

**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

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

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

**зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему: «Супутникова інфраструктура Інтернету речей з вузькосмуговими**  
**протоколами»**

Виконала:

студентка II курсу, групи ТЗ-311мп

Новіцька Анна Олександрівна \_\_\_\_\_

Керівник:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н.

Капштик С. В. \_\_\_\_\_

Рецензент:

Професор кафедри інституту права

та психології НУ «Львівська політехніка»

Професор, д.т.н.,

Сопільник Л. І. \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2022 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 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій КРАВЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студентці**

**Новіцькій Анні Олександрівні**

1. Тема дисертації «Супутникова інфраструктура Інтернету речей з вузькосмуговими протоколами», науковий керівник дисертації Капштик Сергій Володимирович, доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н., затверджені наказом по університету від «28» жовтня 2022 р. № 3994-с.
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2022 р.
3. Об'єкт дослідження: супутникова інфраструктура Інтернету речей з вузькосмуговими протоколами.
4. Предмет дослідження: дослідження реалізації супутникової архітектури обчислювань для систем Інтернету речей із вузькосмуговими протоколами.

## 5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- Дослідити технології, що використовуються в супутникових системах вузькосмугового Інтернету речей.
- Розробити мультипротокольную супутникову інфраструктуру Інтернету речей із вузькосмуговими протоколами.
- Дослідити особливості побудови супутникової ГСО-НГСО системи , що надає послуги Інтернету речей, та існуючі концепції хмарних, туманних та граничних обчислень в системах інтернету речей.
- Запропонувати варіанти супутникової архітектури обчислювань для систем Інтернету речей із вузькосмуговими протоколами.

## 6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

1. Використання супутникових телекомунікаційних систем для забезпечення роботи систем Інтернету речей
2. Централізована РС-архітектура
3. Структура орбітального угруповання НГСО складової супутникової інфраструктури Інтернету речей
4. Розташування розподілених супутників в орбітальній площині НГСО угруповання системи Інтернету речей
5. Формування зони обслуговування одного розподіленого супутника в протоколах LoRaWAN та NB-IoT (3GPP)
6. Взаємодія НГСО та ГСО складових супутникової інфраструктури Інтернету речей на прикладі однієї орбітальної площини НГСО складової
7. Напрямки передачі інформації в орбітальній площині сегменту НГСО для взаємодії з ГСО сегментом
8. Схема взаємодії НГСО та ГСО складових супутникової інфраструктури Інтернету речей
9. Використання супутникових систем зв'язку в системах Інтернету речей з архітектурою хмарних обчислень

10. Впровадження концепції туманних обчислень в супутникову систему Інтернету речей
11. Архітектура супутникової системи Інтернету речей, що адаптована до впровадження туманних та граничних обчислень
- 12.. Схема взаємодії пристроїв Інтернету речей із НГСО та ГСО складовими супутникової інфраструктури для реалізації хмарних та туманних обчислень

#### 7. Орієнтовний перелік публікацій

1. «Дослідження впливу ефекту Допплера на функціонування супутникової системи LoRaWAN», автори Наритник Т.М., Капштик С.В., Новіцька А.О., прийнята до друку в журналі «Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика», №1, 2021 р. (Категрія Б).
2. «Особливості забезпечення безпеки інформації в супутниковій системі Інтернету речей на базі протоколу LoRaWAN», автори Наритник Т.М., Капштик С.В., Новіцька А.О.

#### 8. Дата видачі завдання “ 10 ” вересня 2021 р.

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації                                                                 | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|
| 1     | Ознайомлення із протоколом LoRaWAN і NB-IoT. Архітектура системи. Склад системи. Призначення основних елементів | 10.09.2021-1.10.2021                             | виконано |
| 2     | Ознайомлення із особливостями протоколами LoRaWAN і NB-IoT.                                                     | 1.10.2021-1.11.2021                              | виконано |
| 3     | Пошук та опрацювання літературних джерел з теми дослідження магістерської дисертації                            | 1.11.2021-1.12.2021                              | виконано |
| 4     | Аналіз стану розвитку, впровадження та використання вузькосмугових систем для послуг Інтернету речей.           | 1.12.2021-1.01.2022                              | виконано |

|    |                                                                                                                                                                      |                      |          |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------|
| 5  | Ознайомлення із особливостями функціонування низькоорбітальних та геостаціонарних супутникових систем.                                                               | 1.01.2022-1.02.2022  | виконано |
| 6  | Ознайомлення із особливостями функціонування розподіленого супутника.                                                                                                | 1.02.2022-1.03.2022  | виконано |
| 7  | Пошук та опрацювання літературних джерел та теми граничних, туманних і хмарних обчислень.                                                                            | 1.03.2022-1.04.2022  | виконано |
| 8  | Розробка моделі багаторівневої ГСО-НГСО супутникова система Інтернету речей.                                                                                         | 1.04.2022-1.05.2022  | виконано |
| 9  | Пошук та опрацювання літературних джерел з теми дослідження магістерської дисертації                                                                                 | 1.05.2022-1.06.2022  | виконано |
| 10 | Переддипломна практика. Розробка, оформлення, узгодження та затвердження технічного завдання на дипломну роботу. Розробка проекту вступної частини дипломної роботи. | 1.09.2022-1.10.2022  | виконано |
| 11 | Аналіз реалізації граничних та туманних обчислень із використанням НГСО орбітальної обчислювальної мережі.                                                           | 1.10.2022-1.11.2022  | виконано |
| 12 | Дослідження ГСО складової для забезпечення хмарних обчислень. Підготовка фінальної редакції розділів 1, 2, 3 дипломної роботи                                        | 1.11.2022-1.12.2022  | виконано |
| 13 | Оформлення магістерської дисертації                                                                                                                                  | 1.12.2022-10.12.2022 | виконано |

Студент

Анна НОВІЦЬКА

Науковий керівник дисертації

Сергій КАПШТИК

## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської дисертації містить 135 сторінок, 64 рисунки, 17 таблиці. Було використано 23 джерела інформації.

**Актуальність.** Впровадження супутникових систем IoT в поєднанні із стільниковими IoT є перспективним напрямком досліджень для широкомасштабного багатоцільового розгортання IoT. Оскільки, магістерська дисертація присвячена актуальній темі створення реалізації супутникової архітектури обчислювань для систем Інтернету речей із вузькосмуговими протоколами з використанням концепції хмарних, туманних та граничних обчислень в системах Інтернету речей. Тому дана тема є актуальною.

**Метою** даної роботи є дослідження особливості побудови супутникової ГСО-НГСО системи, що надає послуги Інтернету речей, та концепції хмарних, туманних та граничних обчислень в системах Інтернету речей, що оптимізовані до вимог мереж і використовує в якості базового протокол LoRaWAN та NB-IoT.

**Об'єкт дослідження** –супутникова інфраструктура Інтернету речей з вузькосмуговими протоколами.

**Предмет дослідження** – дослідження реалізації супутникової архітектури обчислювань для систем Інтернету речей із вузькосмуговими протоколами.

**Наукова новизна** роботи полягає у створенні покращеної супутникової телекомунікаційної системи та можливості адаптувати до особливостей інформаційних потоків систем IoT, які використовують технології туманних та граничних обчислень для підвищення власної ефективності

**Апробація.** Результати, що включені у дану роботу, були оприлюднені на двох міжнародних наукових конференціях:

1. XV Міжнародна Науково-технічна Конференція "ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ 2021" 12.04-16.04.2021р. на базі Інституту телекомунікаційних систем та НДІ телекомунікацій НТУУ "КПІ";

**Публікації:** Результати досліджень опубліковано в статті в профільному журналі:

1. «Дослідження впливу ефекту Доплера на функціонування супутникової системи LoRaWAN», автори Наритник Т.М., Капшик С.В., Новіцька А.О., прийнята до друку в журналі «Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика», №1, 2021 р. (Категрія Б).
2. «Особливості забезпечення безпеки інформації в супутниковій системі Інтернету речей на базі протоколу LoRaWAN», автори Наритник Т.М., Капшик С.В., Новіцька А.О.

**Ключові слова:** IoT, LoRaWAN , NB-IoT, розподілений супутник, супутникова низькоорбітальна система, геостаціонарна орбіта, туманні обчислення, граничні обчислення, хмарні обчислення.

## ABSTRACT

The text part of the master's thesis contains 135 pages, 64 figures, 17 tables. 23 sources of information were used.

**Topicality.** The implementation of satellite IoT systems combined with cellular IoT is a promising research area for large-scale multi-purpose IoT deployment. Since, the master's thesis is devoted to the current topic of creating the implementation of a satellite computing architecture for Internet of Things systems with narrowband protocols using the concept of cloud, fog and edge computing in Internet of Things systems. Therefore, this topic is relevant.

**The purpose** of this work is to study the features of the construction of a satellite GSO-NGSO system that provides Internet of Things services, and the concepts of cloud, fog, and edge computing in Internet of Things systems that are optimized for network requirements and use the LoRaWAN and NB-IoT protocols as a base.

**The object** of research is the satellite infrastructure of the Internet of Things with narrowband protocols.

**The subject** of the study is the study of the implementation of satellite computing architecture for Internet of Things systems with narrowband protocols.

**The scientific novelty** of the work consists in the creation of an improved satellite telecommunication system and the ability to adapt to the specifics of the information flows of IoT systems that use fog and edge computing technologies to improve their own efficiency

**Approbation.** The results included in this work were published at two international scientific conferences:

1. XV International Scientific and Technical Conference "PROBLEMS OF TELECOMMUNICATIONS 2021" April 12-16, 2021. on the basis of the Institute of Telecommunication Systems and Research Institute of Telecommunications of NTUU "KPI";

**Publications:** Research results were published in an article in a specialized journal:



1. "Investigation of the influence of the Doppler effect on the functioning of the LoRaWAN satellite system", authors T.M. Narytnyk, S.V. Kapshtyk, A.O. Novitska, accepted for publication in the journal "Informatics, computing technology and cybernetics", No. 1, 2021 (Category B).

2. "Features of ensuring information security in the Internet of Things satellite system based on the LoRaWAN protocol", authors T.M. Narytnyk, S.V. Kapshtyk, A.O. Novitska.

