналу	Це відбувається, коли частотний канал нашого пристрою перекривається з частотним каналом сусіднього пристрою.	Якщо у нас немає хороших смугових фільтрів, будуть перешкоди від сусідніх частот. У пристроях 5G це може мати значний вплив.
Внутрішньосмугова інтерференція	Перешкоди між осередками виникають, коли два користувачі намагаються одночасно використовувати одну частоту.	Мережа 5G може зазнати змін через використання нових технологій, таких як масивні МІМО та конструктивне масивне завалювання (BF).
Внутрішньосмугові перешкоди між каналами	Внутрішньосмугові перешкоди виникають, коли в одному мікроосередку мало користувачів.	Внутрішньосмугові перешкоди між каналами можуть виникати через близькість пристроїв, що спричиняє перешкоди від одного пристрою до іншого.
Міжосередкова інтерференція	Цей тип інтерференції виникає, коли один або кілька каналів заважають іншим.	Це можна зменшити за допомогою OFDM, яка дозволяє використовувати частотні смуги для зменшення впливу СІ та розширення пропускну здатності.
Втручання між мікроосередками	Вплив при використанні ненормованої системи передачі даних та додаткове використання ресурсів може бути значним.	Це може бути зменшено за допомогою використання нормованих систем передачі даних, що дозволяють ефективніше використовувати ресурси мережі.

Продовження таблиці 3.8.

Тип перешкод	Опис	Вплив
Перекриття каналів	Цей тип перешкод виникає, коли передача здійснюється в сусідню комірку або канал.	Перекриття перешкод можуть впливати на мережі 5G через використання нових технологій, таких як масивні MIMO та конструктивне масивне завалювання (BF). Це може призвести до збою у продуктивності мережі.
Перекресні перешкоди	Цей тип перешкод виникає, коли передача здійснюється в сусідню комірку в різних напрямках одночасно, або мережа довільно перевіряє ресурси, або через частоту часу.	Перекресні перешкоди можуть впливати на мережі 5G через необхідну кількість BS, оскільки неправильне перемикання може призвести до збою в продуктивності.
Мікрохвильова інтерференція [99]	Це відбувається під час використання технології MIMO, оскільки вони намагаються надсилати радіочастотну енергію в усіх напрямках, при цьому просторові розподіли перешкод створюють перешкоди. Сусідні вузли виявляються що це той самий комірка, або сусідня комірка.	Це створює перешкоди в прогалинах, де використовується технологія антен MIMO через те саме використання. У пошуках кращої спектральної ефективності в просторових розподіленнях мережі перешкод в сусідніх комірках або антенах масивів MIMO можуть накладатися на їхніх сусідів.
Втручання кількох користувачів [100]	Це відбувається, коли в MU-MIMO кілька користувачів намагаються передати інформацію одночасно.	З огляду на це, в 5G потрібно продумати розподіл перешкод інформації, при передачі на MU-MIMO неправильні співпадіння стикаються з більш серйозними проблемами під час керування користувачами.
Перешкоди сусіднього каналу	Це відбувається, коли частотні канали пристрою перекриваються.	Якщо у нас немає хороших смугових фільтрів, будь-які перешкоди від сусідніх частот у пристроях 5G це може мати значний вплив.

У таблиці 3.9. наведено огляд різних типів перешкод, які можуть виникати в мережах 5G, і їх потенційний вплив на продуктивність мережі.

Таблиця 3.9.

Перешкоди та їх вплив на мережі 5G

Тип перешкод	Опис	Вплив на мережі 5G (✓ так, X ні)
Сусідній канал	Перекриття частотних каналів	✓
Внутрішньосітні та міжклітинні	Одночасна передача в сусідніх комірках	X
Внутрішньоканальні та міжканальні	Низька потужність в осередку макромережі	✓
Інтер-сивмол	Інтерференція між символами	X
Міжперевізнак	Втрата сигналу через зсув піднесучої	X
Інтернумерологія	Розбіжності в системі нумерології	X
Перехресне зшивання	Перекриття передачі на сусідні стільники	X
Міжпроменева	Перешкоди від сусідніх променів у MIMO	X
Багатокористувацький	Одночасна передача від кількох користувачів	X

3.8. Переваги конвергенції мереж 5G і послуг Інтернету речей

Однією з головних переваг конвергенції мереж 5G і послуг Інтернету речей є можливість підтримувати масовий міжмашинний зв'язок. Інтеграція мереж 5G з пристроями IoT створює безперебійне з'єднання, дозволяючи пристроям спілкуватися один з одним та в Інтернеті на високій швидкості та з низькою затримкою. Це має значні наслідки для таких галузей, як охорона здоров'я, транспорт і виробництво, де великі обсяги даних потрібно передавати в режимі реального часу для ефективної роботи. Наприклад, підключені автомобілі, потяги та літаки можуть спілкуватися один з одним та іншими підключеними пристроями в режимі реального часу, що сприяє підвищенню

безпеки та ефективності.

Іншим впливом конвергенції мереж 5G і послуг IoT є створення нових бізнес-моделей і джерел доходу. Завдяки збільшенню швидкості та потужності мереж 5G постачальники послуг можуть пропонувати нові послуги IoT, такі як розумні будинки, розумні міста та розумні фабрики. Це створює можливість для постачальників послуг розробляти нові бізнес-моделі та джерела доходу, такі як продаж аналітичних даних, надання керованих послуг і пропонування індивідуальних рішень. Наприклад, оператори зв'язку можуть запропонувати підключення до Інтернету речей як послугу, яка надає підприємствам економічно ефективний і масштабований метод для підключення та керування своїми пристроями Інтернету речей.

Однак конвергенція мереж 5G і послуг IoT також створює деякі проблеми, які необхідно вирішити. Одним із викликів є питання безпеки та конфіденційності. Зі збільшенням кількості підключених пристроїв зростає ймовірність кібератак і витоку даних. Таким чином, постачальники послуг і виробники пристроїв повинні працювати разом, щоб переконатися, що пристрої IoT є безпечними та відповідають нормам захисту даних. Крім того, конвергенція мереж 5G і послуг IoT вимагає значних інвестицій в інфраструктуру та технології. Постачальникам послуг необхідно розгорнути величезну кількість базових станцій 5G, щоб забезпечити надійне та послідовне підключення для пристроїв IoT.

Конвергенція мереж 5G і послуг Інтернету речей може революціонізувати спосіб спілкування пристроїв між собою та в Інтернеті. Це має значні наслідки для таких галузей, як охорона здоров'я, транспорт і виробництво, створюючи нові бізнес-моделі та джерела доходу. Однак це також створює проблеми, такі як проблеми безпеки та конфіденційності та необхідність значних інвестицій в інфраструктуру та технології. Таким чином, постачальники послуг і виробники пристроїв повинні працювати разом, щоб вирішити ці проблеми та забезпечити,

щоб конвергенція мереж 5G і послуг Інтернету речей призвела до безпечнішого, ефективнішого та пов'язаного світу.

У таблиці 3.10. обговорюються потенційні позитивні та негативні наслідки інтеграції технологій 5G з рішеннями IoT. Таблиця поділена на три стовпці, включаючи категорію, контекст і пояснення.

Таблиця 3.10.

Пояснення позитивного чи негативного впливу 5G та IoT.

Категорія	Контекст	Пояснення
Позитивні	Оптимізація витрат	Інтеграція технологій 5G з рішеннями IoT дозволить створювати більш економічно ефективні рішення, коли технології 5G досягнуть основного ринку. Оптимізація процесів за допомогою даних, зібраних пристроями, дозволить приймати рішення на основі даних, дозволяючи приватним або державним організаціям приймати дані рішення.
Позитивні	Поліпшення QoS	Надання більшої інформації та контролювання глибини інфраструктури в режимі реального часу, громадяни отримають позитивні впливи завдяки зменшенню трафіку, покращенню безпеки та новим можливостям економічного розвитку, що включають елементи цифровізації.
Позитивні	Зменшення зміни клімату	Маючи більший реальний контроль над промисловими процесами та аналізу в реальному часі щодо відведення еластичності навколишнього середовища, впровадження рішень IoT з технологіями 5G може стати наступним кроком на шляху до того, щоб стати більш екологічно чистим суспільством.
Негативні	Цифрове нерівність	Хоча впровадження 5G та IoT можуть покращити якість життя тих міст, які можуть собі це дозволити, наразі вони не пропонують економічно ефективних рішень для регіонів із менш доступною до технологічних послуг.
Негативні	Порушення конфіденційності	Надмірна інформація в реальному часі про активи, людей і (будь-які) інші незначні організації в регіоні може серйозно загрожувати порушенням конфіденційності. Політики та громадські рухи можуть негативно використовувати розумні дані, пов'язані з громадянами, для виконання будь-яких дій.

Перша категорія, згадана в таблиці, — позитивна, яка включає три різні

контексти. Перший контекст – це оптимізація витрат, яка стосується потенційної економії коштів, пов’язаної з інтеграцією технологій 5G з рішеннями IoT. За допомогою даних, зібраних пристроями, компанії та організації можуть оптимізувати свої процеси, створюючи більш економічно ефективні рішення. Крім того, прийняття рішень на основі даних дозволяє приватним або державним організаціям приймати кращі рішення. Наприклад, місто може використовувати рішення Інтернету речей для оптимізації транспортного потоку, що призводить до зменшення споживання палива та заторів.

Другий контекст, згаданий у категорії «Позитивне», — це покращення якості обслуговування, що стосується потенційного покращення якості життя громадян. Надаючи відповідну інформацію та контролюючи публічну інфраструктуру в реальному часі, міста можуть позитивно впливати на життя громадян. Наприклад, використовуючи рішення IoT, місто може покращити безпеку, відстежуючи громадські місця та надаючи сповіщення в режимі реального часу у разі надзвичайних ситуацій. Крім того, міста можуть створювати нові можливості для економічного розвитку завдяки епісі цифровізації.

Третім контекстом, згаданим у категорії «Позитивний», є зменшення кліматичних змін. Впроваджуючи рішення IoT із технологіями 5G, підприємства можуть мати більш точний контроль над промисловими процесами та аналітикою в реальному часі щодо відповідних властивостей навколишнього середовища. Це може стати наступним кроком у тому, щоб стати більш екологічно чистим суспільством.

Переходячи до категорії «Негатив», у таблиці згадуються два різні контексти. Перший контекст – цифрова невключеність, яка стосується потенційного негативного впливу рішень Інтернету речей на регіони з меншим доступом до технологічних послуг, тоді як зусилля з 5G та Інтернету речей

можуть покращити якість життя тих міст, які можуть собі це дозволити, наразі вони це роблять. не пропонують економічно ефективних рішень для регіонів із меншим доступом до технологічних послуг.

Другий контекст, згаданий у категорії «Негатив», — це порушення конфіденційності. Наявність інформації в реальному часі про активи, людей і будь-які живі чи неживі організми в регіоні може серйозно загрожувати порушенням конфіденційності. Політичні чи громадські рухи можуть негативно використовувати розумні дані, пов'язані з громадянами, для виконання будь-яких дій.

На рис.3.9. показано основні проблеми мереж 5G. Однією з головних проблем мереж 5G, пов'язаних із перешкодами, пристроями IoT та оптимізацією мережі, є високий попит на бездротове підключення та передачу даних. Зі збільшенням кількості пристроїв IoT і експоненціальним зростанням використання даних мережі 5G повинні бути оптимізовані для обробки величезної кількості даних, мінімізуючи перешкоди. Розгортання малих стільників і гетерогенних мереж є однією зі стратегій збільшення пропускної здатності мережі та зменшення перешкод. Однак складність мережевого планування, розгортання та управління зростає з розгортанням невеликих осередків, що вимагає складних методів оптимізації. Крім того, розробка пристроїв 5G IoT з обмеженою потужністю та можливостями обробки також є проблемою. Розробка протоколів бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням і ефективних методів розподілу ресурсів необхідні для оптимізації продуктивності пристроїв IoT у мережах 5G. Проблеми мереж 5G, пов'язані з перешкодами, пристроями IoT та оптимізацією мережі, вимагають передових рішень та інноваційних технологій для забезпечення високоякісного бездротового з'єднання та задоволення вимог зростаючої цифрової екосистеми.

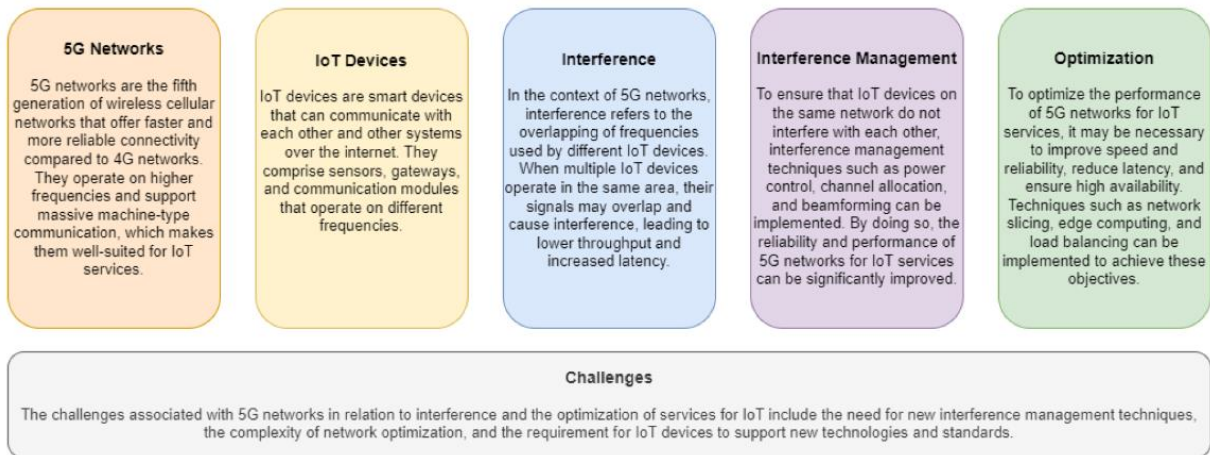


Рис. 3.9. Проблеми мереж 5G.