**Keywords:** IoT, LoRaWAN, NB-IoT, distributed satellite, satellite low-orbit system, geostationary orbit, fog computing, edge computing, cloud computing.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВСТУП.....                                                                                                      | 14  |
| РОЗДІЛ 1.....                                                                                                   | 17  |
| ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ<br>ВУЗЬКОСМУГОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....                 | 17  |
| 1.1        Технологія Інтернету речей .....                                                                     | 17  |
| 1.2        Технологія LoRaWAN .....                                                                             | 22  |
| 1.3        Протокол NB-IoT та взаємодія із мережами 5G .....                                                    | 35  |
| 1.4 Впровадження низькоорбітальних супутникових систем для послуг<br>вузькосмугового Інтернету речей.....       | 54  |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                   | 59  |
| РОЗДІЛ 2.....                                                                                                   | 61  |
| РОЗРОБКА МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНОЇ СУПУТНИКОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ<br>ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ІЗ ВУЗЬКОСМУГОВИМИ ПРОТОКОЛАМИ ..... | 61  |
| 2.1. Багаторівнева ГСО-НГСО супутникова система Інтернету речей .....                                           | 61  |
| 2.2 НГСО складова системи на базі архітектури розподіленого супутника.....                                      | 66  |
| 2.3. ГСО складова телекомунікаційної супутникової інфраструктури Інтернету<br>речей .....                       | 83  |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                   | 90  |
| РОЗДІЛ 3.....                                                                                                   | 92  |
| СУПУТНИКОВА АРХІТЕКТУРА ОБЧИСЛЮВАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТУ<br>РЕЧЕЙ ІЗ ВУЗЬКОСМУГОВИМИ ПРОТОКОЛАМИ .....          | 92  |
| 3.1. Використання концепції хмарних, туманних та граничних обчислень в<br>системах Інтернету речей.....         | 92  |
| 3.2 Реалізація граничних та туманних обчислень із використанням НГСО<br>орбітальної обчислювальної мережі. .... | 104 |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3 ГСО складова для забезпечення хмарних обчислень.....     | 118 |
| ВИСНОВКИ.....                                                | 123 |
| РОЗДІЛ 4 .....                                               | 125 |
| РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....                               | 125 |
| 4.1 Опис ідеї проекту .....                                  | 125 |
| 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....                    | 126 |
| 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту..... | 127 |
| 4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту ..... | 135 |
| ВИСНОВКИ.....                                                | 138 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....                            | 139 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                              | 141 |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

|         |                                    |                                                                     |
|---------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| AES     | Advanced Encryption Standard       | Симетричний алгоритм блочного шифрування                            |
| CC      | Cloud Computing                    | Хмарні обчислення                                                   |
| DL      | Downlink                           | Низхідний канал                                                     |
| ISL     | Inter-Switch Link                  | Міжсупутникова лінія зв'язку                                        |
| FC      | Fog Computing                      | Туманні обчислення                                                  |
| GEO     | Geostationary Orbit                | Геостаціонарна орбіта                                               |
| GSM     | Groupe Spécial Mobile              | Глобальна система мобільного зв'язку                                |
| GPS     | Global Positioning System          | Система глобального позиціювання                                    |
| GW      | Gateway                            | Шлюз                                                                |
| HSS     | Home Subscriber Server             | Сервер абонентських даних                                           |
| HTS     | High-Throughput Satellite          | Висока пропускна здатність супутників                               |
| IoT     | Internet of Things                 | Інтернет речей                                                      |
| IP      | Internet Protocol                  | Протокол мережевого рівня                                           |
| LEO     | Low Earth Orbit                    | Низька навколоземна орбіта                                          |
| LORA    | Long Range                         | Велика відстань                                                     |
| LORAWAN | Long Range Wide-Area Networks      | Технологію енергоефективних мереж дальнього радіусу дії             |
| LPWAN   | Low Power Wide Area Network        | Системи передачі інформації на великі відстані із малим споживанням |
| LTE     | Long Term Evolution                | Мобільного протоколу передавання даних                              |
| MAC     | Medium Access Control              | Управління доступом до посередників                                 |
| M2M     | Machine-To-Machine                 |                                                                     |
| NB-IoT  | Narrow Band Internet of Things     | Вузькосмуговий інтернет речей                                       |
| OSI     | Open Systems Interconnection Model | Еталонна модель взаємодії відкритих систем                          |

|          |                                            |                                                             |
|----------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| OFDM     | Orthogonal Frequency-Division Multiplexing | Мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів |
| VSAT     | Very Small Aperture Terminal               | Мала супутникова наземна станція                            |
| 3GPP     | 3rd Generation Partnership Project         | Партнерська асоціація груп телекомунікаційних компаній      |
| 3G/4G/5G | 3/4/5 Generation                           | 3/4/5 покоління                                             |

## ВСТУП

Сучасний стан світової галузі інфокомунікацій характеризується динамічним розвитком в багатьох напрямках. Розробляються та впроваджуються нові технології передачі та використання інформації, модернізуються вже існуючі.

Інтернет речей - це не просто безліч різних приборів і датчиків, об'єднаних між собою провідними та безпроводними каналами зв'язку та підключення до мережі Інтернет, а це більш тісна інтеграція реального та віртуального світу, в якому спілкування здійснюється між людьми та пристроями.

Оскільки технологія IoT вже зарекомендувала себе комфортно в наших домівках, громадських місцях, офісах і на фабриках, і враховуючи шалені темпи її розвитку, здається, що заїжджена фраза IoT «все, що можна підключити, буде підключено» стає все ближче до нашої щоденної реальності. Тому справжнє питання має полягати не в тому, коли це станеться, а скоріше в тому, як слід встановити з'єднання, щоб досягти найвищої можливої ефективності, зберігаючи такі ключові характеристики, як безпека та економічна ефективність. Враховуючи цей підхід, розгортання, яке передбачає велику кількість малопотужних пристроїв із низькою пропускнуою здатністю, легкий протокол, розроблений спеціально для керування такими машинами з обмеженими ресурсами. Тому, якщо дивитися з такої практичної точки зору, питання успіху у випадку певних додатків IoT зводиться до вибору відповідної технології IoT із величезного спектру існуючих рішень.

Мережі IoT, як правило, розгортаються на існуючій стільниковій інфраструктурі. Традиційні пристрої IoT використовують стільникові мережі для підключення до Інтернету, однак стільникові мережі мають серйозні обмеження щодо доступності у віддалених місцях.

Використання IoT з роками розширилися й охоплюють сільські та віддалені програми, як-от моніторинг електростанцій, нафто- та газопроводів, розумні міста, сільськогосподарські операції, точки продажу, рішення безпеки тощо.

З роками мережеві послуги, що надаються супутниковими угрупованнями, стали доступнішими. Послуги Інтернету речей, які надають супутники, можуть

подолати обмеження масштабованості, забезпечуючи справді глобальне підключення, яке може охоплювати навіть пристрої з обмеженим доступом або без доступу до наземних мереж. Супутники можуть навіть забезпечувати зв'язок у місцях, які мають недостатньо розвинену інфраструктуру або взагалі її немає, як-от великі моря та океани, гірські регіони, віддалені райони з суворими екологічними умовами тощо.

Супутниковий IoT розробляється, щоб доповнити стільниковий IoT, а не повністю замінити наземні мережі IoT. Найновіші стандарти та конфігурації як супутникового, так і стільникового зв'язку дозволяють формувати комбіновані гібридні мережі, щоб скористатися перевагами найкращих характеристик обох типів мереж і максимально збільшити глобальне підключення. Зараз він використовується там, де наземні мережі недоступні або не можуть бути налаштовані.

Таким чином, впровадження супутникових систем IoT в поєднанні із стільниковими IoT є перспективним напрямком досліджень для широкомасштабного багатоцільового розгортання IoT.

В теперішній час хмарна архітектура є переважаючою в системах IoT. Але пропорційний розподіл обчислювального навантаження в системі дозволяє оптимізувати систему та значно підвищити її ефективність.

Ефективним методом побудови телекомунікаційної системи, яка здатна забезпечити глобальне покриття для надання послуг IoT, є створення системи супутникового зв'язку. Для систем супутникового зв'язку, орієнтованих на надання послуг IoT, особливий інтерес становить використання низької навколоземної орбіти (LEO, Low Earth Orbit). Серед переваг LEO-орбіти — близькість до поверхні Землі, що забезпечує мінімальну тривалість затримки при передачі сигналу та мінімальну необхідну потужність передавального пристрою супутникової радіолінії.

В свою чергу геостаціонарна (ГСО) складова телекомунікаційної системи супутникової інфраструктури Інтернету речей призначена для забезпечення доступу усіх елементів супутникової інфраструктури до орбітального хмарного

сховища даних. ГСО супутники працюють десятиліттями, і вони можуть постійно оновлювати своє програмне забезпечення, що означає надійного технологічного.

Космічний сегмент хмарних серверів є позитивним фактором підвищення оперативності обробки, зберігання та забезпечення доступу систем IoT до хмарних сервісів. Доступ до орбітального хмарного сховища даних може здійснюватися через модернізовані геостационарні супутники високої пропускної здатності та через НГСО угруповання супутникової інфраструктури.

Саме тому в даній роботі застосовується багаторівнева ГСО-НГСО супутникова система інтернету речей на базі вузькосмугових протоколів.



## РОЗДІЛ 1.

### ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ ВУЗЬКОСМУГОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.

#### 1.1 Технологія Інтернету речей

Сучасний стан світової галузі інфокомунікацій характеризується динамічним розвитком в багатьох напрямках. Розробляються та впроваджуються нові технології передачі та використання інформації, модернізуються вже існуючі.

Важливою складовою частиною сучасних інфокомунікацій є Інтернет речей (англ. Internet of Things, IoT). За визначенням, що наведено в електронній енциклопедії «Вікіпедія», Інтернет речей — концепція мережі, що складається із взаємозв'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані давачі, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами в автоматичному режимі, за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку. Окрім давачів, мережа може мати виконавчі пристрої, вбудовані у фізичні об'єкти і пов'язані між собою через дротові чи бездротові мережі. Ці взаємопов'язані пристрої мають можливість зчитування та приведення в дію, функцію програмування та ідентифікації, а також дозволяють виключити необхідність участі людини, за рахунок використання інтелектуальних інтерфейсів” [1]. Таким чином, Інтернет речей – це є інформаційна технологія, яка призначена для виконання широкого спектру функціональних завдань при мінімальній участі людини, та яка використовує різноманітні датчики, що перетворюють контрольовані параметри фізичних процесів в придатні для передачі по каналах зв'язку електричні сигнали, та навпаки, на підставі отриманих електричних сигналів здійснює певний вплив на контрольовані фізичні процеси, спирається на телекомунікаційну інфраструктуру для забезпечення внутрішнього інформаційного обміну, та на обчислювальні програмно-апаратні засоби для обробки інформації та прийняття відповідних управлінських рішень.