3.9. Ідеї для зменшення перешкод

Перешкоди можуть мати значний вплив на мережі 5G, особливо в контексті пристроїв Інтернету речей (IoT). Велика кількість пристроїв IoT, які будуть підключені до мереж 5G, неминуче призведе до збільшення перешкод, що може призвести до погіршення продуктивності мережі та поганого досвіду користувача.

Однією з найважливіших реакцій на перешкоди в мережах 5G є використання вдосконалених методів обробки сигналів для пом'якшення впливу перешкод. Наприклад, формування променя та розширені алгоритми приймача можуть допомогти зменшити перешкоди в мережах 5G. Крім того, використання багатоантенних систем і розумних антен може покращити якість прийнятого сигналу та зменшити перешкоди.

Іншою важливою відповіддю є впровадження протоколів керування перешкодами, які дозволяють ефективно використовувати доступні радіоресурси. Ці протоколи можуть допомогти координувати використання різних каналів, зменшити перешкоди між сусідніми комірками та оптимізувати

використання ресурсів спектру.

Наприклад, використання малих стільникових мереж може допомогти зменшити перешкоди шляхом зменшення відстані між передавачем і приймачем. Крім того, використання методів повторного використання частоти, наприклад дробового повторного використання частоти, може допомогти пом'якшити вплив перешкод у багатостільникових мережах.

У таблиці 3.11. узагальнено майбутні виклики досліджень 5G для послуг IoT. Перший пункт «Проблеми» описує основні проблеми, з якими стикаються під час впровадження 5G для послуг IoT. У таблиці визначено п'ять проблем: перешкоди, безпека, енергоефективність, масштабованість і затримка. Пункт «Методології» представляє запропоновані прийоми або методи вирішення виявлених проблем. Наприклад, DSA та Cooperative Sensing пропонуються для вирішення проблеми перешкод. Так само автентифікація та шифрування пропонуються для вирішення проблеми безпеки. У таблиці наведено перелік методів для кожної з виявлених проблем. Пункт «Переваги» описує потенційні переваги використання запропонованих методологій. Наприклад, використання DSA та Cooperative Sensing може призвести до кращого використання спектру та підвищення надійності. Так само використання автентифікації та шифрування може забезпечити безпечний зв'язок і захистити від атак. Пункт «Обмеження/майбутня робота» описує проблеми та обмеження запропонованих методологій і висвітлює області, які потребують подальших досліджень. Наприклад, таблиця підкреслює потребу в розробці ефективних і масштабованих DSA та алгоритмів кооперативного зондування для вирішення проблеми перешкод. Подібним чином розробка легких та енергоефективних механізмів безпеки визначається як майбутня робота з вирішення проблеми безпеки.

Таблиця 3.11.

Виклики майбутніх досліджень 5G для послуг IoT.

Питання	Методики	Переваги	Обмеження/Майбутня робота
Втручання	Динамічний доступ до спектру, кооперативне використання	Краще використання спектру, підвищена надійність	Розробка ефективних масштабованих алгоритмів DSA (Dynamic Spectrum Access) і кооперативних алгоритмів
Безпека	Аутентифікація, шифрування	Безпечний зв'язок, захист від атак	Розробка легких та енергоефективних механізмів безпеки
Енергоефективність	Управління живленням, розподіл ресурсів	Довший термін служби акумулятора, покращена синхронізація системи	Розробка енергоефективних алгоритмів розподілу ресурсів та керування живленням
Масштабованість	Нарізка мережі, віртуалізація	Краще використання ресурсів, покращена якість обслуговування	Розробка ефективних методів нарізки мережі та віртуалізації для масового розгортання IoT
Затримка	Граничні обчислення, мережева архітектура	Зменшена затримка зв'язку, покращена продуктивність програм	Розробка граничних обчислень із низькою затримкою та мережевої архітектури для послуг IoT

Таблиця 3.12. містить кілька типів перешкод, які впливають на мережі 5G і послуги IoT. До них належать атмосферне поглинання, втрати на шляху вільного простору, відбиття, заломлення, дифракція, розсіювання, завмирання дощу, багатопроменеве завмирання, перешкоди в одному каналі, перешкоди в сусідньому каналі та перешкоди від інших радіостанцій та пристроїв Інтернету речей. У таблиці наведено технічні відомості про частотний діапазон, смугу пропускання, рівень потужності та вплив кожного типу перешкод.

Таблиця 3.12.

Характеристики перешкод у мережах 5G та сервісах IoT.

Втручання	Частота	Пропускна здатність	Потужність	Вплив
Атмосферне поглинання	24-40 ГГц	Вузькосмуговий	Низький	Затухання
Втрата шляху вільного простору	всі	всі	Низький	Затухання
Рефлексія	всі	всі	Низький	Багатопроменеве завмирання
Рефракція	всі	всі	Низький	Вигин шляху
Дифракція	всі	всі	Низький	Вигин шляху
Розсіювання	всі	всі	Низький	Багатопроменеве завмирання
Затухання дощу	10-100 ГГц	Широкосмуговий	Високий	Затухання
Багатопроменеве завмирання	всі	всі	Низький	Міжсимвольна інтерференція
Перешкоди на сумісному каналі	всі	всі	Високий	Зниження якості сигналу
Перешкоди сусіднього каналу	всі	всі	Високий	Зниження якості сигналу
Перешкоди від інших радіостанцій	всі	всі	Високий	Зниження якості сигналу
Перешкоди від інших пристроїв IoT	всі	всі	Низький	Зниження якості сигналу

- Перешкоди: тип перешкод, які впливають на мережі 5G і послуги IoT.
- Частота: діапазон частот, у якому виникають перешкоди.
- Смуга пропускання: смуга пропускання перешкод.
- Потужність: рівень потужності перешкод.
- Вплив: вплив перешкод на мережі 5G і послуги IoT.

3.10. Запропонована архітектура 5G IoT

Інтернет речей (ІоТ) – це нова та перспективна технологія, яка має потенціал революціонізувати глобальний світ за допомогою підключених фізичних об'єктів. У 2020 році було понад 1,6 мільярда стільникових підключень ІоТ, а в нещодавньому дослідженні Ericsson прогнозує, що до 2026 року їх буде близько 5,4 мільярда [92]. Дослідження показують, що переважна більшість цих пристроїв буде підключена за допомогою стільникових технологій, таких як 4G і 5G, які в даний час використовуються для ІоТ, але не повністю оптимізовані для додатків ІоТ. Таким чином, наступне покоління стільникових мереж має задовольнити зростаючі вимоги до трафіку таких майбутніх додатків і галузевих вертикалей. Мобільна мережа п'ятого покоління (5G), зокрема, спрямована на подолання обмежень попередніх стандартів стільникового зв'язку і стане ключовим фактором для майбутнього ІоТ. Однак розроблені досі системи 5G не змогли повністю задовольнити потреби додатків ІоТ, такі як одночасне досягнення високої надійності, низької затримки та високої швидкості передачі даних.

3GPP (3rd Generation Partnership Project) визначає три різні класи послуг: наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC), покращений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB) і масовий зв'язок машинного типу (mMTC). Таким чином, випадки використання 5G-ІоТ можна класифікувати на три категорії: критичний ІоТ, широкосмуговий ІоТ та масовий ІоТ. Критичний ІоТ вимагає високої надійності та дуже низької затримки та включає такі програми, як промислова автоматизація (Industry 4.0), тактильний Інтернет, медична діагностика, роботизована хірургія тощо. Широкосмуговий ІоТ вимагає високої пропускної здатності та ємності, і прикладами таких додатків є потокове відео AR/VR, Ultra High Definition (UHD) та ін. Масивний ІоТ потребує масштабованості та включає такі програми, як розумні міста, віддалений моніторинг тощо. Крім того, ІоТ вимагає високої масштабованості та підключення до Інтернету для широкого спектру додатків. Мережі 5G мають

першорядне значення для реалізації потреб майбутнього IoT. Це дозволяє нам використовувати його атрибути, такі як висока пропускна здатність, низька затримка, висока надійність і масивне підключення, які є критично важливими для IoT.

5G New Radio (NR) [93] — це новий повітряний інтерфейс, розроблений 3GPP і працює в двох частотних діапазонах: FR1 (нижче 6 ГГц) і FR2 (вище 24 ГГц). Велика швидкість передачі даних може бути забезпечена великою кількістю спектру в діапазонах mmWave разом з масивним MIMO. З іншого боку, використовуючи частоту нижче 6 ГГц, 5G може забезпечити більш широке покриття та розширити можливості підключення пристроїв IoT для різних сценаріїв мобільності. 5G може підтримувати велику кількість з'єднань IoT з більш високою швидкістю передачі даних і кращим покриттям [94]. Крім того, пристрої IoT часто обмежені в ресурсах з низькими обчислювальними та енергетичними можливостями. Щоб задовольнити ці вимоги, ми розробляємо архітектуру 5G-IoT, у якій NR вдосконалено, щоб діяти як шлюз IoT, який керує потоком даних між пристроями IoT і базовою станцією 5G. Використання кінцевого пристрою як шлюзу IoT покращує мобільність і покриття мережі. До базової станції можна підключити кілька шлюзів кінцевого пристрою/IoT, щоб максимізувати переваги мереж 5G. Крім того, кілька пристроїв IoT можна підключити до шлюзу IoT через дротові канали Ethernet, щоб забезпечити вищу надійність і безпеку з низькою затримкою. У цій роботі ми впроваджуємо та оцінюємо продуктивність такої масштабованої системи 5G-IoT, яка забезпечує високу пропускну здатність разом із високою надійністю та низькою затримкою. Ми вивчаємо продуктивність такої системи за допомогою Simu5G [95], що представляє собою бібліотеку моделювання 5G на основі фреймворку OMNeT++ [5]. Використовуючи Simu5G, ми моделюємо площину даних наскрізної автономної мережі 5G, яка передає пакети між віддаленим сервером через функцію користувачької площини (UPF) у ядрі 5G та кінцевого пристрою,

підключеним до gNodeB. Пропускна здатність, затримка та втрата пакетів використовувалися як метрики для оцінки продуктивності системи. Також для цих мереж було досліджено вплив масштабованості, мобільності, нумерології тощо.

Основні внески цієї статті підсумовуються наступним чином:

- Ми пропонуємо нову архітектуру для системи 5G-IoT з використанням симулятора мережі Simu5G.
- Ми систематично оцінюємо і вносимо поліпшення в архітектуру, що покращує продуктивність системи.
- Нарешті, ми перевіряємо запропоновану архітектуру та досягаємо значних покращень для випадків використання IoT з підтримкою 5G за допомогою реалістичних, масштабованих додатків і критично важливих сценаріїв.

3.10.1 Пов'язані роботи

Архітектура IoT в системі 5G показана на рисунку 3.10. У [96], [97], автори обговорюють архітектуру 5G IoT, де розумні датчики IoT для різних додатків можуть бути підключені до шлюзу IoT через різні дротові та бездротові мережі. Завдання цього шлюзу полягає в зборі та пересиланні всієї інформації між пристроями IoT і базовими станціями 5G через бездротовий зв'язок. Канали зв'язку 5G надають такі необхідні можливості URLLC та eMBB для системи IoT завдяки використанню технології 5G NR з ефективним нумерологічним підбором та технологією зв'язку mmWave [98]. Тим не менш, мобільність мережі, покриття та досяжність залишаються відкритими областями досліджень, які необхідно вирішити для повсюдного спілкування. Крім того, як обговорюють автори в [99], стандарти 5G все ще розвиваються для вирішення проблем, пов'язаних з масштабованістю, затримкою та надійністю. У [100] автори обговорюють, що досягнення жорстких вимог до продуктивності для

різноманітних додатків IoT є основною проблемою, яку потрібно вирішити. Таким чином, існує критична потреба у вивченні та розвитку систем, що забезпечують ці можливості. Враховуючи широкий спектр послуг і продуктивність, пропоновану мережами 5G, надзвичайно важливо, щоб будь-яка розробка та вивчення системи 5G проводилася на платформі, яка пропонує можливості наскрізного моделювання. Побудова реальної стільникової мережі для тестування часто пов'язана зі складнощами інфраструктури. Програма Platforms for Advanced Wireless Research (PAWR) допомогла створити один такий бездротовий випробувальний стенд в Університеті Юти в Солт-Лейк-Сіті під назвою POWDER [101], який пропонує віддалено доступну наскрізну програмно-визначену платформу для проведення таких досліджень. Однак симулятори дискретних подій мережі пропонують кращу та масштабовану альтернативу для аналізу складних мереж та розробки нових протоколів. Ми розробляємо архітектуру 5G-IoT шляхом розширення функціональності симулятора Simu5G, який надає бібліотеку моделей моделювання 5G, сумісну з 3GPP на основі фреймворку OMNeT++. Такі наскрізні мережеві симулятори чудово підходять для аналізу продуктивності систем 5G, оскільки вони дозволяють проводити повноцінне моделювання з використанням моделей для кожного рівня стека протоколів, мережевого обладнання, а також логіки програми. Ця здатність моделювати весь мережевий стек відіграє вирішальну роль у розумінні багатьох нових функцій мереж 5G. Поряд з OMNeT++, іншим широко використовуваним фреймворком мережевого моделювання є ns-3 [102], який дозволяє користувачам розробляти власні бібліотеки моделей. Крім Simu5G, який базується на фреймворку OMNeT++, інші популярні інструменти наскрізного моделювання для мереж 5G базуються на ns-3. Бібліотека моделей 5G-LENA [103] використовує фреймворк ns-3 і побудована на бібліотеці 4G LTE LENA (LTE-EPC Network Simulator) [104]. Однак бібліотека 5G-LENA в основному зосереджена на реалізації рівнів MAC і PHY мережевого стека 5G.

Модуль ns-3 mmWave [105] був розроблений до того, як стандарти 3GPP 5G були остаточно затверджені, і тому не повністю відповідає чинним стандартам. Крім того, модулі 5G-LENA та mmWave підтримують лише режим дуплексування з часовим поділом (TDD). Таким чином, у своїй роботі ми розробляємо нову архітектуру 5G-IoT з використанням Simu5G, яка є 3GPP-сумісним мережевим симулятором.