Інтернет речей - це не просто безліч різних приборів і датчиків, об'єднаних між собою провідними та безпроводними каналами зв'язку та підключення до

мережі Інтернет, а це більш тісна інтеграція реального та віртуального світу, в якому спілкування здійснюється між людьми та пристроями [2]. Парадигма IoT передбачає різноманітні програми для передбачуваної більш розумної планети. Отримані результати з додатків усіх подій у просторі IoT - це ряд інтелектуальних та інтерактивних робочих середовищ, таких як розумні будинки та офіси, дистанційно контрольовані виробничі процеси, інтелектуальний транспорт без водіїв, контроль стану здоров'я людини та екологічних показників навколишнього середовища, тощо. Інтелектуальне середовище IoT, як правило, складається з масиву нескінченно малих інтелектуальних електронних речей, здатних сприймати контекст, діяти та реагувати, виходячи з подій у середовищі.

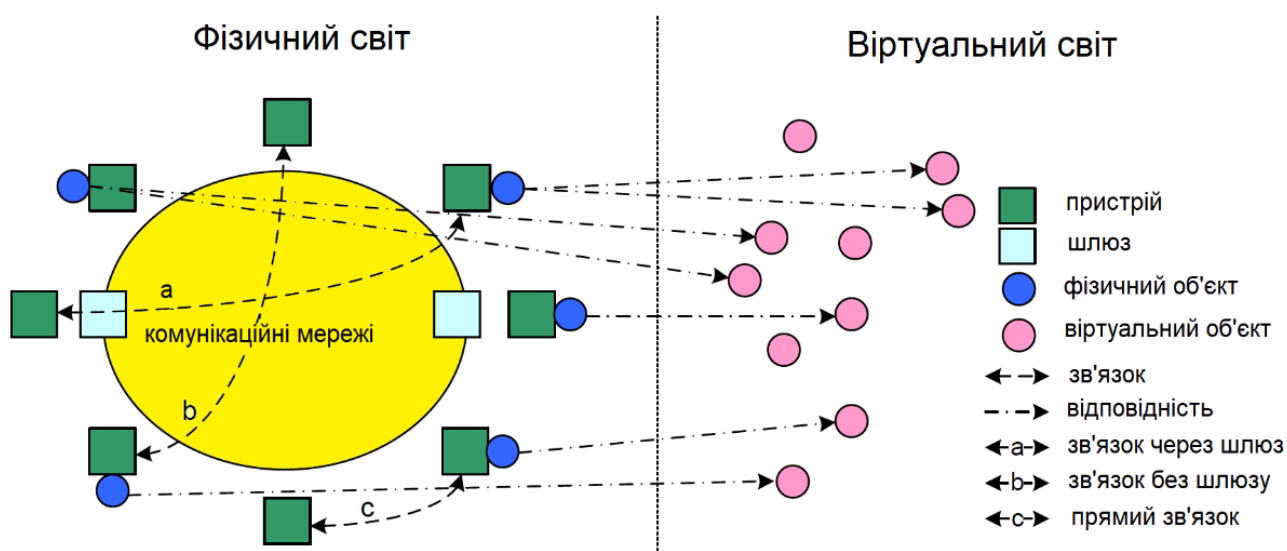


Рис.1.1 Відображення реальних фізичний пристроїв у віртуальному світі Інтернету речей

IoT працює за принципом з'єднання пристроїв із центральною або домашньою комп'ютерною мережею та комп'ютером або дата-центром. Кожен пристрій спілкується через мережу із комп'ютером або дата-центром і для здійснення певних функцій контролю і впливу на контрольовані фізичні процеси. Джерелом, або давачем інформації IoT може бути відеокамера, датчик температури, мікрофон, вимикач світла, сигналізація, замок, монітор розташування або годівниця для домашніх тварин та безліч інших пристроїв. Якщо його можна оцифрувати, тобто перевести фізичний контрольований параметр у форму

електричного сигналу і перевести значення електричного сигналу в цифрову форму, його можна перевести в дані за ціною споживача. Ідеологія Інтернету речей передбачає, що кожен фізичний пристрій, який обладнаний засобами перетворення фізичних параметрів в цифровий код, представляється у віртуальному просторі інтернету речей як віртуальний об'єкт (див. рис.1.1)

### Площини технологій IoT

Для простоти можна розбити стек технологій IoT на чотири основні технологічні площини, задіяних у забезпеченні роботи Інтернету речей.

#### *Апаратне забезпечення*

Пристрої — це об'єкти, які фактично представляють «речі» в Інтернеті речей. Існує дві великі групи пристроїв IoT: датчики, тобто пристрої, які перетворюють контрольовані показники фізичних параметрів в електричні сигнали, та актуатори або приводи, тобто пристрої, що згідно отриманих електричних сигналів здійснюють фізичний вплив на контрольований фізичний процес. Діючи як інтерфейс між реальним та цифровим світами, вони можуть використовувати різні розміри, форми та рівні технологічної складності залежно від завдання, які вони повинні реалізовувати в рамках конкретного застосунку IoT. У віртуальному середовищі IoT незалежно від того, розмір мікрофона із шпилькову голівку чи важкі будівельні машини, практично будь-який матеріальний об'єкт (навіть живий, як тварини чи люди) можна змінити на під'єднаний пристрій шляхом додавання необхідного інструментарію (додавання датчиків або приводів разом із відповідним). програмним забезпеченням) до виміряти та зібрати забезпечення даних. Очевидно, що датчики, приводи та інше телеметричне обладнання також можуть бути самостійними розумними пристроями.

#### *Програмне забезпечення*

Саме програмне забезпечення в поєднанні із елементами штучного інтелекту насправді роблять підключені пристрої «розумними». Програмне забезпечення відповідає за перетворення контрольованих фізичних параметрів в

інформаційні пакети, які надходять в екосистему Інтернету речей, за адекватність та точність такого перетворення, за взаємодію із телекомунікаційною інфраструктурою для забезпечення інформаційного обміну між елементами системи Інтернету речей, за збір даних, інтеграції пристроїв, а також виконання аналізу даних у реальному часі в мережі IoT. Актуальним питанням програмного забезпечення систем Інтернету речей стає інтеграція елементів штучного інтелекту, що беззаперечно підвищує ефективність функціонування таких систем. Більше того, програмне забезпечення пристрою також надає можливості на рівні додатків / застосунків, щоб користувачі могли візуалізувати дані та взаємодіяти з системою IoT.

### *Телекомунікації*

На додаток до апаратного та програмного забезпечення пристрою і системи IoT, потрібний ще один рівень, який забезпечує циркуляцію інформації в екосистемі IoT. Хоча це правда, що механізми зв'язку тісно пов'язані з апаратним і програмним забезпеченням пристрою, важливо розглядати їх як окремий рівень. Комунікаційний рівень включає як телекомунікаційні рішення для підключення пристроїв IoT на базі сталих універсальних / багатофункціональних телекомунікаційних технологій (стільникові мережі, супутниковий зв'язок, локальна проводова / бездротова мережа), так і спеціальні протоколи, які використовуються в різних середовищах IoT (ZigBee, Thread, Z-Wave, MQTT, LwM2M). Вибір відповідного комунікаційного рішення є важливою складовою у створенні кожного застосунку технологій IoT. Вибрана технологія визначатиме не лише способи надсилання / утримання даних у хмарі, а й те, як керувати пристроями та як вони обмінювалися даними зі сторонніми пристроями. Зважаючи на особливості надання послуг IoT та застосовуваних телекомунікаційних технологій окреме місце в розвитку екосистеми IoT займають комплексні рішення, які передбачають використання різних за принципом функціонування телекомунікаційних технологій для формування наскрізних каланів і трактів. З призначенням цієї статті ми розглянемо деталі деяких із сучасних комунікаційних рішень далі в тексті.

## *Платформа*

Сукупність «розумної» складової, що реалізує прикладні завдання системи IoT і представлена алгоритмічним забезпеченням, та встановленого на пристрої IoT програмного забезпечення, здатного «відчувати», що відбувається навколо нього, і програмного забезпечення, що встановлене на віддаленому комп'ютері, який накопичує, аналізує та узагальнює інформацію від пристроїв IoT, пропонує/приймає певні управлінські рішення і повідомляє про це користувача через обраний канал зв'язку, система IoT формує Платформу IoT. Платформа IoT — це місце, де всі ці дані збираються, керуються, обробляються, аналізуються, виробляються керуючі дії та представляються споживачу — людині в зручний спосіб. Таким чином, особливо цінним в Платформі IoT, є не тільки здатність забезпечити збір та накопичення даних, і керування пристроями IoT, а її здатність аналізувати, сортувати, розміщувати корисну інформацію і на частин даних підставі формувати узагальнену оцінку за допомогою комплексного аналізу поточного стану контрольованого фізичного процесу та приймати управлінські рішення щодо впливу на контрольований процес. На ринку існує багато платформ IoT, вибір яких залежить від вимог конкретного проекту IoT і таких факторів, як архітектура та стек технологій IoT, надійність, властивості настройки, використані протоколи, агностицизм апаратного забезпечення, безпека та вартість, ефективність. Варто також зазначити, що платформи можуть бути встановлені локально або хмарно. Платформа Coiote - Платформа керування пристроями IoT є хорошим прикладом такої платформи, після чого її можна розгорнути як на місці, так і в хмарі. Це ж стосується іншої платформи IoT від AVSystem — Coiote IoT Data Orchestration [3].

Оскільки технологія IoT вже зарекомендувала себе комфортно в наших домівках, громадських місцях, офісах і на фабриках, і враховуючи шалені темпи її розвитку, здається, що заїжджена фраза IoT «все, що можна підключити, буде підключено» стає все ближче до наша щоденна реальність. Тому справжнє питання має полягати не в тому, коли це станеться, а скоріше в тому, як слід встановити з'єднання, щоб досягти найвищої можливої ефективності, зберігаючи

такі ключові характеристики, як безпека та економічна ефективність. Враховуючи цей підхід, розгортання, яке передбачає велику кількість малопотужних пристроїв із низькою пропускну здатністю, легкий протокол, розроблений спеціально для керування такими машинами з обмеженими ресурсами. Тому, якщо дивитися з такої практичної точки зору, питання успіху у випадку певних додатків IoT зводиться до вибору відповідної технології IoT із величезного спектру існуючих рішень.

## 1.2 Технологія LoRaWAN

Історія розвитку систем передачі інформації на великі відстані із малим споживанням, які скорочено позначаються як LPWAN, почалась задовго до того, коли в 2009 році французька компанія Sigfox запустила в не ліцензованому діапазоні частот безпроводову мережу LoRaWAN. Метою компанії було підключення до мережі об'єктів, для роботи яких не потрібно багато енергії [4].