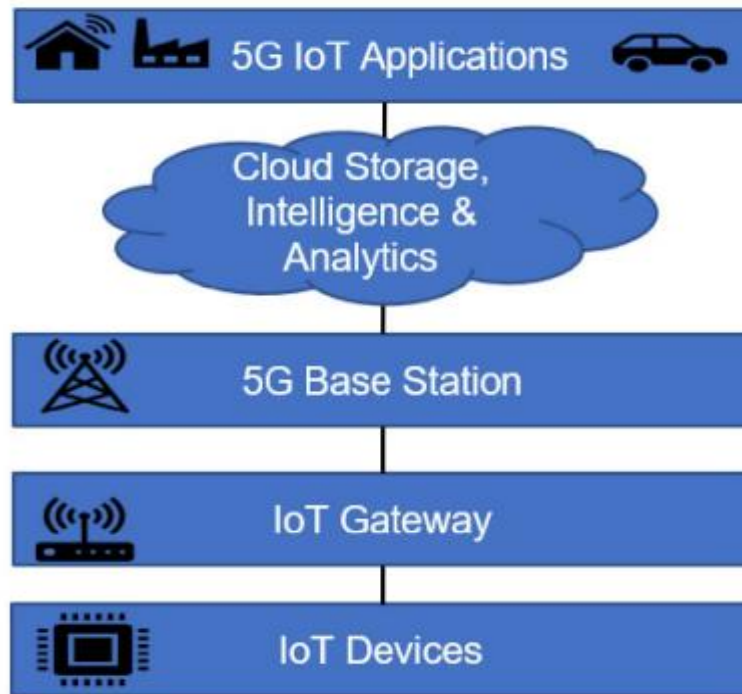


Рис.3.10. Архітектура 5G IoT

3.10.2 Архітектура та середовище моделювання 5G-IoT

У цьому розділі коротко обговорюється фреймворк OMNeT++ і модель Simu5G, яку можна використовувати для моделювання користувацької площини 5G New Radio (NR). Ми також обговорюємо специфіку запропонованої архітектури для підтримки експериментів IoT в системі 5G. Simu5G побудований на широко використовуваному фреймворку моделювання дискретних подій під назвою OMNeT++, який можна використовувати для моделювання як дротових, так і бездротових мереж. Модулі є основними

будівельними блоками в фреймворку OMNeT++ і можуть бути простими модулями, або їх можна комбінувати для створення більш складних складних модулів.

Модулі використовують повідомлення для зв'язку один з одним, а прості модулі запрограмовані на демонстрацію певної поведінки при отриманні цих повідомлень. Ця поведінка моделі написана та запрограмована на мові C++. OMNeT++ використовує NED або мову опису мережі для визначення модулів, їх вентилів і з'єднань. Значення параметрів, необхідних для ініціалізації моделі, визначаються у файлі ініціалізації (INI). Він також надає інтегроване середовище розробки Eclipsebased (IDE) для полегшення редагування та налагодження. Simu5G використовує популярну бібліотеку моделей INET у OMNeT++, яка реалізує моделі для різних протоколів зв'язку, мережевих вузлів, з'єднань тощо. Таким чином, використовуючи можливості бібліотек OMNeT++, INET і Simu5G, можна моделювати складні наскрізні сценарії з використанням різних мереж із системами 5G. На малюнку 3.11. показана архітектура 5G-IoT з використанням Simu5G.

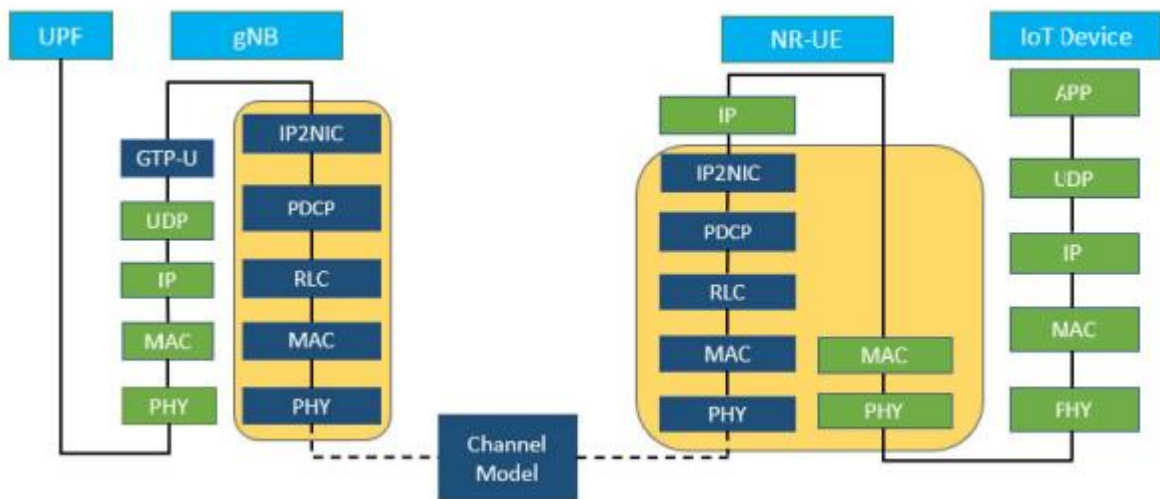


Рис.3.11. Архітектура 5G-IoT з використанням Simu5G

Можливості NR 5G RAN у Simu5G моделюються у двох основних складних модулях: NrUe та gNodeB. Функціональні можливості RAN реалізовані у вигляді стека з чотирьох протокольних рівнів, які є рівнем протоколу конвергенції пакетних даних (PDCP), рівнем керування радіоканалом зв'язку (RLC), рівнем контролю доступу до медіа (MAC) і фізичним рівнем (PHY). Таким чином, модулі NrUe і gNodeB складаються з чотирьох підмодулів (NrPdcп, NrRlc, NrMac, NrPhy), кожен з яких представляє рівень в стеку протоколів. Вони також складаються з підмодуля Ip2Nіc, який може виступати в якості моста між рівнем IP і рівнем PDCP. П'ять підмодулів, об'єднаних разом, утворюють складний модуль під назвою NrNіc, що представляє інтерфейс радіомережі. Модуль NrUe також реалізує верхні рівні (рівні UDP та IP) стека протоколів за допомогою бібліотеки INET. Модуль carrierAggregation в Simu5G може використовуватися для імітації зв'язку на декількох несучих компонентних частотах. Ми можемо змінювати ключові параметри, такі як несучі частоти, пропускну здатність, кількість блоків ресурсів тощо, використовуючи NED та INI-файли. Використовуючи цей модуль, ми також можемо регулювати нумерологію, яка змінює відстань між субнесучими та тривалість слоту сигналів 5G, що має вирішальне значення для ввімкнення сервісів URLLC та eMBB. В рамках реалізації ядра 5G Simu5G надає модуль UPF, який відповідає за маршрутизацію IP-пакетів між мережею передачі даних і gNodeB через тунелі GTP (GPRS Tunnelling Protocol). Модуль UPF може бути безпосередньо підключений до gNodeB, що призводить до сценарію розгортання автономної архітектури. Архітектура 5G-IoT, як показано на малюнку 3.10., складається з мобільного шлюзу IoT, який можна використовувати для підключення базової станції 5G до кінцевих пристроїв IoT, які часто мають дуже обмежені можливості. Ці шлюзи також можуть виконувати агрегацію даних на пакетах, що надходять від різних датчиків, виконавчих механізмів тощо в мережі IoT [8]. Радіофункції шлюзу IoT дуже

нагадують функції модуля UE в системі 5G. Однак шлюз несе додаткову відповідальність за пересилання пакетів на пристрої IoT, які до нього підключені, і з них. Як було сказано вище, реалізація модуля NrUe в бібліотеці Simu5G включає в себе тільки радіоінтерфейси і не має додаткових мережевих інтерфейсів для підключення до IoT-пристроїв в мережі. Таким чином, модуль NrUe був розширений, а дротові мережеві інтерфейси були додані паралельно існуючому радіоінтерфейсу. Ми також представляємо новий комбінований модуль для представлення пристроїв IoT, підключених до шлюзу IoT. Цей новий модуль емулює стек протоколів стандартного хост-модуля в INET. Він також включає новий підмодуль, який відповідає за асоціацію з gNodeB та реєстрацію його IP-адреси в системі. Наша реалізація здатна обробляти кілька шлюзів IoT з кількома пристроями IoT, підключеними через канали Ethernet, для масштабованості та продуктивності мережі. Стандартна реалізація Simu5G використовує адресу призначення UE на UPF для виявлення підключеного gNodeB у напрямку низхідного каналу. Потім UPF використовує цю адресу gNodeB як ідентифікатор кінцевої точки тунелю (TE-ID) для створення тунелю GTP-U. Однак у сценарії IoT кінцеві пристрої є пристроями IoT які не мають прямого зв'язку з gNodeB, як показано на рисунку 3.12. Таким чином, система вдосконалюється так, що кожен пристрій IoT у системі має асоційований gNodeB, залежно від шлюзу/UE IoT, до якого він підключений. UPF тепер може знати, який пристрій IoT підключено до якого шлюзу IoT і, отже, до якого gNodeB. Крім того, gNodeB використовує інформацію про свої підключені шлюзи IoT/UE для планування на рівні MAC, але не має інформації про пристрої IoT. Таким чином, система розвивається далі, так що gNodeB тепер може знати, який пристрій IoT підключений до якого шлюзу IoT, і може використовувати цю інформацію для планування. Ми також вмикаємо переадресацію IP-рівня на шлюзі IoT, щоб пакети спрямовувалися на правильний пристрій IoT.

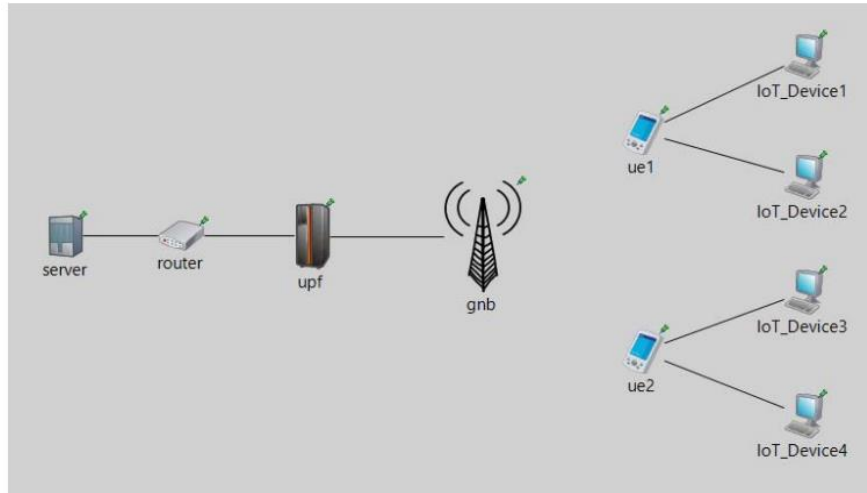


Рис.3.12. Приклад сценарію симуляції Simu5G із двома шлюзами IoT, кожен із яких підключено до двох пристроїв IoT

3.10.3. Оцінка

Систематична оцінка системи 5G-IoT була проведена для критично важливих додатків типу IoT, масового IoT та широкосмугового IoT. Ми моделюємо автономну архітектуру 5G, де gNodeB підключений до UPF в основній мережі 5G. Сервер підключається до UPF через маршрутизатор і надсилає пакети даних на пристрої IoT у нашій системі, використовуючи їхні IP-адреси. Пристрої IoT підключаються до системи 5G через шлюз IoT. Для оцінки системи були вибрані такі параметри, як частота, пропускна здатність, розмір пакета, інтервал прибуття пакетів, кількість IoT-пристроїв в системі, кількість кінцевих пристроїв і нумерологічний індекс. Розглядаються як стаціонарні, так і мобільні системи IoT, де шлюзи/UE IoT разом із підключеними пристроями IoT рухаються з однаковою швидкістю. Кінцевий пристрій розташований за координатами (500 м, 350 м) для стаціонарних варіантів використання, а координати для gNodeB становлять (450 м, 300 м).

Додаткові параметри моделювання наведено в розділах нижче:

А. Критичний IoT Система була оцінена для критичних типів додатків IoT. Затримка та втрата пакетів використовувалися як метрики для оцінки продуктивності системи. Експерименти проводилися як для стаціонарних, так і для пересувних кінцевих пристроїв. Для мобільного сценарію кінцевий пристрій рухається вздовж осі x з початковими та Кінцеві координати (500 м, 350 м) і (1000 м, 350 м) відповідно.

Таблиця 3.13.

Параметри моделювання для критичних і масових випадків використання IoT

Параметр	Значення
Несуча частота	2 GHz
Пропускна здатність	0.5 MHz
Розмір пакета UDP	32 B
Час прибуття пакета UDP	1 ms

Результати експериментів показали, що запропонована система 5G досягла надвисокої надійності та дуже низьких затримок для різних нумерологій, як показано в таблиці 3.14. Нумерологічними значеннями були обрані 0, 1, 2 і 3, що відповідають інтервалам між піднесучими 15 кГц, 30 кГц, 60 кГц і 120 кГц відповідно. Система здатна реалізувати субмілісекундну затримку 0,68 мс для нумерологічного значення 3. Висока надійність з нульовими втратами пакетів і низькими затримками спостерігається для всіх нумерологій. Крім того, латентність і надійність поліпшуються зі збільшенням нумерології. Латентність значно збільшується на 93,50 % для нумерологічного значення 3 порівняно з нумерологічним значенням 0. Показано, що система

може впоратися з жорсткими вимогами до URLLC, яка потребує надійності 10^{-5} з точки зору швидкості втрати пакетів для 32-байтового пакета з затримкою в площині користувача 1 мс.

Таблиця 3.14.

Затримка та втрата пакетів для різних нумерологій з 10 стаціонарними кінцевими пристроями

Нумерологія	Затримка (ms)	Втрата пакетів (Співвідношення)
0	10.46	0
1	3.40	0
2	1.45	0
3	0.68	0

Система також оцінюється для сценаріїв мобільності для нумерологічного значення 3 зі швидкостями UE на рівні 5 м/с, 10 м/с, 15 м/с і 20 м/с, як представлено в таблиці 3.15. У міру збільшення швидкості спостерігається незначне збільшення затримки. Система добре працює для всіх сценаріїв мобільності, і спостерігається нульова втрата пакетів при дуже низьких затримках.

Таблиця 3.15.

Затримка та втрата пакетів з різною швидкістю з 10 кінцевими пристроями для нумерологічного значення 3

Швидкість (m/s)	Затримка (ms)	Втрата пакетів (Співвідношення)
5	0.6987	0
10	0.7028	0

15	0.7029	0
20	0.7042	0

В. Масовий IoT Система також була оцінена для масового типу додатків IoT. Затримка та втрата пакетів використовувалися як метрики для оцінки продуктивності системи. Параметри моделювання наведені в таблиці 3.16. Проводились експерименти шляхом зміни кількості шлюзів/кінцевих пристроїв IoT та пристроїв IoT до 50 у системі 5G для нумерологічного значення 3. Тут до кожного шлюзу IoT підключено один пристрій IoT. Як показано в таблиці, для мережі спостерігається нульова втрата пакетів при дуже низьких затримках. Латентність збільшується зі збільшенням числа кінцевих пристроїв, але все ще залишається нижче 2,3 мс для до 50 кінцевих пристроїв.

Таблиця 3.16.

Латентність і втрата пакетів з різною кількістю кінцевих пристроїв для нумерологічного значення 3

Кількість кінцевих пристроїв	Затримка (ms)	Втрата пакетів (Співвідношення)
10	0.68	0
20	0.88	0
30	1.22	0
40	1.69	0
50	2.29	0

Крім того, система також була оцінена для сценаріїв із кількома пристроями IoT, підключеними до кількох шлюзів IoT, для нумерологічного значення 3. Було протестовано два сценарії, перший із одним шлюзом IoT, а другий із двома шлюзами IoT. В обох випадках кількість пристроїв IoT, підключених до шлюзів, була варіювана до 20 для вимірювання середньої

затримки системи.

Спостерігається висока надійність з нульовою втратою пакетів і дуже низькими затримками, як показано на малюнку 3.13. Затримка збільшується зі збільшенням кількості пристроїв IoT, але все ще залишається нижчою за 2,7 мс для сценарію одного шлюзу IoT і нижче 3,8 мс для сценарію двох шлюзів IoT. Крім того, для будь-якої кількості пристроїв IoT система з одним шлюзом IoT давала нижчі затримки, ніж система з двома шлюзами IoT. Таким чином, система добре працює з масштабованістю і досягає високої надійності з нульовою втратою пакетів і дуже низькими затримками.

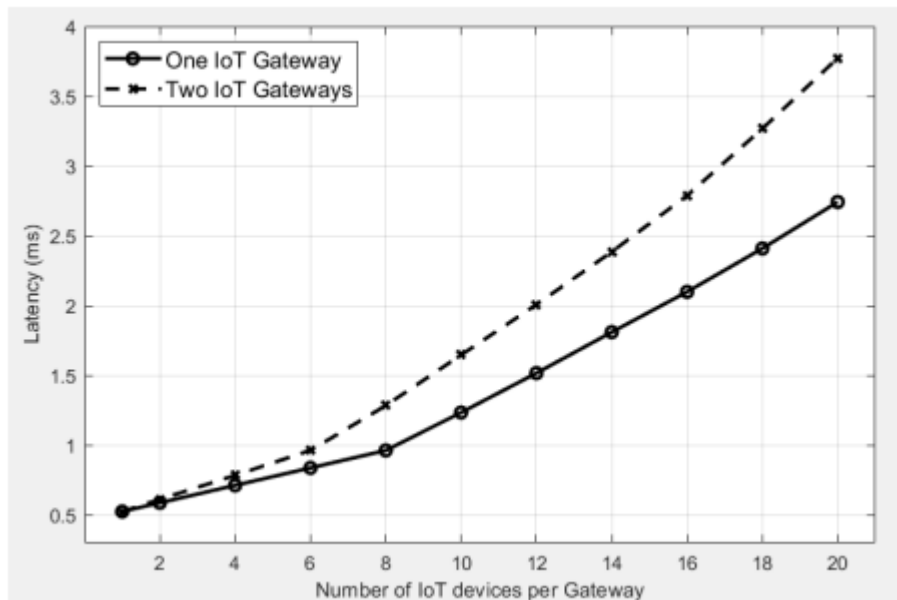


Рис.3.13. Затримка з різною кількістю пристроїв IoT, підключених до одного та двох шлюзів IoT, для нумерологічного значення 3

С. Широкопasmовий IoT Продуктивність системи 5G-IoT також була оцінена для додатків типу широкопasmового IoT. Для цих експериментів враховувалися великі розміри пакетів і низький час між прибуттями пакетів.

Пропускна здатність, затримка та втрата пакетів використовувалися як метрики для оцінки продуктивності системи. Параметри моделювання наведені в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17.

Параметри моделювання для випадків використання штроскосмугового інтернету речей

Параметр	Значення
Несуча частота	28 GHz
Пропускна здатність	100 MHz
Розмір пакета UDP	4096 B
Час прибуття пакета UDP	0.05 ms, 0.03 ms

Система вперше була оцінена для різних нумерологічних значень зі стаціонарним кінцевим пристроєм і часом міжприбуття пакета 0,05 мс. Помічено, що система здатна досягати високої пропускну здатності до 657,11 Мбіт / с з затримкою 0,58 мс і нульовою втратою пакетів, як показано в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18.

Пропускна здатність, затримка та втрати пакетів для різних нумерологій зі стаціонарним кінцевим пристроєм для пакетів часового інтервалу 0,05 мс

Нумерологія	Пропускна здатність (Mbps)	Затримка (ms)	Втрата пакетів (Співвідношення)
0	643.87	4.56	0

1	650.92	2.30	0
2	654.89	1.16	0
3	657.11	0.58	0

Латентність значно збільшується на 87,28 % для нумерологічного значення 3 порівняно з нумерологічним значенням 0. Це дозволяє йому відповідати вимогам до додатків eMBB, які вимагають швидкості передачі даних користувача 100 Мбіт/с із затримкою в площині користувача 4 мс. Крім того, помічено, що збільшення нумерологічного значення покращує продуктивність системи. Моделювання також було проведено для стаціонарного кінцевого пристрою з часом міжприбуття пакета 0,03 мс для різних нумерологічних значень. Як показано в таблиці 20, система здатна досягати дуже високої пропускної здатності 1036,39 Мбіт / с при затримці 16,1 мс і втрати пакетів 0,01 при нумерологічному значенні 0. Зменшення часу міжприбуття пакетів призводить до підвищення пропускної здатності системи, оскільки тепер через систему може проходити більше даних. У міру збільшення нумерологічного значення до 3 спостерігається подальше поліпшення пропускної здатності, затримки та втрати пакетів. Пропускна здатність збільшується до 1095,02 Мбіт/с із затримкою 0,59 мс і нульовою втратою пакетів при нумерологічному значенні 3. Латентність значно зменшується на 96,34 % порівняно з нумерологічним значенням 0. Таким чином, система здатна відповідати жорстким вимогам надвисоких швидкостей з надвисокою надійністю та дуже низькою затримкою.

Таблиця 3.19.

Пропускна здатність, затримка та втрати пакетів для різних нумерологій зі стаціонарним кінцевим пристроєм для пакетів з інтервалом часу 0,03мс

Нумерологія	Пропускна здатність (Mbps)	Затримка (ms)	Втрата пакетів (Співвідно)
-------------	----------------------------	---------------	----------------------------

			шення)
0	1036.3	16.1	0,01
	9		
1	1084.6	2.30	0,0002
	8		
2	1091.3	1.16	0,00006
	6		
3	1095.0	0.59	0
	2		

Розроблена система 5G-IoT добре зарекомендувала себе для масштабованих типів додатків URLLC, eMBB і mMTC. Система досягла високої пропускної здатності та надійності з дуже низькою затримкою для всіх трьох випадків використання IoT. Таким чином, запропонована система 5G-IoT значно покращує продуктивність мереж IoT наступного покоління і демонструє великий потенціал для досягнення високої пропускної здатності і наднадійного зв'язку з низькою затримкою, які мають вирішальне значення для нових додатків IoT.

Висновки:

У магістерській дисертації представляємо та оцінюємо нову архітектуру 5G-IoT для масштабованого, високої пропускної здатності та наднадійного зв'язку з низькою затримкою в мережах IoT наступного покоління за допомогою симулятора мережі Simu5G, який, наскільки нам відомо, не розглядався в жодній попередній роботі. Запропонована архітектура 5G-IoT добре працює для всіх трьох типів використання 5G-IoT: критичного, масивного та широкосмугового, і може забезпечити інтелектуальні системи наступного покоління. Було показано, що архітектура значно збільшує пропускну здатність і надійність системи при одночасному зменшенні затримки. Наша робота

зосереджена на розробці нових реальних рішень для вирішення проблем, пов'язаних із побудовою масштабованих стільникових мереж IoT наступного покоління. У майбутньому ми плануємо й надалі розвивати нашу систему, використовуючи мережі 5G і не тільки, щоб забезпечити розгортання послуг наступного покоління у великих масштабах міста.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

У цьому розділі ми прагнемо створити інноваційне бачення та провести маркетинговий аналіз перспективних напрямків і досягнень, які можуть бути реалізовані за допомогою технології 5G для підвищення ефективності комунікацій між пристроями Інтернету речей (IoT). Крім того, ми розглядаємо можливість комерціалізації ключових науково-технічних розробок, описаних у попередніх розділах магістерської дисертації, через розробку концепції стартап-проєкту у сфері 5G та IoT в умовах динамічного і висококонкурентного ринкового середовища, обумовленого глобалізаційними процесами.

4.1. Опис ідеї проєкту впровадження 5G для підвищення ефективності комунікації між пристроями Інтернету речей

Я пропоную інноваційний метод для підвищення ефективності комунікацій у смарт-середовищах, використовуючи можливості технологій 5G та Інтернету речей (IoT), які вже впроваджені або плануються до використання. Мій проєкт спрямований на розширення можливостей взаємодії між IoT-пристроями шляхом використання ключових характеристик 5G: високої пропускної здатності, мінімальної затримки та масштабованості. Це відкриває нові можливості для створення надійних, швидких і безпечних систем обміну даними між пристроями, які можуть використовуватися в таких галузях, як розумні міста, медицина, транспорт і промисловість.

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
<p>Розробка методів і платформ для оптимізації взаємодії між пристроями IoT у 5G мережах. Впровадження технологій масової комунікації між машинами (mMTC) та наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC) для критичних систем, таких як автономний транспорт, розумні міста та промислові автоматизовані процеси.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Промислові IoT системи: Використання 5G для безперервної передачі даних між датчиками і машинами на заводах, що покращить продуктивність і точність управління. 2. Автономний транспорт: Підключення транспортних засобів через 5G для забезпечення швидкої реакції в умовах реального часу та підвищення безпеки на дорогах. 3. Розумні міста: Підключення інфраструктурних елементів, таких як вуличне освітлення, камери відеоспостереження та енергомережі для зменшення енерговитрат і підвищення ефективності управління містом. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оптимізація витрат: Компанії, що розгортають та обслуговують IoT-сервіси, зможуть зменшити неефективні витрати на управління інфраструктурою, завдяки автоматизації процесів і підвищенню надійності з'єднань. 2. Зменшення затримок: Завдяки URLLC технологіям користувачі отримують мінімальну затримку в обміні даними, що особливо важливо для критичних додатків. 3. Підвищення безпеки: Системи на базі 5G знижують ризик атак на IoT-пристрої за рахунок надійних протоколів безпеки, що підвищує рівень довіри клієнтів.

Безліч досліджень зосереджується на потенціалі 5G мереж у підвищенні ефективності комунікації між пристроями Інтернету речей (IoT). Впровадження 5G технологій обіцяє значне покращення швидкості передачі даних, зниження затримки та збільшення пропускну здатності, що робить можливим об'єднання величезної кількості пристроїв IoT у масштабній мережі.

Особливу увагу приділяється алгоритмам, які здатні підвищити надійність і безпеку комунікацій. Зокрема, використання аутентифікації з РКІ (інфраструктурою відкритих ключів) у комунікаційних протоколах дозволяє

зменшити кількість атак та підвищити цінність кожного захопленого пакету даних. Це забезпечує значну перевагу у порівнянні з конкурентами, які не впровадили подібні заходи безпеки.

Таблиця 4.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні особливості ідеї	(Можливі) продукти/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	ЛІН+НІН приманки	Аутифікація РКІ			
1	Використання тільки власного обладнання	ні	ні	так			так
2	Непередбачуване підвищення ціни продукту	ні	ні	ні		так	
3	Можливість оновлення системи	так	так	ні			так
4	Непередбачувані збитки при компрометації	так	так	ні	так		
5	Відповідність стандарту X.509	так	ні	так			так

4.2. Технологічний аудит проектної ідеї

Для вивчення потенціалу 5G мереж у покращенні ефективності комунікації між IoT-пристроями необхідно застосувати всебічний підхід до технологічного аудиту. Залежно від вимог компанії, для реалізації проекту можуть бути використані як орендовані серверні ресурси, так і власні. Технології віртуалізації, такі як Docker або VirtualBox, значно спрощують процес розробки та впровадження. Впровадження коду через Docker забезпечує легкість розгортання та технічної підтримки, що знижує витрати. Оренда серверних потужностей є більш економічно вигідною, оскільки використання власних ресурсів може створити значне фінансове навантаження для компанії, яка впроваджує цей метод.