Рис.1.2 Хронологія розвитку технологій глобальних енергоефективних мереж великого радіусу дії LPWAN

В березні 2015 року дослідницький центр IBM Research та компанія Semtech представили нову технологію енергоефективних мереж дальнього радіусу дії LoRaWAN (скорочення від англійської назви: Long Range Wide-Area Networks). Презентована технологія мала ряд переваг в порівнянні із стільниковими мережами та технологією Wi-Fi для забезпечення M2M-комунікацій [5]. Для підтримки та

подальшого розвитку технології LPWAN, компанії IBM, Semtech та ряд інших (ST, Cisco и т.д.), оголосили про створення LoRa Alliance – нової асоціації для підтримки, розвитку та стандартизації LoRaWAN.

Протокол LoRaWAN забезпечує двосторонній зв'язок між вузлами мережі та має власні методи шифрування для забезпечення надійності та безпеки передачі інформації. В основу протоколу покладена патентована компанією Semtech технологія модуляції LoRa, яка утворює фізичний рівень протоколу. LoRaWAN – це протокол рівня доступу до середи передачі MAC-рівень.

### *Архітектура системи LoRaWAN*

Спрощена архітектура мережі LoRaWAN наведена на рис. 1.3. Прикінцеві вузли взаємодіють із сервером мережі сети через шлюз. Зв'язок між прикінцевим вузлом та шлюзом здійснюється за допомогою модуляції LoRa (назва походить від скорочення англ. Long Range). Зв'язок на цій ланці можливий із різними швидкостями передачі інформації. Сервери мережі управляють шлюзами GW із використанням стандартної IP-технології. Кадри інформації, які відправляються прикінцевими вузлами, через шлюз поступають до сервера мережі, де в загальному потоці із використанням технології тунелювання передаються до серверів додатків.

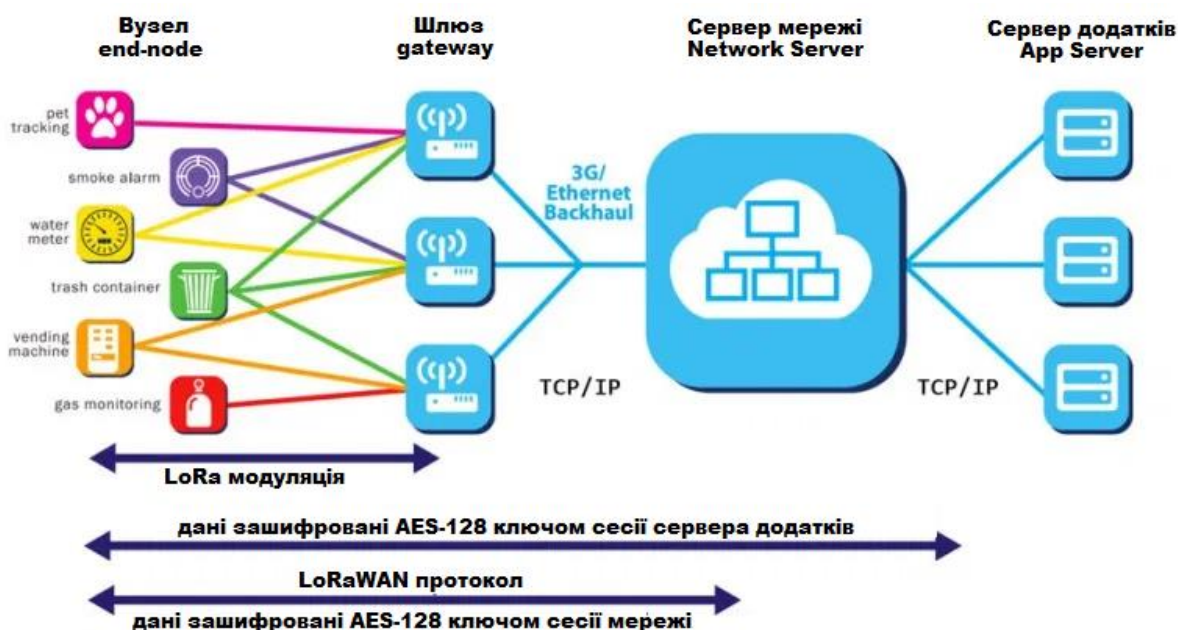


Рис.1.3 Архітектура мережі LoRaWAN

Мережна архітектура LoRaWAN розгорнута в топології «зірка зірки», в якій шлюзи ретранслюють повідомлення між кінцевими пристроями та центральним мережевим сервером. Шлюзи підключаються до сервера мережі через стандартні IP-з'єднання та діють як прозорий міст, просто перетворюючи RF-пакети в IP-пакети і навпаки. Бездротовий зв'язок використовує переваги довгострокового зв'язку фізичного рівня LoRa, що дозволяє встановити з'єднання з одним стрибком між кінцевим пристроєм і одним або багатьма шлюзами. Усі режими підтримують двонаправлений зв'язок, а також є підтримка групової багатоадресної адресації для ефективного використання спектру під час виконання таких завдань, як оновлення прошивки по повітрю (FOTA) або інших повідомлень масового розповсюдження.

Типова мережа LoRaWAN складається з наступних елементів:

- Кінцеві пристрої - датчики або виконавчі механізми надсилають модульовані бездротові повідомлення LoRa до шлюзів або отримують повідомлення без проводів назад від шлюзів.
- Шлюзи - приймають повідомлення від кінцевих пристроїв і пересилають їх на мережевий сервер.
- Сервер мережі - частина програмного забезпечення, що працює на сервері та керує всією мережею.
- Сервери додатків - частина програмного забезпечення, що працює на сервері і відповідає за безпечну обробку даних додатків.
- Сервер приєднання — частина програмного забезпечення, що працює на сервері, яке обробляє повідомлення із запитом на приєднання, надіслані кінцевими пристроями (Сервер приєднання не показано на малюнку вище).

Кінцеві пристрої спілкуються з найближчими шлюзами, і кожен шлюз підключено до сервера мережі. Мережі LoRaWAN використовують протокол на основі ALOHA, тому кінцевим пристроям не потрібно з'єднуватися з певними шлюзами. Повідомлення, надіслані з кінцевих пристроїв, проходять через усі шлюзи в межах досяжності. Ці повідомлення отримує сервер мережі. Якщо сервер



мережі отримав кілька копій одного повідомлення, він зберігає одну копію повідомлення та відкидає інші. Це відомо як дедуплікація повідомлень.

Розглянемо кожен елемент мережі LoRaWAN докладніше.

### **Кінцеві пристрої**

Кінцевий пристрій LoRaWAN може бути датчиком, приводом або тим і іншим. Часто вони працюють від акумулятора. Ці кінцеві пристрої бездротово підключаються до мережі LoRaWAN через шлюзи за допомогою радіочастотної модуляції LoRa. На наступному малюнку показано кінцевий пристрій, який складається з датчиків температури, вологості та датчиків падіння.

### **Шлюзи**

Кожен шлюз зареєстровано (за допомогою параметрів конфігурації) на сервері мережі LoRaWAN. Шлюз отримує повідомлення LoRa від кінцевих пристроїв і просто пересилає їх на сервер мережі LoRaWAN. Шлюзи підключаються до мережевого сервера за допомогою **транзитного зв'язку**, наприклад стільникового зв'язку (3G/4G/5G), WiFi, Ethernet, оптоволоконного або радіоканалу 2,4 ГГц.

### **Сервер мережі**

Сервер мережі керує шлюзами, кінцевими пристроями, програмами та користувачами у всій мережі LoRaWAN.

Типовий сервер мережі LoRaWAN має такі особливості:

- Встановлення захищених 128-розрядних з'єднань AES для передачі повідомлень між кінцевими пристроями та сервером додатків (наскрізна безпека).
- Перевірка автентичності кінцевих пристроїв і цілісності повідомлень.
- Дедуплікація повідомлень висхідної лінії зв'язку.
- Вибір найкращого шлюзу для маршрутизації повідомлень низхідної лінії.

- Надсилання команд ADR для оптимізації швидкості передачі даних пристроїв.
- Перевірка адреси пристрою.
- Надання підтвердження підтверджених повідомлень даних висхідної лінії зв'язку.
- Пересилання корисних навантажень програми висхідної лінії зв'язку на відповідні сервери програм
- Маршрутизація корисних навантажень додатків висхідної лінії зв'язку на відповідний сервер додатків.
- Пересилання повідомлень Join-request і Join-accept між пристроями та сервером приєднання
- Відповідає на всі команди рівня MAC.

### **Сервер додатків**

Сервер додатків обробляє повідомлення даних, що стосуються програми, отримані від кінцевих пристроїв. Він також генерує всі корисні дані низхідного рівня прикладної лінії та надсилає їх на підключені кінцеві пристрої через мережевий сервер. Мережа LoRaWAN може мати більше одного сервера додатків. Зібрані дані можна інтерпретувати, застосовуючи такі методи, як машинне навчання та штучний інтелект для вирішення бізнес-проблем.

### **Сервер приєднання**

Сервер приєднання допомагає безпечно активувати пристрій, зберігати кореневий ключ і генерувати ключ сеансу. Процедура приєднання ініціюється кінцевим пристроєм шляхом надсилання повідомлення із запитом на приєднання на сервер приєднання через мережевий сервер. Сервер Join обробляє повідомлення Join-request, генерує ключі сеансу та передає NwkSKey і AppSKey на сервер мережі та сервер додатків відповідно. Сервер приєднання вперше був представлений у LoRaWAN v1.1. Він також доступний у LoRaWAN v1.0.4 [6].

### *Класи кінцевих пристроїв LoRaWAN*

LoRaWAN має три різні класи кінцевих пристроїв для задоволення різних потреб, відображених у широкому діапазоні застосувань:

#### 1. Клас А – найменша потужність, двонаправлені кінцеві пристрої:

Клас за замовчуванням, який має підтримуватися всіма кінцевими пристроями LoRaWAN, зв'язок класу А завжди ініціюється кінцевим пристроєм і є повністю асинхронним. Кожна передача по висхідній лінії зв'язку може бути надіслана в будь-який час і супроводжується двома короткими вікнами низхідної лінії зв'язку, що дає можливість для двонаправленого зв'язку або команд керування мережею, якщо це необхідно. Це тип протоколу ALOHA. Кінцевий пристрій може переходити в режим сну з низьким енергоспоживанням на стільки часу, скільки визначено його власною програмою: для періодичного пробудження немає вимог до мережі. Це робить режим роботи класу А з найменшим енергоспоживанням, але дозволяє зв'язок по висхідній лінії зв'язку в будь-який час.

Оскільки зв'язок по низхідній лінії зв'язку завжди має слідувати за передачею по висхідній лінії зв'язку за розкладом, визначеним програмою кінцевого пристрою, зв'язок по низхідній лінії зв'язку має буферизуватися на мережевому сервері до наступної події висхідної лінії зв'язку.