Таблиця 4.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технологія реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Підвищення ефективності комунікації IoT за допомогою 5G	Використання 5G мереж для підтримки IoT пристроїв	Існуюча технологія, активно впроваджується у багатьох країнах	Доступна, але вимагає покриття 5G
2	Масштабованість IoT мережі за допомогою 5G	Технологія розподілених IoT мереж на базі 5G	Технологія в процесі розвитку і стандартизації	Частково доступна, потрібне модернізаційне обладнання
3	Надійність та швидкодія для критичних додатків IoT (наприклад, медицина, транспорт)	Використання URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) в 5G мережах	Технологія підтримується в рамках стандарту 5G NR	Доступна, але вимагає спеціального налаштування мереж
4	Поліпшення енергозбереження для IoT пристроїв	Використання режиму mMTC (massive Machine Type Communication) у 5G	Стандарт є частиною 5G для IoT	Доступна для використання, залежно від постачальників послуг

Обрана технологія реалізації проекту:

Використання 5G мереж для підтримки IoT пристроїв з орієнтацією на Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC) для критичних додатків, таких як медицина або транспорт.

4.3. Аналіз можливостей для запуску стартапу

Вивчення ринкових можливостей розпочинається з аналізу попиту, включаючи динаміку розвитку ринку, наявність потреби та її обсягу (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Опис
1	Кількість основних учасників, од	5
2	Сукупний обсяг продажів, грн	45,000,000
3	Тенденції ринку (якісний аналіз)	Швидке зростання
4	Перешкоди для входу	Високі вимоги до інфраструктури
5	Специфічні вимоги до стандартизації та специфікації	Підтримка 5G NR (New Radio) та mmWave
6	Середній рівень рентабельності в галузі, %	8.2

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що ринок є сприятливим для входження. Наступний етап - ідентифікація потенційних груп клієнтів, їх характеристики та орієнтовний перелік вимог до продукту (послуги) для кожної з груп (таблиця 4.5).

Таблиця 4.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Запит, що створює ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Розбіжності в поведінці різних потенційних клієнтських груп	Вимоги споживачів до продукту (послуги)"
1	Підвищення швидкості та ефективності комунікацій між IoT пристроями	Компанії, що розгортають та експлуатують IoT мережі	Великі корпорації та середні підприємства мають різні вимоги до кількості підключених пристроїв і затримок	Висока пропускну здатність, низька затримка, надійність зв'язку
2	Підвищення енергоефективності IoT пристроїв	Виробники IoT пристроїв	Виробники вимагають зниження енергоспоживання для збільшення автономності пристроїв	Підтримка енергоефективних стандартів зв'язку
3	Підвищення рівня безпеки передачі даних в IoT мережах	Провайдери IoT послуг, промислові підприємства	Підприємства з високими вимогами до безпеки даних мають пріоритет	Надійне шифрування, захист від атак і перехоплення даних

Проведемо оцінку ринкового середовища, визначивши чинники, що сприяють впровадженню проекту на ринок, а також ті, що можуть завадити його реалізації.

Таблиця 4.6.

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Необхідність підтримки нових стандартів комунікації	Компанії, що використовують старі стандарти зв'язку, можуть зіткнутися з труднощами при інтеграції 5G через значні витрати на модернізацію пристроїв і мереж.	Інвестиції в модернізацію технологій для підтримки 5G, що в довгостроковій перспективі підвищить ефективність і зменшить операційні витрати.
2	Підвищені вимоги до кібербезпеки	Розширення можливостей IoT за допомогою 5G підвищує вразливість до кіберзагроз через збільшення кількості підключених пристроїв.	Впровадження нових стандартів кібербезпеки, зокрема шифрування даних та багатофакторної аутентифікації для захисту мережі.
3	Необхідність забезпечення сумісності між пристроями	Різні виробники IoT пристроїв можуть використовувати різні протоколи, що ускладнить комунікацію між пристроями через 5G.	Встановлення єдиних стандартів і сертифікації для забезпечення сумісності пристроїв різних виробників.
4	Висока складність управління мережею	5G забезпечує більш високу пропускну здатність і швидкість, але також вимагає більш складного управління мережею, що може призвести до збоїв у роботі.	Впровадження автоматизованих систем моніторингу та управління мережею для підвищення стабільності та зменшення ризиків простоїв.
5	Велика кількість зібраних даних	Підключення більшої кількості IoT пристроїв через 5G збільшить обсяги даних, що потребуватиме вдосконалення методів їх обробки та аналізу.	Впровадження технологій штучного інтелекту та машинного навчання для швидкої обробки даних та виявлення потенційних загроз чи можливостей.

Таблиця 4.7.

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Збільшення швидкості та обсягу передачі даних	5G дозволяє збирати та передавати великі обсяги даних про роботу пристроїв у реальному часі, що допомагає створювати профілі атакуючих або відстежувати аномалії.	Використання технологій штучного інтелекту та машинного навчання для ефективної обробки та аналізу зібраних даних, що допоможе виявляти нові загрози та створювати детальніші профілі зловмисників.
2	Зменшення затримок у комунікації між пристроями	Мережі 5G забезпечують значно меншу затримку, що дозволяє швидше реагувати на загрози або інциденти в мережі IoT.	Оптимізація інфраструктури IoT для більш швидкої та ефективної взаємодії пристроїв, що дозволить скоротити час на виявлення та усунення вразливостей.
3	Підвищена точність прогнозування кіберзагроз	Завдяки швидкій обробці великих обсягів даних можна точніше прогнозувати можливі вектори атак і виявляти нові види вразливостей.	Інтеграція передових аналітичних систем для прогнозування загроз та розгортання автоматизованих рішень для запобігання атакам до їхнього активного прояву.
4	Підвищення надійності та безпеки передачі даних	5G мережі забезпечують більш надійну передачу даних, що зменшує ризик їх втрати або перехоплення під час комунікації між пристроями IoT.	Впровадження посиленних протоколів безпеки та шифрування даних на базі 5G для зменшення ймовірності несанкціонованого доступу до інформації.
5	Автоматизація виявлення та реагування на загрози	Застосування 5G відкриває можливості для масштабування автоматизованих систем виявлення та реагування на кібератаки, що значно прискорює ліквідацію вразливостей.	Розгортання комплексних систем моніторингу безпеки в реальному часі для зниження навантаження на IT-відділи та зменшення часу реагування на загрози.

5G відкриває нові горизонти для IoT завдяки збільшенню швидкості передачі даних, зменшенню затримок і можливості обробляти великі обсяги інформації в реальному часі. Це підвищує ефективність виявлення кіберзагроз, прогнозування атак і автоматизацію їх ліквідації. Компанії можуть інтегрувати

інноваційні системи обробки даних, аналітику та безпеку для підвищення надійності мережі та безпеки передачі даних.

Поряд із можливостями виникають ризики, такі як необхідність адаптації до нових стандартів, підвищені вимоги до кібербезпеки та складність управління мережею. Від компаній вимагається модернізація інфраструктури, впровадження нових методів захисту та підвищення сумісності між пристроями різних виробників.

Наступний крок — аналіз пропозиції, під час якого визначаються основні характеристики конкуренції на ринку.

Таблиця.4.8.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№	Особливості конкурентного середовища	Як проявляється характеристика	Вплив на бізнес
1	Тип конкуренції: досконала	На українському ринку є кілька компаній, зацікавлених у IoT-стартапах, але їх кількість може зрости завдяки залученню вендорів обладнання.	Оцінка успіхів через використання приманок та РКІ-аутентифікації, виявлення переваг нового продукту.
2	Рівень конкуренції: внутрішня/міжнародна	Співпраця з компаніями, що працюють у сфері IoT або планують розгорнути IoT-мережі, а також з вендорами IoT-пристроїв. Можливий вихід на міжнародні ринки.	Проект орієнтований на український ринок, успіхи можуть залучити зарубіжні компанії.
3	Галузева специфіка: міжгалузева	Підвищення безпеки IoT застосовується в різних секторах.	Об'єднання переваг двох напрямів для підвищення ефективності порівняно з конкурентами.
4	Конкуренція за типом продуктів: за перевагами	Існує багато методів підвищення безпеки з аналогічними результатами. Вибір залежить від пріоритетів у сфері безпеки.	Використання приманок для виявлення експлойтів та підозрілих дій, що дозволяє швидше виявляти загрози та усувати вразливості.

Продовження таблиці 4.8.

5	За типом конкурентних переваг: нецінова	Конкуренція не за рахунок ціни, а через новизну методу, що поєднує РКІ-аутентифікацію та інші переваги.	Фокус на поєднанні переваг існуючих методів для підвищення ефективності.
6	За інтенсивністю: брендування	Вихід продукту під власною маркою дозволяє виділити його серед конкурентів.	Розвиток бренду продукту для підвищення впізнаваності та конкурентоспроможності.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю сил М. Портера) (таблиця 4.9.).

Таблиця 4.9.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Приманки, методи аутентифікації	Інші технології захисту IoT, методи на основі паролів	Навчально-дослідні установи та технологічні компанії, можливість входу в ринок висока	Патенти, дешевші методи захисту, що з'являються	Чутливість до впровадження нових методів та заміни існуючих	Рішення, що не орієнтовані на новітні методи аутентифікації, старі технології
Потенціал для розвитку	Кожен метод приманки має свої особливості та цілі	Велика конкуренція з боку нових технологічних розробок, вхід нових гравців у галузь	Затрати постачальників змінюються з часом	Висока зацікавленість у розвитку безпеки IoT	Відсутність обмежень на використання нових технологій

Продовження таблиці 4.9.

Висновки	Конкуренція не інтенсивна, кожна приманка має свою мету	Потенційні конкуренти: навчально-дослідні установи та технологічні компанії з високим потенціалом входу в ринок	Партнерські відносини з навчально-дослідними установами та технологічними компаніями	Кожен споживач має свої індивідуальні потреби у безпеці та розвитку своїх IoT систем	На даний момент обмежень через товари-замінники не існує
-----------------	---	---	--	--	--

Підсумки аналізу, представленого в таблиці 4.9, свідчать про наявність конкуренції на ринку, де основними гравцями є навчально-дослідні установи та технологічні компанії, а також високий потенціал для виходу на ринок. Щоб успішно вийти на ринок, продукт повинен пропонувати унікальні властивості, яких немає у конкурентних товарів. У нашій країні питання безпеки в технологіях Інтернету речей стає все більш важливим, що робить цей проект здатним значно вплинути на формування сучасної системи запобігання атакам і створення бази порушників шляхом аналізу захоплених даних.

З огляду на аналіз конкурентного середовища, вимог споживачів до продукту та особливостей маркетингового середовища, були визначені ключові фактори конкурентоспроможності, а також проведено порівняння сильних і слабких сторін стартап-проекту (таблиця 4.10).

Таблиця 4.10.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Чинники конкурентоспроможності	Пояснення
1	Досвід наукових та навчальних установ як вітчизняних, так і закордонних	Використання різноманітних методів та підходів для виявлення нових способів запобігання атакам на мережі IoT підвищує ефективність та безпеку систем.
2	Розвиток вразливостей	Проблема втрати інформації користувачів є надзвичайно важливою, тому компанії активно працюють над забезпеченням безпеки даних і підтримкою доступності сервісів, що є ключовим для безперервної роботи IoT.
3	Підтримка та обслуговування	Забезпечення належної підтримки та задоволення потреб компаній, які використовують технології 5G для IoT, є основним чинником для підтримки конкурентоспроможності на ринку.

Таблиця 4.11.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін у підвищенні ефективності комунікації між пристроями Інтернету речей

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з власною системою						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Досвід наукових та навчальних установ як вітчизняних, так і закордонних	3							+
2	Розвиток вразливостей	2						+	
3	Підтримка та обслуговування	2							+

Остаточним етапом аналізу ринкових можливостей для впровадження проекту є проведення SWOT-аналізу. Він включає в себе оцінку сильних

(Strength) і слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), базуючись на виявлених ринкових загрозах та можливостях, а також на сильних і слабких сторонах (таблиця 4.12.).

Таблиця 4.12.

SWOT-аналіз стартап проекту

<p>Сильні сторони</p> <ul style="list-style-type: none"> • Інноваційний підхід • Протидія атакам • Формування профілів зловмисників 	<p>Слабкі сторони</p> <ul style="list-style-type: none"> • Низький початковий капітал • Нова торгова марка
<p>Можливості</p> <ul style="list-style-type: none"> • Впровадження нових технологій • Відповідність новим потребам компаній 	<p>Загрози</p> <ul style="list-style-type: none"> • Конкурентні продукти з іншими пріоритетами у сфері безпеки IoT

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Початковий етап розробки ринкової стратегії включає визначення стратегії охоплення ринку, зокрема опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 4.13.).

Таблиця 4.13.

Вибір цільових груп потенційних клієнтів

№ п/п	Опис профілю потенційних клієнтів	Готовність прийняти продукт	Оцінка попиту в цільовій групі	Рівень конкуренції в сегменті	Легкість входу в сегмент
1	Операторські компанії	Переважаючі готові	Дуже високий	Низька	Легко
2	Компанії-вендори	Переважаючі готові	Дуже високий	Низька	Легко
Цільовими сегментами вибрано операторські компанії та вендорів, які зацікавлені у покращенні безпеки IoT-технологій за допомогою приманок і РКІ-аутентифікації.					

Після аналізу потенційних споживчих груп (сегментів) було визначено стратегію охоплення ринку - масовий маркетинг. Це пов'язано з

тим, що компанія працює з усім ринком, пропонуючи стандартизовану програму (включно з характеристиками товару/послуги). Для роботи в обраних сегментах ринку сформовано базову стратегію розвитку (таблиця 4.14.).

Таблиця 4.14.

Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана стратегічна альтернатива	Стратегія ринкового охоплення	Ключові конкурентні переваги	Основна стратегія розвитку
1	Збирання даних для подальшого аналізу з метою запобігання атакам і створення профілів зловмисників	Запуск приманок у мережах операторських компаній на внутрішньому ринку, з подальшою пропозицією вендорам для виходу на міжнародний ринок.	Є багато різних типів приманок, але розробляється така, яка може протидіяти вразливостям і запобігати атакам за допомогою РКІ-аутентифікації.	Стратегія диференціації
2	Швидкий розвиток через застосування нового методу покращення безпеки	Унікальність методу для задоволення потреб компаній, що використовують IoT	Застосування методів аналізу зібраних даних для виявлення нових вразливостей і шляхів захисту	Стратегія диференціації

Залежно від ступеня розвитку галузевого ринку та особливостей конкурентної боротьби, була вибрана одна з чотирьох стратегій конкурентної поведінки: лідерство, виклик лідеру, наслідування лідера або зайняття конкурентної ніші (таблиця 4.15).

Таблиця 4.15.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект новатором на ринку?	Чи буде компанія шукати нових клієнтів або переманювати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики конкурентів?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект не є новатором	Компанія буде шукати нових клієнтів, а також співпрацювати з конкурентами над спільними проектами,	Компанія буде брати найкращі характеристики у конкурентів	Стратегія наслідування лідеру для збереження фінансових

	якщо це буде потрібно		ресурсів
--	-----------------------	--	----------

Виходячи з вимог споживачів з вибраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також з урахуванням обраної базової стратегії розвитку і стратегії конкурентної поведінки, була сформульована стратегія позиціонування (таблиця 4.16).

Таблиця 4.16.

Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги цільової аудиторії до продукту	Основна стратегія розвитку	Ключові конкурентні переваги стартапу	Вибрані асоціації для позиціонування проекту
1	Доступність для всіх компаній	Стратегія диференціації	Приманка, що протидіє вразливостям та запобігає атакам з використанням РКІ-аутентифікації	Доступність, якість, швидкість

Маркетингова програма є ключем до успішного запуску продукту. Вона складається з комплексу взаємопов'язаних завдань і заходів різного характеру (соціальних, економічних, науково-технічних, виробничих та організаційних), із зазначенням необхідних ресурсів і джерел їх отримання. Ця програма спрямована на поетапне виконання завдань, має спільну мету та чітко визначені терміни. Вона також включає планування конкретних дій для реалізації маркетингових стратегій. У маркетинговій програмі ефективно поєднуються маркетингові інструменти з врахуванням конкретного періоду виконання та відповідного фінансування.

Перший етап передбачає розробку концепції товару, який буде запропонований споживачам. Для цього необхідно узагальнити результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (таблиця 4.17).

Таблиця 4.17.

Оцінка ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Перевага, яку надає товар	Основні конкурентні переваги
1	Створення профілів атакуючих	Збір та збереження експлоїтів з можливістю визначення інформації про атакуючого	Виявлення атак на системи з аутентифікацією на основі РКІ
2	Анулювання сертифікатів користувачів, що використовують вразливості для завантаження експлоїтів	Ідентифікація небезпек вразливостей і зниження їх шкоди за допомогою своєчасної ліквідації	Підвищена увага до пріоритетності у ліквідації певних вразливостей
3	Виявлення нових вразливостей та експлоїтів	Виявлення нових експлоїтів і вразливостей, що раніше не використовувалися	Виявлення нових ризиків для систем аутентифікації на основі РКІ

Наступним етапом є розробка трирівневої маркетингової моделі товару, яка включає уточнення ідеї продукту (послуги), визначення його фізичних характеристик і особливостей процесу надання.

Таблиця 4.18.

Опис трьох рівнів моделі продукту

Рівні товару	Сутність і компоненти
Продукт у концепції	Система для протидії атакам і швидкого виявлення нових вразливостей, яка дозволяє створювати профілі зловмисників і анулювати їх сертифікати.
Продукт у реальному виконанні	Містить властивості доступності, якості, швидкості та прозорості. Це віртуальний образ, що імітує роботу реального IoT-пристрою. Може постачатися окремо або разом з необхідним обладнанням. Назва: РКІ Honeypot.
Продукт з підтримкою	Перед продажем: налаштування системи відповідно до потреб клієнта, надання консультацій. Після продажу: підтримка, вдосконалення та адаптація в залежності від потреб і обставин.

Сертифікати, створені при використанні РКІ аутентифікації, є унікальними. Методи збору та аналізу захоплених даних також підлягають захисту. Уся система підвищення безпеки Інтернету речей забезпечує надійний захист ідеї продукту.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту:

Таблиця 4.19.

Формування системи збуту

№	Специфіка поведінки закупівель цільових клієнтів	Обов'язки збуту для постачальника	Глибина каналу дистрибуції	Оптимальна система дистрибуції
1	Власна або аутсорсингова система дистрибуції залежно від вимог клієнта	Розгортання образів на пристроях клієнта або надання готових рішень через орендоване або власне обладнання	Прямі продажі без посередників або через орендодавців обладнання	Пряма дистрибуція, без посередників

Таблиця 4.20.

Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікації	Основні позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення
1	Відкритість до інновацій, потреба у тестуванні	Корпоративна пошта, веб-додатки, професійні соціальні мережі	Доступність, якість, швидкість, прозорість. Можливість створення профілів зловмисників і виявлення нових вразливостей/експлоїтів	Підкреслити новизну продукту і заохотити тестування

У концепції маркетингових комунікацій компанія ефективно координує роботу каналів, рекламу в професійних соціальних мережах, продажі та стимулювання збуту, враховуючи зміни в поведінці та потребах споживачів.

Висновок:

У розділі виконано маркетинговий аналіз потенціалу 5G-мереж для підвищення ефективності комунікацій між пристроями Інтернету речей та оцінено перспективи виходу на ринок. Встановлено, що проект має значний потенціал для комерціалізації, починаючи з внутрішнього ринку, з подальшим

виходом на міжнародний ринок. Це стане можливим завдяки новітнім підходам до виявлення вразливостей в РКІ-аутентифікації та запобіганню потенційним атакам, що сприяє підвищенню якості, швидкості та прозорості процесів. Крім того, продукт може вдосконалюватися та адаптуватися до потреб клієнтів.

Основними конкурентами можуть бути науково-дослідні установи та інші компанії, але конкурентна ситуація сприяє успішному впровадженню продукту, оскільки аналогічні рішення переважно зосереджені на виявленні загроз у рамках експлоїтів у сервісах, тоді як запропонована система орієнтована на виявлення вразливостей не лише в сервісах, але й у системах РКІ-аутентифікації. Окрім того, запропоноване рішення передбачає анулювання сертифікатів для запобігання атакам при виявленні нових або не ліквідованих вразливостей, що є додатковою перевагою.

Основною проблемою залишається недостатньо високий пріоритет безпеки для деяких компаній, які можуть бути потенційними користувачами цієї технології. Проте проведений аналіз підтверджує доцільність подальшої реалізації стартап-проекту, оскільки його впровадження має значний потенціал для забезпечення безпеки в Інтернеті речей з використанням 5G мереж.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Конвергенція технології 5G та Інтернету речей є важливим кроком до досягнення нових можливостей для бізнесу та покращення зв'язку в усьому світі. Екосистема пристроїв IoT є складною, і вибір правильного основного або додаткового варіанту підключення залежить від таких факторів, як вартість розгортання, радіус дії, перешкоди та можливості. Технічні дослідження показали, що 5G та інші послуги можуть співіснувати в певних частотних діапазонах за умови належного адаптування технічних умов. Дотримання дозволених лімітів впливу також є важливим при розробці нових додатків або технологічних аксесуарів з використанням 5G та IoT.

Конвергенція мереж і послуг за допомогою технології 5G перетворює Інтернет на складну та багатогранну екосистему, інтегровану майже в кожен аспект нашого повсякденного життя. Доступність і швидкість доступу до Інтернету зростають, дозволяючи користувачам отримувати доступ до високоякісного медіаконтенту в режимі реального часу, а постачальники послуг Інтернету пропонують цілий ряд нових послуг і програм. Стільниковий зв'язок дозволить досягти ключових цілей IoT, таких як зменшення складності та вартості пристроїв, збільшення покриття для підтримки віддалених додатків, а також забезпечення гнучкості розгортання, високої ємності та тривалого часу автономної роботи.

Підприємства можуть отримати значну вигоду від оптимізації продуктивності мережі в мережах 5G, яка є важливою для належного функціонування бізнес-процесів, підвищення продуктивності, скорочення простоїв і підвищення задоволеності клієнтів. Потенціал конвергенції мереж і послуг у збільшенні доступності та швидкості доступу до Інтернету дає змогу створювати низку нових та інноваційних програм і послуг, що змінює спосіб нашого життя та роботи.

Управління перешкодами в мережах 5G є серйозною проблемою для забезпечення надійності та продуктивності послуг IoT. Ефективні методи керування перешкодами, різноманітні вимоги до підключення та затримки пристроїв і програм IoT, а також зовнішнє втручання є важливими проблемами, які необхідно вирішити, щоб гарантувати, що мережі 5G можуть підтримувати величезну кількість пристроїв і програм, які покладаються на них.

5G має багато функцій, необхідних для розумних міст. Однак його можна покращити, поєднавши його з такими протоколами, як LoRaWAN, який забезпечує зв'язок на низькій відстані, Z-Wave, Zigbee та SigFox для домашніх пристроїв IoT. 5G з технологіями IoT поєднує все це, щоб забезпечити більш складне рішення, подбавши про ослаблення сигналу, протоколи безпеки, пропускну здатність, QoS тощо.

Розвиток технологій IoT має значний вплив на мережі 5G. Оскільки все більше пристроїв підключаються до Інтернету, зростає потреба у швидшому та надійнішому з'єднанні. Саме тут на допомогу приходять мережі 5G, які забезпечують вищу швидкість, меншу затримку та більшу пропускну здатність, ніж попередні бездротові технології. Поширення пристроїв IoT також створює нові можливості для 5G, оскільки ця технологія здатна підтримувати величезні обсяги даних, які генеруються цими пристроями. Однак це також створює проблеми для мереж 5G, такі як необхідність обробляти великі обсяги трафіку з різних пристроїв з різними вимогами. Як наслідок, розвиток технологій IoT стимулює інновації в мережах 5G, оскільки провайдери шукають способи задовольнити потреби цієї зростаючої екосистеми.

Очікується, що впровадження мереж 5G матиме значний вплив на еволюцію послуг IoT. Однією з найбільш істотних змін є збільшення швидкості передачі даних. Мережі 5G мають набагато вищу швидкість передачі даних, меншу затримку та вищу пропускну здатність, ніж попередні покоління мобільних мереж [44]. Це означає, що пристрої IoT можуть передавати та

отримувати дані набагато швидше, що забезпечує більшу обробку й аналіз даних у реальному часі. Покращена швидкість реагування послуг Інтернету речей відкриє можливості для нових програм, які вимагають майже миттєвої обробки даних, таких як дистанційна хірургія, автономні транспортні засоби та промислова автоматизація.

Ще одна важлива зміна, спричинена запровадженням мереж 5G, — збільшення масштабованості послуг IoT. Мережі 5G мають вищу щільність пристроїв, що означає, що вони можуть підтримувати більшу кількість пристроїв IoT на одиницю площі. Це допоможе підвищити масштабованість послуг IoT і дозволить розгортати більш складні та витончені рішення IoT.

Крім того, очікується, що мережі 5G підвищать надійність послуг IoT. Мережі 5G мають більш надійні можливості виправлення помилок і функції резервування, що може підвищити надійність послуг IoT. Це особливо важливо для критично важливих програм, таких як віддалений моніторинг інфраструктури або медичних пристроїв [45]. Підвищення надійності також буде корисним у галузях, які потребують високонадійних комунікаційних мереж, таких як виробництво та енергетика.

Покращені функції безпеки мереж 5G також вплинуть на еволюцію послуг IoT. Мережі 5G пропонують покращені функції безпеки, такі як нарізка мережі, яка дозволяє створювати ізольовані віртуальні мережі для різних програм IoT. Це може допомогти запобігти неавторизованому доступу та забезпечити безпеку та конфіденційність даних IoT. Зі збільшенням кількості пристроїв IoT важливість безпеки та конфіденційності є надзвичайно важливою, і мережі 5G можуть забезпечити більш безпечне середовище для даних, що передаються.