#### 2. Клас В – двонаправлені кінцеві пристрої з детермінованою затримкою низхідної лінії зв'язку:

На додаток до вікон прийому, ініційованих класом А, пристрої класу В синхронізуються з мережею за допомогою періодичних маяків і відкривають «пінгові слоти» низхідної лінії зв'язку в запланований час. Це надає мережі можливість надсилати зв'язок по низхідній лінії зв'язку з детермінованою затримкою, але за рахунок деякого додаткового споживання енергії кінцевим пристроєм. Затримку можна програмувати до 128 секунд відповідно до різних додатків, а додаткове енергоспоживання достатньо низьке, щоб усе ще діяти для додатків, що живляться від батареї.

### 3. Клас С – найнижча затримка, двонаправлені кінцеві пристрої:

На додаток до структури висхідної лінії зв'язку класу А, за якою слідують два вікна низхідної лінії зв'язку, клас С додатково зменшує затримку на низхідній лінії зв'язку, утримуючи приймач кінцевого пристрою відкритим увесь час, коли пристрій не передає (напівдуплекс). Виходячи з цього, мережевий сервер може ініціювати передачу по низхідній лінії зв'язку в будь-який час за умови, що приймач кінцевого пристрою відкритий, тому немає затримки. Компромісом є енергоспоживання приймача (до ~50 мВт), тому клас С підходить для застосувань, де доступне постійне живлення.

Для пристроїв із живленням від батареї можливе тимчасове перемикання режимів між класами А та С, що корисно для періодичних завдань, таких як оновлення мікропрограми по повітрю [7].

#### *Безпека в мережах LoRa*

Безпека є головною проблемою для будь-якого масового розгортання IoT, і специфікація LoRaWAN<sup>®</sup> визначає два рівні криптографії:

- Унікальний 128-розрядний ключ мережевого сеансу (NwkSKey), спільний між кінцевим пристроєм і мережевим сервером.
- Унікальний 128-бітний ключ сеансу додатка (AppSKey), наскрізний загальний на рівні додатка.
- Алгоритми AES використовуються для забезпечення автентифікації та цілісності пакетів для мережевого сервера та наскрізного шифрування для сервера додатків. Забезпечуючи ці два рівні, стає можливим реалізувати «багатокористувацькі» спільні мережі без того, щоб оператор мережі міг бачити дані корисного навантаження користувачів.

Ключі можуть бути активовані за допомогою процедури (ABP) на виробничій лінії або під час введення в експлуатацію, або можуть бути активовані по повітрю (OTAA) у польових умовах. OTAA дозволяє за потреби переключати пристрої [8].

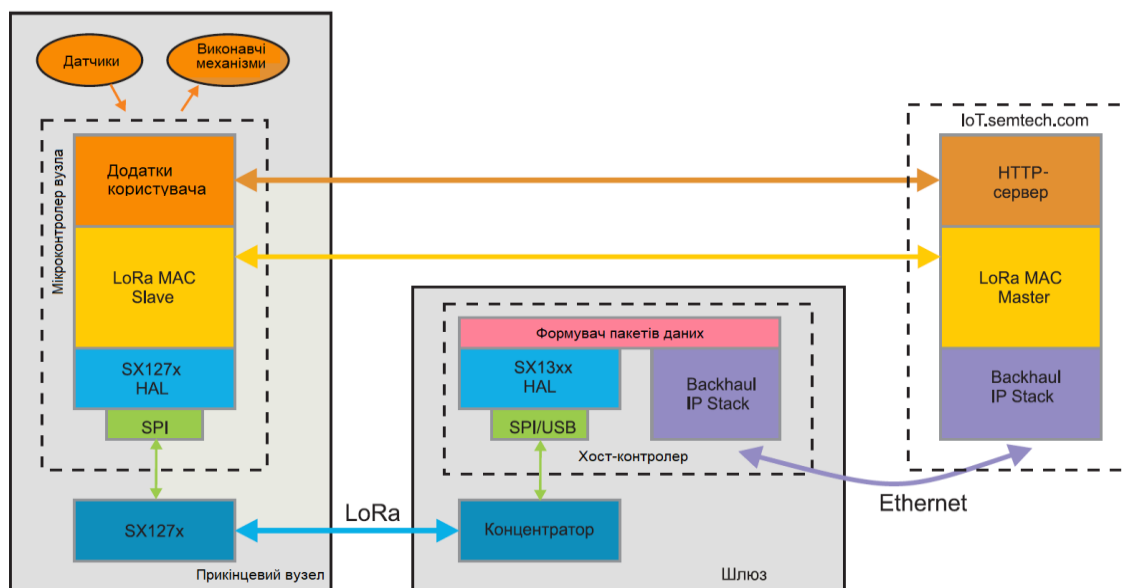


Рис.1.4 Спрощена схему взаємодії вузлів системи LoRaWAN при наданні послуг Інтернету речей

### Модуляція LoRa

Протокол LoRaWAN побудований на основі оригінального методу лінійно-частотної модуляції LoRa, розроблений та запатентований компанією Semtech. Метод модуляції LoRa придатний до використання в системах, що реалізують протокол доступу типу ALOHA, забезпечує високу захищеність від завад, і надає можливість регулювання швидкості передачі інформації в залежності від умов функціонування радіоканалу та наявної смуги частот.

Фізичний рівень LoRa заснований на використанні широкосмугових радіосигналів з великою базою B, значення якої багато більше одиниці [9]. Частотна надмірність широкосмугового радіосигналу обумовлює його високу стійкість щодо впливу радіозавад, а вузька кореляційна функція – високу точність часової синхронізації.

Широкосмуговий радіосигнал LoRa – це сигнал з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) або англійською CSS (Chirp Spread Spectrum). Частота CSS радіосигналу може як збільшуватися (up-chirp), так і зменшуватися (down-chirp).

### Синхронізація приймача і передавача

Технологія LoRa використовує асинхронний режим прийому-передачі при якому передавач може почати генерацію радіосигналу в будь-який момент часу. В цьому випадку потрібний механізм, що забезпечує синхронізацію приймача по сигналу від передавача. В якості такого механізму використовується преамбула, що передує кожному сеансу зв'язку. Преамбула містить послідовність символів, що дозволяє приймачу виявити активність передавача, визначити коефіцієнт розширення спектру (SF), що використовується передавачем, і забезпечити символну синхронізацію.

На рис. 1.5 наведено структуру інформаційної посилки в системі LoRa та залежність тривалості сеансу прийому інформаційної посилки. Тривалість преамбули має бути не менше, ніж:

$$T1 + 2 \times T2 \quad (1.1)$$

де  $T1$  – максимальний час перебування приймача в стані "сну" (Sleep),  $T2$  – час пошуку приймачем преамбули.

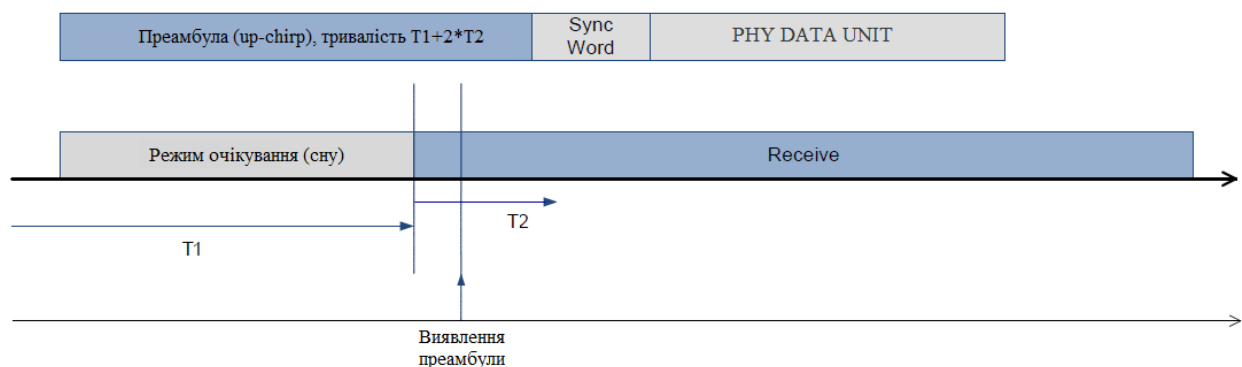


Рис.1.5 Структура інформаційної посилки в системі LoRa та залежність тривалості сеансу прийому інформаційної посилки

Безпосередньо за преамбулою передається слово синхронізації (SyncWord) і блок даних фізичного рівня. Довжина слова синхронізації налаштовується в діапазоні від 1 до 8 байт.

### Прийом сигналу LoRa

Механізм функціонування детектора преамбули заснований на використанні узгодженого фільтра (УФ), чия імпульсна характеристика комплексно пов'язана із CSS радіосигналом в частотній області і є його дзеркальним відображенням в часовій області.

На рис. 1.6 наведено структуру передачі пакету інформації по радіоканалу із модуляцією LoRa. Преамбула складається з послідовності CSS символів із прямим нахилом закону зміни частоти. Слово синхронізації є послідовністю CSS символів із протилежним нахилом закону зміни частоти. Після передачі слова синхронізації передається блок символів інформації даних фізичного рівня PHY DATA UNIT.