Мережі 5G допоможуть зменшити енергоспоживання пристроїв IoT. Мережі 5G розроблені таким чином, щоб бути більш енергоефективними, ніж попередні покоління мобільних мереж [46]. Це може допомогти зменшити

енергоспоживання пристроїв IoT, продовжити термін служби їх батареї та зменшити їхній вплив на навколишнє середовище. Це особливо важливо для пристроїв Інтернету речей, які важко або дорого замінити чи перезарядити, наприклад, датчики, розміщені у віддалених або важкодоступних місцях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лін, З.; Лін, М.; Де Кола, Т.; Ван, Дж. Б.; Чжу, WP; Cheng, J. Підтримка IoT з множинним доступом із розділенням швидкості в супутникових і антенних інтегрованих мережах. *IEEE Internet Things J.* **2021**, 8, 11123–11134. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
2. Шао, Д.; Мвангакала, Х.; Ішенгома, Ф.; Монгі, Х.; Mambile, С.; Чалі, Ф. Підтримка цифрових трансформацій, викликаних реакцією на пандемію COVID-19: Уроки державного сектора Танзанії. *Глоб. знати. Мем. Комун.* 2022; перед друком . [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
3. Мінолі, Д.; Occhiogrosso, В. Практичні аспекти інтеграції мереж 5G та додатків IoT у середовищах розумних міст. *Wirel. Комун. моб. обчис.* **2019**, 2019, 5710834. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Зелена версія](#)]
4. Вермезан, О.; Фрісс, П. *Інтернет речей: конвергентні технології для розумного середовища та інтегрованих екосистем*; River Publishers: Любляна, Словенія, 2013. [[Google Scholar](#)]
5. Гош, А.; Мадер, А.; Бейкер, М.; Чандрамулі, Д. Еволюція 5G: погляд на стільникову технологію 5G за межами 3GPP, випуск 15. *IEEE Access* **2019**, 7, 127639–127651. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
6. Монторі, Ф.; Бедонї, Л.; Ді Феліче, М.; Бононі, Л. Технології бездротового зв'язку між машинами для Інтернету речей: таксономія, порівняння та відкриті питання. *Всепроникна моб. обчис.* **2018**, 50, 56–81. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Мутеба, К.; Джуані, К.; Олвал, Т. 5G NB-IoT: дизайн, міркування, рішення та виклики. *Procedia Comput. Sci.* **2022**, 198, 86–93. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Харделл, Л.; Карлберг, М. [Коментар] Ризики для здоров'я від радіочастотного випромінювання, включаючи 5G, повинні оцінюватися

експертами без конфлікту інтересів. *Онкол. Lett.* **2020** , 20 , 15. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

9. Мумтаз, С.; Алсохайлі, А.; Панг, З.; Рейс, А.; Цанг К.Ф.; Родрігес, Дж. Масивний Інтернет речей для промислових застосувань: вирішення проблем бездротового підключення IoT і фрагментації екосистеми. *IEEE Ind. Electron. Mag.* **2017** , 11 , 28–33. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

10. Маркакіс, Е.К.; Каррас, К.; Сідеріс, А.; Алексіу, Г.; Палліс, Е. Обчислення, кешування та комунікація на межі: наріжний камінь для створення універсальної екосистеми 5G. *IEEE Commun. Mag.* **2017** , 55 , 152–157. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

11. Четтрі, Л.; Бера, Р. Комплексне дослідження Інтернету речей (IoT) щодо бездротових систем 5G. *IEEE Internet Things J.* **2019** , 7 , 16–32. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

12. Чаудхарі, Б.С.; Зеннаро, М.; Боркар, С. Технології LPWAN: Нові характеристики додатків, вимоги та особливості дизайну. *Інтернет майбутнього* **2020** , 12 , 46. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Зелена версія](#)]

13. Хван, SH; Liu, SZ Survey on 3GPP low power wide area technology and its application. У матеріалах 2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), Сінгапур, 28–30 серпня 2019 р.; IEEE: Піскатавей, Нью-Джерсі, США, 2019; С. 1–5. [[Google Scholar](#)]

14. Sahoo, BP; Чоу, CC; Венг, CW; Wei, HY Впровадження мереж 5G із міліметровими хвилями для масштабних додатків Інтернету речей: ближчий погляд на проблеми, що впливають на міліметрові хвилі в споживчих пристроях у рамках 5G. *IEEE Consum. Електрон. Mag.* **2018** , 8 , 49–54. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

15. Ян, Л.; Чжао, Білорусь; Чжен, Х. Простір між нами: Встановлення та підтримка кордонів у бездротовому доступі до спектру. У матеріалах шістнадцятої щорічної міжнародної конференції з мобільних комп'ютерів і

мереж, Чикаго, Іллінойс, США, 20–24 вересня 2010 р.; С. 37–48. [[Google Scholar](#)]

16. Камар, Ф.; Хіндія, Міннесота; Дім'яти, К.; Нурдін, К.А.; Амірі, І. С. Проблеми управління перешкодами для майбутньої мережі 5G: огляд. *Телекомун. сист.* **2019**, *71*, 627–643. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

17. Аттаран, М. Вплив 5G на еволюцію інтелектуальної автоматизації та оцифрування галузі. *Ж. Ембіент. Intell. Humaniz. обчис.* **2021**, 1–17. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

18. Сіддікі, МА; Ю, Х.; Joung, J. Проблеми впровадження наднадійного зв'язку 5G із низькою затримкою та проблеми з роботою пристроїв IoT. *Electronics* **2019**, *8*, 981. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Зелена версія](#)]

19. Ферро, Е.; Поторті, Ф. Бездротові протоколи Bluetooth і Wi-Fi: опитування та порівняння. *IEEE Wirel. Комун.* **2005**, *12*, 12–26. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

20. Чандра, С.; Арія, Р.; Верма, А. К. Надійність і вік аналізу інформації 5G IoT для інтелектуального зв'язку. *обчис. Електр. інж.* **2022**, *101*, 108053. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

21. Азарі, А.; Масуді, М. Управління перешкодами для співіснуючих мереж Інтернету речей у неліцензованому спектрі. *Ad Hoc Netw.* **2021**, *120*, 102539. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

22. Аль-Туджман, Ф. Пристрої з підтримкою 5G і розумні простори в соціальному IoT: огляд. *Майбутній Генератор. обчис. сист.* **2019**, *92*, 732–744. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

23. Хасан, М.К.; Газаль, Т.М.; Саїд, Р.А.; Панді, Б.; Гохель, Х.; Ешмаві, А.; Абдель-Халек, С.; Alkhassawneh, НМ Огляд загроз безпеці, вразливостей і заходів протидії Інтернету медичних речей із підтримкою 5G. *IET Комун.* **2022**, *16*, 421–432. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

24. Лін, З.; Лін, М.; Шампань, Б.; Чжу, WP; Al-Dhahir, N. Секретність-енергоєфективне гібридне формування променя для супутниково-наземних інтегрованих мереж. *IEEE Trans. Комун.* **2021**, *69*, 6345–6360. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

25. Тан, Ю.; Дананджаян, С.; Ноу, С.; Го, К.; Ло, С.; Хе Ю. Опитування мережі 5G та її впливу на сільське господарство: виклики та можливості. *обчис. Електрон. Agric.* **2021**, *180*, 105895. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

26. Махмуд, А.; Белтрамеллі, Л.; Абедін С.Ф.; Зеб, С.; Моула, Н. І.; Хасан, SA; Сізінні, Е.; Гідлунд, М. Промисловий Інтернет речей у мережах 5G і не тільки: бачення, архітектура та тенденції дизайну. *IEEE Trans. пром.інформ.* **2021**, *18*, 4122–4137. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

27. Storck, CR; Дуарте-Фігейредо, Ф. Огляд еволюції технології 5G, стандартів та інфраструктури, пов'язаної зі зв'язком між транспортними засобами та будь-чим через Інтернет транспортних засобів. *IEEE Access* **2020**, *8*, 117593–117614. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

28. Лю, Е.; Еффік, Е.; Хічкок, Дж. Опитування програм охорони здоров'я в мережах 5G. *IET Комун.* **2020**, *14*, 1073–1080. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

29. Огбодо, ЄС; Абу-Махфуз, А.М.; Kurien, AM. Включення LPWAN для співіснування та різноманітних додатків IoT у розумних містах з використанням легкої гетерогенної моделі багатодомової мережі. *J. Sens. Actuator Netw.* **2022**, *11*, 87. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

30. Іванова Д.; Маркова Є.; Молчанов Д.; Пірмагомедов Р.; Кучерявий Ю.; Самоуїлов, К. Ефективність стратегій співіснування трафіку на основі пріоритетів у промислових розгортаннях 5G mmWave. *IEEE Access* **2022**, *10*, 9241–9256. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

31. Ахмад, А.; Рехмані, МН; Тембіне, Х.; Мохаммед, О.А.; Джамаліпур, А. Редакційна стаття спеціального розділу IEEE Access: Оптимізація нових

бездротових мереж: IoT, 5G і комунікаційних мереж розумних мереж. *IEEE Access* **2017**, *5*, 2096–2100. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

32. Байрагі, А. К.; Мунір, MS; Алсенві, М.; Тран, NH; Альшамрані, СС; Масуд, М.; Хан, З.; Хонг, CS Механізм співіснування між eMBB і uRLLC у бездротових мережах 5G. *IEEE Trans. Комун.* **2020**, *69*, 1736–1749. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

33. Шен, Х.; Ye, Q.; Чжуан, В.; Ши, В.; Бай, Г.; Янг, Г. Розрізання ресурсів за допомогою безпілотних дронів для мереж радіодоступу висхідної лінії зв'язку 5G. *IEEE Trans. Вех. технол.* **2021**, *70*, 7071–7086. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

34. Пейнлі, С.; Шарма, С.; Матта, П. Майбутні тенденції та виклики в інтелектуальному додатку наступного покоління 5G-IoT. У матеріалах 5-ї міжнародної конференції з обчислювальних методологій і зв'язку (ICCMC) 2021 р., Ероде, Індія, 8–10 квітня 2021 р.; IEEE: Піскаатавей, Нью-Джерсі, США, 2021; С. 354–357. [[Google Scholar](#)]

35. Гупта, Н.; Шарма, С.; Джуניה, П. К.; Гарг, У. Sdnfv 5g-iot: структура для іот наступного покоління з підтримкою 5g. У матеріалах Міжнародної конференції 2020 року з прогресу в обчислювальній техніці, комунікації та матеріалах (ICACSM), Дехрадун, Індія, 21–22 серпня 2020 р.; IEEE: Піскаатавей, Нью-Джерсі, США, 2020; С. 289–294. [[Google Scholar](#)]

36. Іслам, С.; Зада, М.; Уоо, Н. Вбудована 5G смартфонна антена на основі фільтра низьких частот для діапазонів хвиль нижче 6 ГГц і мм. *IEEE Trans. Антени Проп.* **2021**, *69*, 5424–5436. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

37. Мітра, Р.Н.; Agrawal, DP Мобільні технології 5G: опитування. *ICT Express* **2015**, *1*, 132–137. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]

38. Ахад, А.; Тахір, М.; Яу, KLA Розумна мережа охорони здоров'я на основі 5G: архітектура, таксономія, проблеми та майбутні напрямки

- досліджень. *IEEE Access* **2019**, *7*, 100747–100762. [[Google Scholar](#)]
[[CrossRef](#)]
39. Andrewsetal, J. Whatwill5Gbe? *IEEE J. Sel. Области Комун.* **2014**, *32*, 1065–1082. [[Google Scholar](#)]
40. Хан, С.; Bian, S. Енергоефективний 5G для більш екологічного майбутнього. *Нац. Електрон.* **2020**, *3*, 182–184. [[Google Scholar](#)]
41. Лін, З.; Ніу, Х.; Ан, К.; Ван, Ю.; Чжен, Г.; Хацінотас, С.; Ну, У. Заломлення RIS-підтримуваних гібридних супутниково-наземних ретрансляційних мереж: спільна конструкція формування променя та оптимізація. *IEEE Trans. Aerosp. Електрон. сист.* **2022**, *58*, 3717–3724. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Шим, JP; Варшні, У.; Деклева С.; Knoerzer, G. Мобільні та бездротові мережі: послуги, еволюція та проблеми. *Міжн. J. Mob. Комун.* **2006**, *4*, 405–417. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
43. Кано, JC; Берріос, В.; Гарсія, Б.; То, К. К. Еволюція IoT: перспектива галузі. *IEEE Internet Things Mag.* **2018**, *1*, 12–17. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
44. Йовович, І.; Форенбахер, І.; Періша, М. Масивні комунікації машинного типу: огляд і перспективи 5G. У матеріалах 3-ї міжнародної віртуальної дослідницької конференції з технічних дисциплін, Жиліна, Словаччина, 19–23 жовтня 2015 р.; Том 3. [[Google Scholar](#)]
45. Ваезі, М.; Азарі, А.; Хосравірад, SR; Shirvanimoghaddam, М.; Азарі, М.М.; Часакі, Д.; Поповські, П. Стільниковий, глобальний і неземний Інтернет речей: опитування про досягнення 5G і шлях до 6G. *IEEE Commun. Surv. Репетитор.* **2022**, *24*, 1117–1174. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
46. Тао, Дж.; Умайр, М.; Алі, М.; Чжоу, Дж. Вплив Інтернету речей, що підтримується появою 5G в енергосистемах: огляд. *CSEE J. Power Energy Syst.* **2019**, *6*, 344–352. [[Google Scholar](#)]

47. Студент, В.; Dhir, R. Дослідження ad hoc мережі: огляд. *Міжн. J.* **2013**, *3*, 135–138. [[Google Scholar](#)]
48. Томар, А. Вступ до технології ZigBee. *Глоб. технол. Cent.* **2011**, *1*, 1–24. [[Google Scholar](#)]
49. Яссеїн М.Б.; Мардіні, В.; Халіл, А. Автоматизація розумних будинків за допомогою протоколу Z-wave. У матеріалах Міжнародної конференції з інженерії та MIS 2016 (ICEMIS), Агадір, Марокко, 22–24 вересня 2016 р.; IEEE: Піскатавей, Нью-Джерсі, США, 2016; С. 1–6. [[Google Scholar](#)]
50. Вільярім, М.Р.; де Луна, JVH; де Фаріас Медейрос, Д.; Перейра, РІС; де Соуза, СР; Байоккі, О.; da Cunha Martins, FC Оцінка дальності зв'язку LoRa в міських і лісових районах: тематичне дослідження в Бразилії та Португалії. У матеріалах 10-ї щорічної конференції IEEE 2019 з інформаційних технологій, електроніки та мобільного зв'язку (IEMCON), Ванкувер, Британська Колумбія, Канада, 17–19 жовтня 2019 р.; IEEE: Піскатавей, Нью-Джерсі, США, 2019; стор. 0827–0832. [[Google Scholar](#)]
51. Абдулмалек, С.; Насір, А.; Джаббар, штат Вашингтон; Альмухая, М.А.; Байрагі, А. К.; Хан, МАМ; Кее, SH Система моніторингу охорони здоров'я на основі Інтернету речей для покращення якості життя: огляд. *Healthcare* **2022**, *10*, 1993. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Чжан, К.; Ченг, Л.; Бутаба, Р. Хмарні обчислення: сучасні та дослідницькі проблеми. *J. Internet Serv. appl.* **2010**, *1*, 7–18. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
53. Хансен, CJ WiGiG: Багатогігабітний бездротовий зв'язок у діапазоні 60 ГГц. *IEEE Wirel. Комун.* **2011**, *18*, 6–7. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
54. Мохамед, Е. М. Вибір точки доступу WiGiG за допомогою неконтекстного та контекстного багаторукого бандита в приміщенні. *Ж. Ембіент. Intell. Humaniz. обчис.* **2022**, 1–16. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

55. Фам, Д.А.; Парк, Е.; Лі, НЛ; Лім, С. Ширококуткова метаповерхнева магнітоелектрична антена з високим коефіцієнтом посилення для програм WiGig. *IEEE Trans. Антени Проп.* **2020**, *69*, 1140–1145. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