Принцип передачі символів інформації за допомогою радіосигналу LoRa полягає в частотному зсуві кожного елементу на величину  $e^{j\Delta\omega \cdot k \cdot t}$  відносно опорного ЛЧМ сигналу,  $e^{j(\omega_n \cdot t + \mu \cdot t^2)}$ , де  $k$  – інформаційний символ, який передає одночасно SF біт інформації.  $k=0,1,2,\dots,2^{SF}$ . Інформаційний сигнал може бути представлений наступним чином:

$$x(t) = \begin{cases} A_0 \cdot \cos\left(\omega_n \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right) & 0 \leq t < T_0 \\ A_0 \cdot \cos\left(\omega_n \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t - BW \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right) & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (1.2)$$

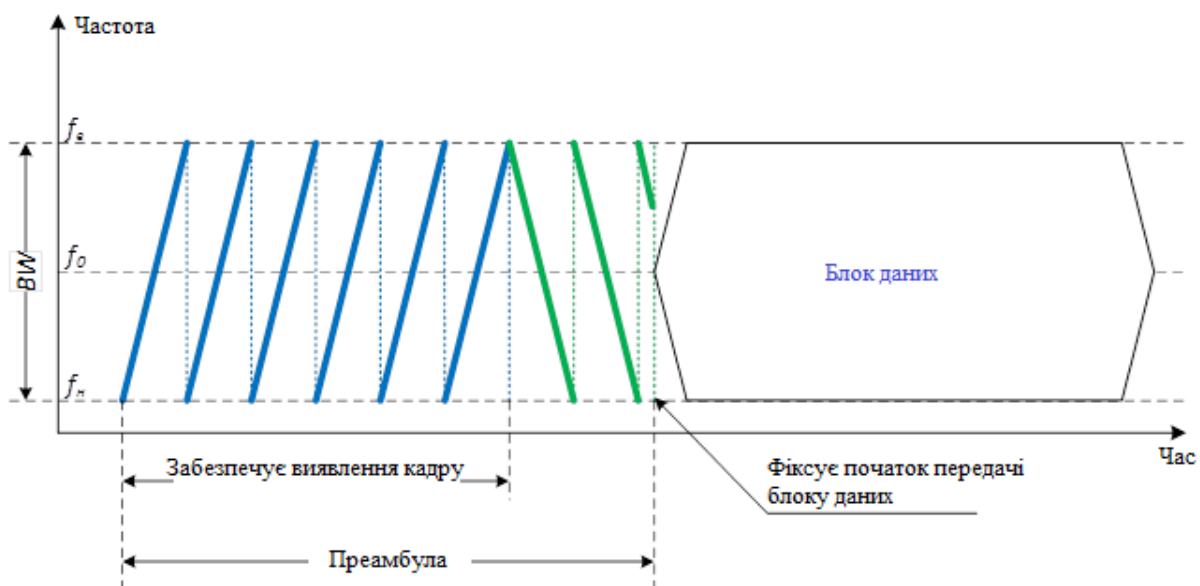


Рис.1.6 Структура передачі пакету інформації по радіоканалу із модуляцією LoRa

### Протокол LoRaWAN в термінах OSI

LoRa – це технологія фізичного рівня, яка базується на оригінальному методі модуляції LoRa, що розглянутий в попередньому підрозділі роботи. LoRa використовується на рівні L1, основним завданням якого є передача даних рівня додатків через фізичну середу передачі. Протокол LoRaWAN відповідає рівню каналу передачі даних L2 в моделі OSI. Прикінцеві вузли реалізують функції рівнів L1, L2, L7 в моделі OSI. Шлюз, або англійською GateWay (GW) це елемент, що забезпечує з'єднання між прикінцевим вузлом та сервером мережі. Сервер мережі – це головний елемент, який контролює середу передачі.

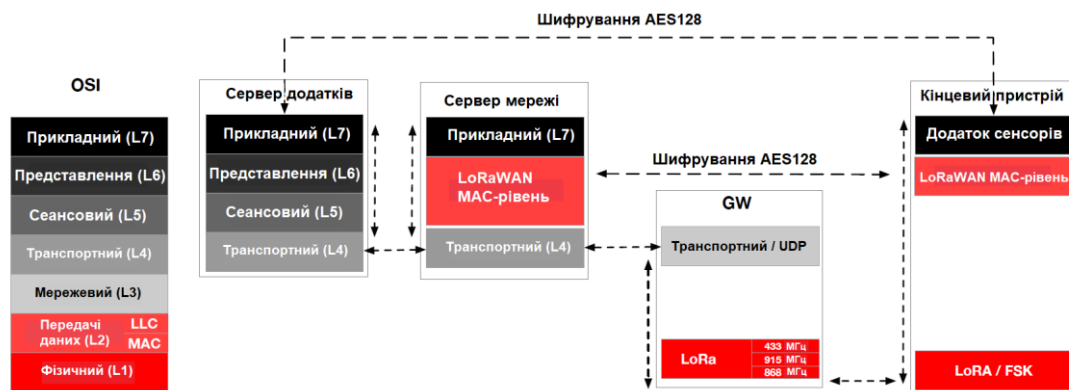


Рис. 1.7 Система LoRaWAN в термінах моделі OSI

Згідно Специфікації технології LoRaWAN стек протоколів LoRaWAN містить три рівні елементів (див. рис. 1.8) [10]:

- рівень додатків, який є верхнім рівнем стеку протоколів і пов'язаний із специфікою виконуваних функцій конкретної системи Інтернету речей;
- MAC-рівень, який виконує функції управління доступом до середі передачі даних та визначає три класи прикінцевих вузлів;
- фізичний рівень, що реалізує технологію модуляції LoRa і параметри якого залежать від регіональних особливостей розподілу частот.



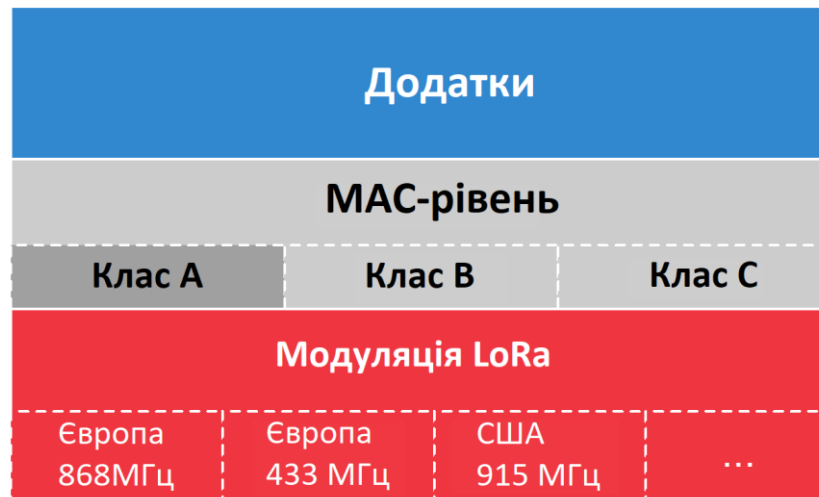


Рис.1.8 Стек протоколів технології LoRaWAN

### *Фізичний рівень LoRaWAN*

Фізичний рівень протоколу LoRaWAN – це модуляція LoRa (назва походить від скорочення Long Range – велика відстань). Показниками, що впливають на швидкість передачі інформації, є ширина смуги частот сигналу BW та коефіцієнт розширення спектру SF. Іще одним параметром є швидкість кодування CR (скорочення від англійського терміну Coding Rate). Необхідно відзначити, що необхідно додати, що при низьких значеннях показника SF забезпечується максимальна швидкість передачі інформації при мінімальній тривалості посилки, а при великих значеннях – навпаки. При цьому великі значення SF дозволяють суттєво підвищити стійкість радіоканалу до впливу перешкод і, як наслідок, збільшити дальність зв'язку.

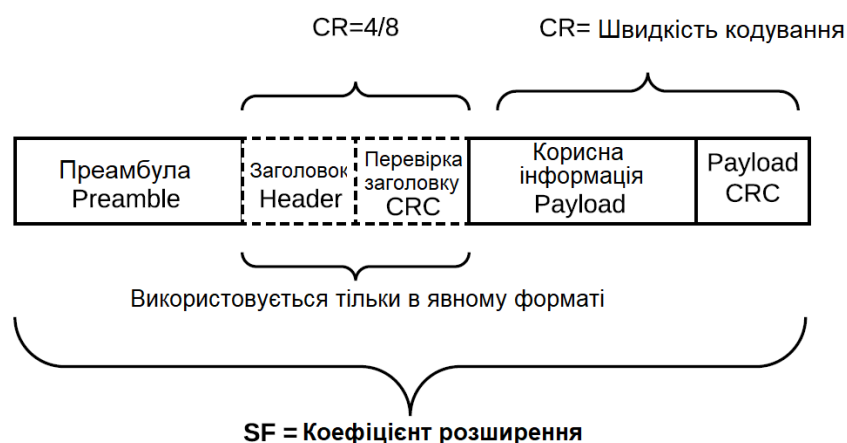


Рис.1.9 Структура кадра LoRaWAN

Кадр фізичного рівня LoRa може мати два формати: неявний (implicit), або явний (explicit). Явний пакет включає короткий заголовок, який містить інформацію о байтах, про перевірочне поле цілісності CRC та про швидкість кодування. Формат кадру LoRa наведений на рис. 1.9.

### *MAC-рівень LoRaWAN*

LoRaWAN – це протокол другого рівня. Він забезпечує адаптацію швидкості передачі даних ADR (скорочення від англійської Adaptive Data Rate), безпеку, геолокацію без використання GPS (англійською GPS-free Geolocation), доступ до каналу (англійською Channel Access) та енергозбереження прикінцевих вузлів LoRa (англійською Energy Saving). У версії 1.1 LoRaWAN підтримує роумінг та додає додаткові функції безпеки для прикінцевих вузлів класу B.

Для забезпечення енергозбереження прикінцевих вузлів LoRa протокол LoRaWAN використовує просту стратегію управління каналом. Доступ прикінцевих вузлів до середи передачі здійснюється за допомогою алгоритму Aloha з додатковим механізмом AСK.

### *Формати повідомлень MAC-рівня*

На рис. 1.10 показаний формат кадру LoRaWAN та його інкапсуляція в формат кадру фізичного рівня LoRaWAN.

Кадр MAC-рівня є корисною інформацією, що включена до відповідного поля кадру фізичного рівня (див. рисунку 1.10).

Більш детальна інформація стосовно змісту полів кадру MAC-рівня та команд управління MAC-рівня наведена в документації LoRaWAN™ 1.1 Specification [11].

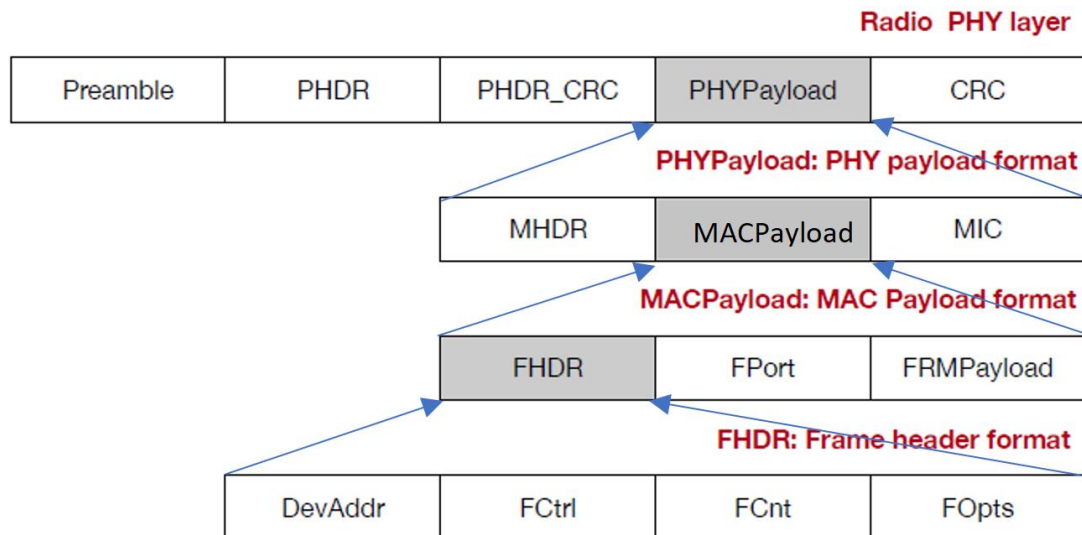


Рис. 1.10 Формат карду LoRaWAN MAC-рівня та його інкапсуляція у формат кадру фізичного рівня

### 1.3 Протокол NB-IoT та взаємодія із мережами 5G

Стандарт NB-IoT був розроблений консорціумом 3GPP із врахуванням вимог операторів: послуги IoT повинні передаватись по технології передачі, яка відома як «енергоефективна мережа дальнього радіусу дії» (Low-Power and Wide-Area, LPWA) і дозволяти використовувати існуючу інфраструктуру оператора, посилаючись на реліз 14, реліз 17 та реліз 18 3GPP. З точки зору універсальності, NB-IoT – це найбільш прийнятне рішення LPWAN для підприємств в різних галузях, за допомогою якого можна підключати до мережі оператора лічильники комунальних послуг, давачі моніторингу, системі відстеження об'єктів та багато інших пристроїв. Однією з особливостей технології є можливість підключити до однієї чарунки до 100 тисяч пристроїв, що в десятки разів більше за можливості існуючих стандартів мобільного зв'язку. Використання низькочастотного діапазону дозволить забезпечити покриттям такі важкодоступні місця, як цокольні приміщення будівель, підвали і т. ін. Крім того, при роботі в новому стандарті пристрої економніше використовують заряд акумулятора, що дозволяє їм працювати значно довше без підзарядки.

Виходячи за рамки 2G, 3G і 4G, NB-IoT — це технологія, яка дозволяє пристроям надсилати дані навіть там, де немає мобільної мережі. Крім того, він

більш безпечний, споживає менше енергії та забезпечує кращу ефективність.(див. рис. 1.11)

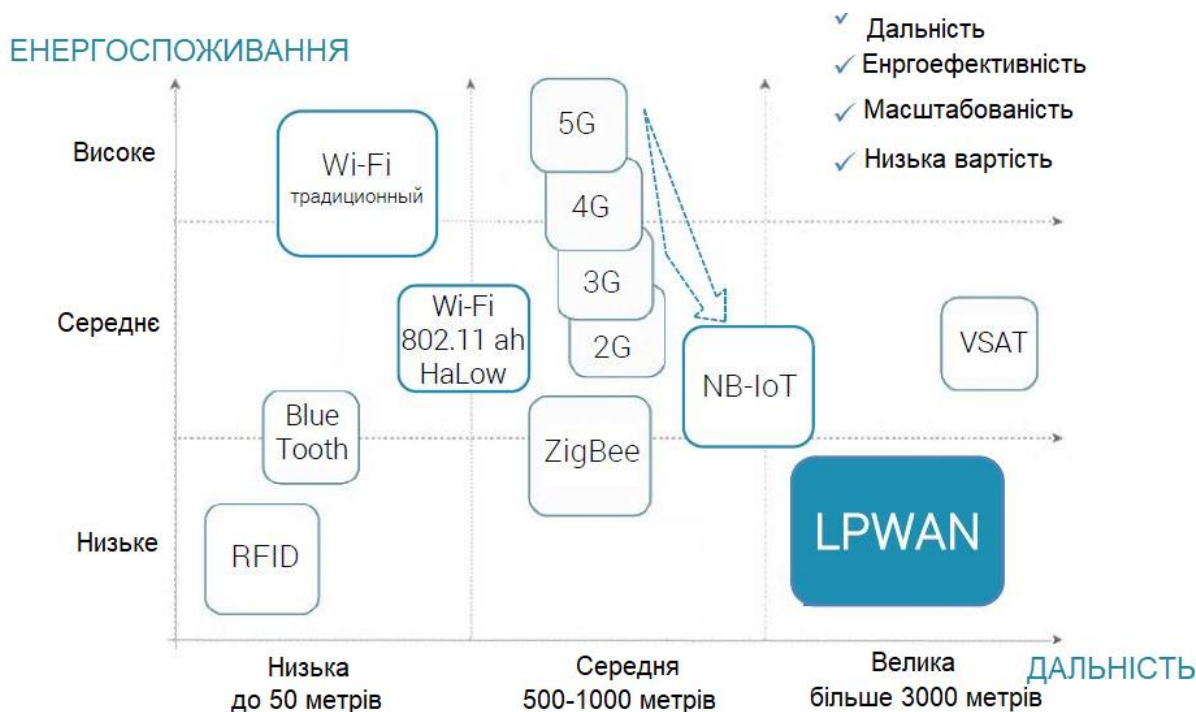


Рис. 1.11 Позиціонування сегменту LPWAN

З точки зору мережі радіодоступу (RAN) існують три варіанти розгортання NB-IoT.

- Варіант «в середині смуги», де NB-IoT розгортається в середини існуючого спектру LTE, що використовується для надання послуг мобільного широкопasmового доступу;
- Варіант «захисна смуга» з використання спектру по краях каналів (тобто в тій частині спектру, що не використовується) існуючих LTE. Але в цьому разі ймовірні завади від суміжного каналу на межах існуючих зон обслуговування базових станцій LTE. «Захисні смуги» можуть бути використані без врахування потужності основних базових станцій LTE);
- Третій варіант полягає в розгортанні NB-IoT із використанням присвоєння виділених частот (тобто «автономне» розгортання), а також використання

сукупності різних базових станцій, що спеціально виділені для LTE та мобільного широкосмугового доступу.

Технологія NB-IoT була розроблена на базі існуючих стандартів мобільного зв'язку. Мережі NB-IoT використовують ліцензуємий спектр частот. Стандартизація технології завершилась в червні 2016 року. Курирує розробку цієї мережі консорціум 3GPP.

В технології NB-IoT забезпечена підтримка більш ніж 100 тис. з'єднань на чарунку стільникової мережі, акумулятор пристрою, що підключений до NB-IoT, може працювати до десяти років без підзарядки. Також забезпечується широке покриття з підсиленням 20 дБ в мережі GSM и т.ін.

Фізичні та економічні обмеження NB-IoT, які визначають зону можливої переваги безліцензійних рішень:

- Неефективне використання енергії батареї - великий обсяг службової інформації на кожен інформаційний біт (реєстрація, шифрування, білінг, необхідність постійної синхронізації кінцевих пристроїв із мережею).
- Відносно складні та дорогі радіомодулі.
- Досить висока для певного класу пристроїв абонентна плата.
- Залежність від оператора та його пріоритетів спочатку обслуговуватиме голосовий зв'язок і класичний інтернет.
- Працює лише там, де є та працює стільникова мережа.

Стек мережевих протоколів розроблений у вигляді багаторівневої архітектури, яка існує як на передавальному, так і на приймальному вузлі. Кожен рівень запускає протокол, який може спілкуватися з одноранговим вузлом на тому самому рівні. Для надання послуг або функцій верхньому рівню протокол обмінюється повідомленнями, пакетами або блоками даних протоколу (Protocol Data Units, PDU). Протокол також обмінюється повідомленнями, пакетами або PDU з нижчим рівнем для використання його функцій і послуг.

На рис. 1.12 показана багаторівнева архітектура еталонної моделі взаємозв'язку відкритих систем (Open Systems Interconnection, OSI), яка розроблена як міжнародний стандарт для комп'ютерних мереж Міжнародною організацією стандартів (International Standards Organization, ISO). Як правило, багаторівнева архітектура поділяється вертикально на дві площини: площину даних і площину управління.

Два найнижчі рівні на рис. 1.12 також називаються рівнями доступу (Access Stratum, AS). Ці два рівні відповідають за передачу та обробку фізичної передачі чи прийому на рівні середі передачі. У випадку NB-IoT фізичним носієм є бездротовий канал, а рівні MAC (рівень керування доступом до середі передачі) і PHY (рівень фізичної середі передачі) називаються рівнем доступу. Таким чином, п'ять верхніх рівнів є рівнями без доступу (Non-Access Stratum, NAS).

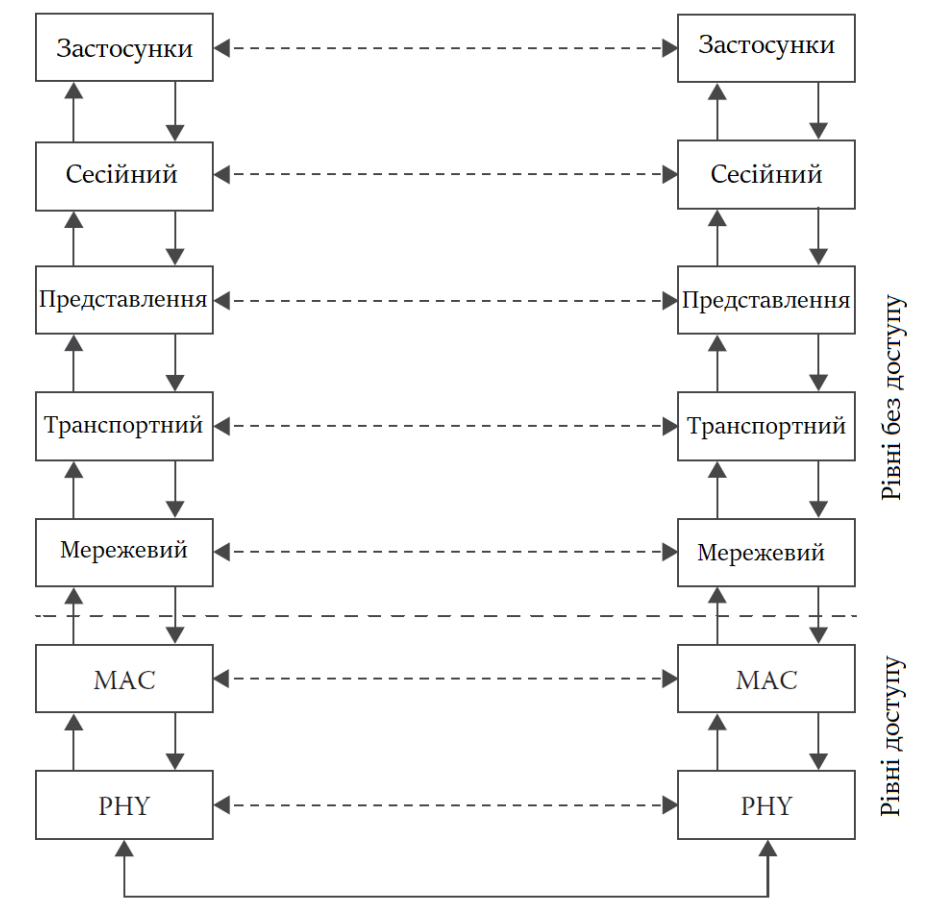


Рис.1.12 Стек протоколів OSI площини даних

Рівні, показані на рис.1.12, обмінюються своїми блоками даних у вигляді блоку даних служби (Service Data Unit, SDU) і блоку даних протоколу (Protocol Data

Unit, PDU). SDU відноситься до блоку даних у межах одного рівня, а PDU відноситься до блоку даних, якими обмінюються між рівнями. SDU та PDU для трьох рівнів показано на рис.1.13. Кожен рівень має власний SDU, до якого додається заголовок для кожного рівня (H1, H2, H3). На шляху передачі кожен рівень додає свій SDU за допомогою заголовка та надсилає його на рівень нижче. На шляху прийому кожен рівень надсилає свій SDU на верхній рівень. Кожен рівень знає розмір свого заголовка і, отже, може видалити PDU, отриманий від нижчого рівня, щоб витягти SDU.