56. Кім, С.; Юн, Дж. Х. Взаємодія з урахуванням руху між Wigig і Wi-Fi для бездротової віртуальної реальності. *Sensors* **2020**, *20*, 6782. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

57. Чжан, В.; Чжан, З.; Чжао, НС Спільні туманні обчислення для роботи з великими даними в Інтернеті транспортних засобів: архітектура та ієрархічне управління ресурсами. *IEEE Commun. Mag.* **2017**, *55*, 60–67. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

58. Дальман, Е.; Parkvall, S.; Skold, J. *4G, LTE-Advanced Pro і шлях до 5G*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2016. [[Google Scholar](#)]

59. Лінь, З.; Лінь, М.; Ван, Дж. Б.; Де Кола, Т.; Wang, J. Спільне формування променя та розподіл потужності для супутниково-земних інтегрованих мереж з неортогональним множинним доступом. *IEEE J. Sel. Top. Процес сигналу.* **2019**, *13*, 657–670. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]

60. Ма, З.; Сяо, М.; Сяо, Ю.; Панг, З.; Бідний, Х.В.; Вучетич, Б. Бездротовий зв'язок із високою надійністю та малою затримкою для Інтернету речей: виклики, основи та передові технології. *IEEE Internet Things J.* **2019**, *6*, 7946–7970. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

61. Rappaport, TS; Сонце, С.; Майзус, Р.; Чжао, Х.; Азар, Ю.; Ван, К.; Вонг, GN; Шульц, Дж. К.; Самімі, М.; Гутьєррес, Ф. Мобільний зв'язок міліметрового діапазону для стільникового зв'язку 5G: це буде працювати! *IEEE Access* **2013**, *1*, 335–349. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

62. Дангі, Р.; Лалвані, П.; Чоудхарі, Г.; Ви, І.; Пау, Г. Дослідження технології 5G: систематичний огляд. *Датчики* **2022**, *22*, 26. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

63. Хуанг, Х.; Савкін, А. В. Спосіб оптимізованого розміщення безпілотних літальних апаратів для максимального покриття та мінімальних перешкод у стільникових мережах. *IEEE Trans. пром.інформ.* **2018**, *15*, 2638–2647. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

64. Луппічіні, Р.; Отже, А. Техноетичний огляд комерційного використання дронів у контексті управління, етики та конфіденційності. *технол. Соц.* **2016**, *46*, 109–119. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

65. Вергоу, Б.; Нагель, Х.; Бондт, Г.; Кастерс, Б. Технологія дронів: типи, корисне навантаження, застосування, проблеми з частотним спектром і майбутні розробки. *У майбутньому використання дронів: можливості та загрози з етичної та правової точки зору*; TMC Asser Press: Гаага, Нідерланди, 2016; С. 21–45. [[Google Scholar](#)]

66. Катта, СС; Нандьяла, С.; Вієгас, Е.К.; АльМахмуд, А. Порівняльний аналіз моделей глибокого навчання на основі аудіо для виявлення та ідентифікації безпілотних літальних апаратів. У матеріалах семінару 2022 року з порівняльного аналізу кіберфізичних систем та Інтернету речей (CPS-IoTBench), Мілан, Італія, 3–6 травня 2022 р.; IEEE: Піскавей, Нью-Джерсі, США, 2022; С. 7–11. [[Google Scholar](#)]

67. Борральо, Р.; Мохамед, А.; Куддус, Австралія; Вієйра, П.; Тафазоллі, Р. Опитування щодо розширення покриття в стільникових мережах: виклики та рішення для майбутніх розгортань. *IEEE Commun. Surv. Репетитор.* **2021**, *23*, 1302–1341. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

68. Альшаріф, МН; Нордін, Р. Еволюція до бездротових мереж п'ятого покоління (5G): сучасні тенденції та виклики у розгортанні міліметрових хвиль,

масивного MIMO та малих стільників. *Телекомун. сист.* **2017**, *64*, 617–637.

[[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

69. Бобан, М.; Кусарідас, А.; Манолакис, К.; Айхінгер, Дж.; Сюй, В. З'єднані дороги майбутнього: випадки використання, вимоги та міркування щодо дизайну зв'язку між транспортними засобами та будь-чим. *Автомобіль IEEE. технол. Маг.* **2018**, *13*, 110–123. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

70. Гарсія, МНС; Моліна-Галан, А.; Бобан, М.; Gozalvez, J.; Колл-Пералес, Б.; Шахін, Т.; Kousaridas, A. Навчальний посібник із зв'язку 5G NR V2X. *IEEE Commun. Surv. Вихователь* **2021**, *23*, 1972–2026. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

71. Алалеві, А.; Даюб, І.; Cherkaoui, S. Про сценарії використання 5G-V2X і сприятливі технології: комплексне дослідження. *IEEE Access* **2021**, *9*, 107710–107737. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

72. Bockelmann, S.; Пратас, Н.К.; Вундер, Г.; Саур, С.; Наварро, М.; Грегоратті, Д.; Вів'є, Г.; Де Карвальо, Е.; Джи, Ю.; Стефанович, Ч.; та ін. До масової підтримки з'єднання для масштабованого зв'язку mMTC у мережах 5G. *IEEE Access* **2018**, *6*, 28969–28992. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

73. Сальва-Гарсія, П.; Алькарас-Калеро, Дж.М.; Алаез, Р.М.; Кірівелла-Перес, Е.; Соловей, Дж.; Wang, Q. 5G-UHD: Дизайн, прототипування та емпірична оцінка адаптивного потокового відео ультрависокої чіткості на основі масштабованого H. 265 у віртуалізованих мережах 5G. *обчис. Комун.* **2018**, *118*, 171–184. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]

74. Рахімі, Х.; Зібаїнеджад, А.; Safavi, AA Нова архітектура IoT на основі 5G-IoT і технологій наступного покоління. У матеріалах 9-ї щорічної конференції IEEE 2018 з інформаційних технологій, електроніки та мобільного зв'язку (IEMCON), Ванкувер, Британська Колумбія, Канада, 1–3 листопада 2018 р.; IEEE: Піскатавей, Нью-Джерсі, США, 2018; С. 81–88. [[Google Scholar](#)]

75. Хункумбуре, М.; Цуканері, Г. Аналіз витрат на надання аварійних служб 5G eMBB на основі безпілотників. У матеріалах семінарів IEEE Globecom 2019 (GC Wkshps), Вайколоа, Гаваїт, США, 9–13 грудня 2019 р.; IEEE: Піскатавей, Нью-Джерсі, США, 2019; С. 1–5. [[Google Scholar](#)]

76. Лі, З.; Усітало, М.А.; Шаріатмадарі, Х.; Сінгх, Б. 5G URLLC: Проблеми проектування та системні концепції. У матеріалах 15-го міжнародного симпозиуму з систем бездротового зв'язку (ISWCS) 2018 р., Лісабон, Португалія, 28–31 серпня 2018 р.; IEEE: Піскатавей, Нью-Джерсі, США, 2018; С. 1–6. [[Google Scholar](#)]

77. Тривісонно, Р.; Кондолучі, М.; Ан, Х.; Mahmoodi, T. mIoT slice для систем 5G: дизайн і оцінка продуктивності. *Sensors* **2018**, *18*, 635. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)] [[Зелена версія](#)]

78. Маркезе, М.; Мохеддін, А.; Патрон, Ф. Інтеграція IoT та БПЛА в гібридні наземно-супутникові мережі 5G. *Sensors* **2019**, *19*, 3704. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)] [[Зелена версія](#)]

79. Чекіред Д.А.; Тогоу, Массачусетс; Хухі, Л.; Ксентіні, А. Масштабована базова мережа SDN із підтримкою нарізки 5G: на шляху до надзвичайно низької затримки служби автономного водіння. *IEEE J. Sel. Области Комун.* **2019**, *37*, 1769–1782. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

80. Бодіньє, К.; Бадер, Ф.; Палікот, Дж. Про спектральне співіснування сигналів CP-OFDM і FB-MC у мережах 5G. *IEEE Access* **2017**, *5*, 13883–13900. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

81. Біглієрі, Е.; Голдсміт, А.І.; Грінштейн, Л.Ж.; Бідний, Х.В.; Мандаям, Н. Б. *Принципи когнітивного радіо*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013. [[Google Scholar](#)]

82. Зубов, А.; Сомбруцкі, Р. Перешкоди сусіднього каналу в IEEE 802.11 n. У матеріалах Конференції IEEE з бездротового зв'язку та мереж

(WCNC) 2012 р., Париж, Франція, 1–4 квітня 2012 р.; IEEE: Піскатавей, Нью-Джерсі, США, 2012; С. 1163–1168. [[Google Scholar](#)]

83. Ю, Ю.; Дуткевич, Є.; Хуанг, Х.; Мук, М.; Фанг, Г. Аналіз продуктивності м'якого повторного використання частоти для координації перешкод між сотами в мережах LTE. У матеріалах 10-го Міжнародного симпозиуму з комунікацій та інформаційних технологій 2010 р., Токіо, Японія, 26–29 жовтня 2010 р.; IEEE: Піскатавей, Нью-Джерсі, США, 2010; С. 504–509. [[Google Scholar](#)]

84. Букалов А.О.; Хагман, С. Г. Системні аспекти технології смарт-антен у стільниковому бездротовому зв'язку – огляд. *IEEE Trans. Мікропроц. Теорія Тех.* **2000** , 48 , 919–929. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]

85. Бахай, Арканзас; Saltzberg, BR; Ерген, М. *Цифрові комунікації з кількома несучими: теорія та застосування OFDM* ; Springer Science & Business Media: Берлін/Гейдельберг, Німеччина, 2004. [[Google Scholar](#)]

86. Замбіанко, М.; Verticale, G. Мінімізація перешкод у нарізці мережі фізичного рівня 5G. *IEEE Trans. Комун.* **2020** , 68 , 4554–4564. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]

87. Сейфі, Н.; Чжан, Дж.; Хіт, RW; Свенссон, Т.; Coldrey, M. Координоване 3D формування променя для управління перешкодами в стільникових мережах. *IEEE Trans. Wirel. Комун.* **2014** , 13 , 5396–5410. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

88. Де Гауденці, Р.; Анджелетті, П.; Петролаті, Д.; Ре, Е. Технології майбутнього для супутникових систем з дуже високою пропускною здатністю. *Міжн. Дж. Сателл. Комун. Netw.* **2020** , 38 , 141–161. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

89. Ханзо, Л.; Ян, Л.Л.; Куан, Е.; Йен, К. *DS-CDMA з однією та кількома несучими: виявлення кількох користувачів, просторово-часове*

поширення, синхронізація, стандарти та мережа ; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2003. [[Google Scholar](#)]

90. Агівал, М.; Рой, А.; Саксена, Н. Бездротові мережі 5G наступного покоління: комплексне дослідження. *IEEE Commun. Surv. Penetutor.* **2016** , 18 , 1617–1655. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

91. Омар, Т.; Кетсеоглу, Т.; Наффаа, І. Нова модель самовідновлення з використанням попереднього кодування та підходу на основі великих даних для мереж 5G. *Всепроникна моб. обчис.* **2021** , 73 , 101365. [[Google Scholar](#)]

92. “Ericsson Mobility Report,” Ericsson, Tech. Rep., June 2021.

93. 3GPP, “NR; NR and NG-RAN Overall Description,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.300, 07 2021, version 16.6.0

94. A. I. Sulyman, S. M. Oteafy, and H. S. Hassanein, “Expanding the cellular-IoT umbrella: An architectural approach,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 66–71, 2017.

95. G. Nardini, D. Sabella, G. Stea, P. Thakkar, and A. Viridis, “Simu5G– An OMNeT++ Library for End-to-End Performance Evaluation of 5G Networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181 176–181 191, 2020.

96. “OMNeT++: Discrete Event Simulator,” <https://omnetpp.org/>, accessed: 2021-08-15

97. L. Chettri and R. Bera, “A comprehensive survey on Internet of Things IoT toward 5G wireless systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 16–32, 2019.

98. N. Gupta, S. Sharma, P. K. Juneja, and U. Garg, “SDNFV 5G IoT: a framework for the next generation 5G enabled IoT,” in 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM). IEEE, 2020, pp. 289–294.

99. G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "A survey on 5G networks for the Internet of Things: Communication technologies and challenges," *IEEE access*, vol. 6, pp. 3619–3647, 2017.
100. A. Mavromatis, A. P. Da Silva, K. Kondepu, D. Gkounis, R. Nejabati, and D. Simeonidou, "A software defined device provisioning framework facilitating scalability in Internet of Things," in *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*. IEEE, 2018, pp. 446–451.
101. M. Agiwal, N. Saxena, and A. Roy, "Towards connected living: 5G enabled Internet of Things (IoT)," *IETE Technical Review*, vol. 36, no. 2, pp. 190–202, 2019.
102. J. Breen, A. Buffmire, J. Duerig, K. Dutt, E. Eide, A. Ghosh, M. Hibler, D. Johnson, S. K. Kasera, E. Lewis, D. Maas, C. Martin, A. Orange, N. Patwari, D. Reading, R. Ricci, D. Schurig, L. B. Stoller, A. Todd, J. Van der Merwe, N. Viswanathan, K. Webb, and G. Wong, "POWDER: Platform for Open Wireless Data-driven Experimental Research," *Computer Networks*, p. 108281, 2021.
103. "ns-3: A discrete-event network simulator," <https://www.nsnam.org/>, accessed: 2021-08-15.
104. N. Patriciello, S. Lagen, B. Bojovic, and L. Giupponi, "An E2E simulator for 5G NR networks," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 96, p. 101933, 2019.
105. N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena-Esteso, and J. Nin-Guerrero, "An open source product-oriented LTE network simulator based on ns-3," in *Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, 2011, pp. 293–298.
106. M. Mezzavilla, M. Zhang, M. Polese, R. Ford, S. Dutta, S. Rangan, and M. Zorzi, "End-to-end simulation of 5G mmWave networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2237–2263, 2018.