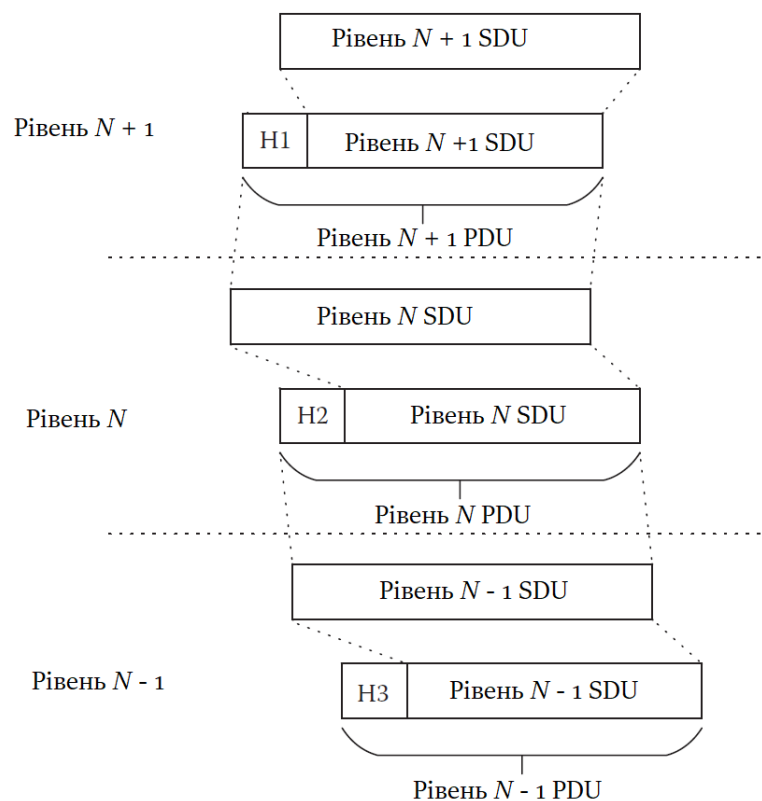


Рис.1.13 Блоки даних служби та даних протоколу

На рис.1.14 і 1.15 показано взаємозв'язок стеку протоколу 3GPP і стеку ISO для площини даних та для площини управління. В площині даних (див. рис.1.14) стек протоколів 3GPP визначає лише підрівні рівня доступу: протокол конвергенції пакетних даних (Packet Data Convergence Protocol, PDCP), управління радіолінією (Radio Link Control, RLC), управління доступом до середовища (Medium Access Control, MAC) і фізичний рівень (Physical, PHY). В площині управління (див. рис.1.15) до стеку протоколів 3GPP додані підрівні: керування радіоресурсами

(Radio Resource Control, RRC) і рівень без доступу (Non-Access Stratum, NAS). Рівень NAS — це рівень сигналізації, який розвивався та існує з іншим стеком протоколів 3GPP, таким як UMTSTM.

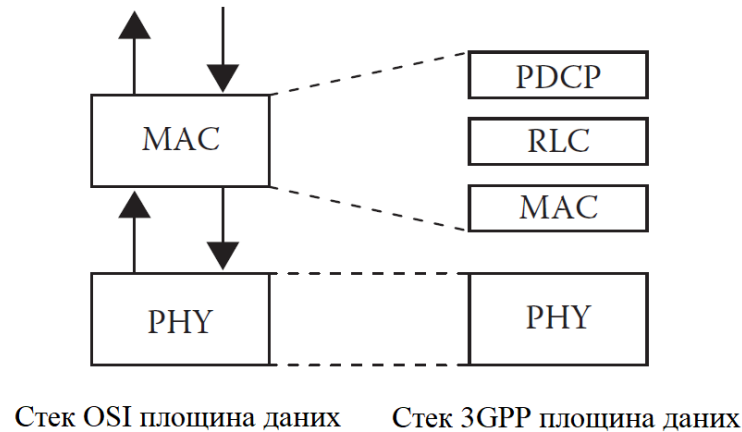


Рис. 1.14 Стек протоколів NB-IoT площини даних

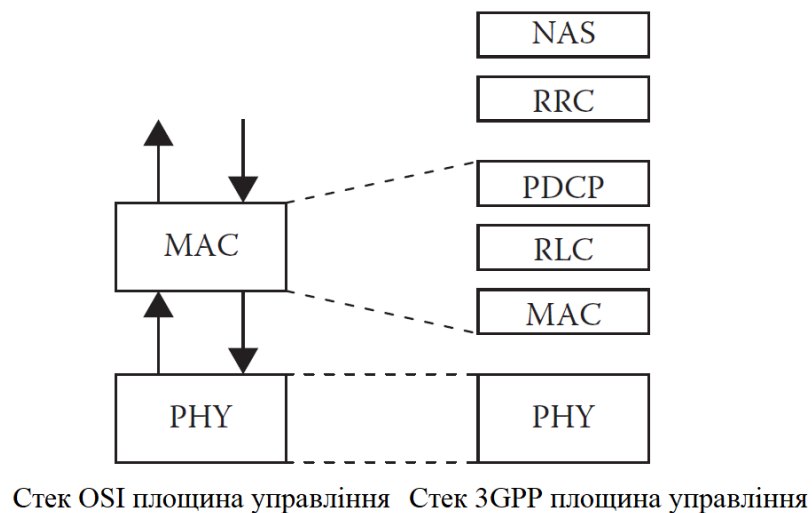


Рис. 1.15 Стек протоколів NB-IoT площини управління

Стандарт мобільного зв'язку LTE розвивався шляхом вдосконалення попередньої системи, відомої як UMTS<sup>TM</sup>. Покращений наземний радіодоступ і мережа UMTS<sup>TM</sup> (E-UTRA та E-UTRAN) є офіційною назвою, яка використовується консорціумом 3GPP для пристроїв користувачів UE та базової мережі LTE відповідно. E-UTRAN складається з вузлів eNodeB, які діють як центральний контролер (наприклад, базова станція), до якого підключена велика кількість пристроїв NB-IoT. Вузли eNodeB з'єднані один з одним і з основною мережею за допомогою протоколів, таких як протоколи S1 і X2. Термін E-UTRAN



відноситься до сторони мережі (eNodeB і базової мережі), тоді як термін E-UTRA відноситься до сторони пристрою користувача UE.

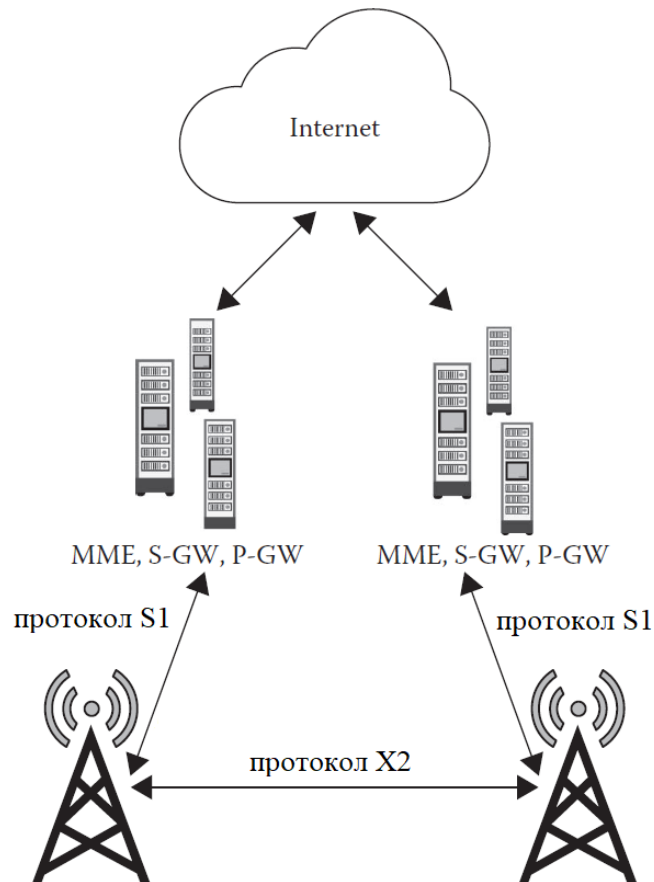


Рис.1.16 Архітектура мережі LTE NB-IoT

На рис.1.16 представлена архітектура NB-IoT на базі мережі LTE. Кожен eNodeB забезпечує радіопокриття певної географічної області, і всі пристрої NB-IoT у цій зоні можуть бути підключені до цього eNodeB. Один або кілька eNodeB належать оператору мобільного зв'язку. Усі пристрої NB-IoT у зоні обслуговування оператора мобільного зв'язку оснащені та забезпечені USIM-карткою для надання послуг у мережі оператора мобільного зв'язку.

eNodeB з'єднані один з одним із використанням протоколу та інтерфейсу X2. За допомогою інтерфейсу S1 eNodeB також підключені до ядра пакетної мережі (Evolved Packet Core, EPC, чи коренева мережа - Core Network), яка є базовою мережею. Зокрема, eNodeB підключений до вузла управління мобільністю (Mobility Management Entity, MME) за допомогою інтерфейсу S1-MME, та до шлюзу обслуговування (Serving Gateway, S-GW) за допомогою інтерфейсу S1-U.

Інтерфейс S1-MME передає повідомлення площини управління та сигналізацію, а інтерфейс S1-U передає повідомлення площини даних.

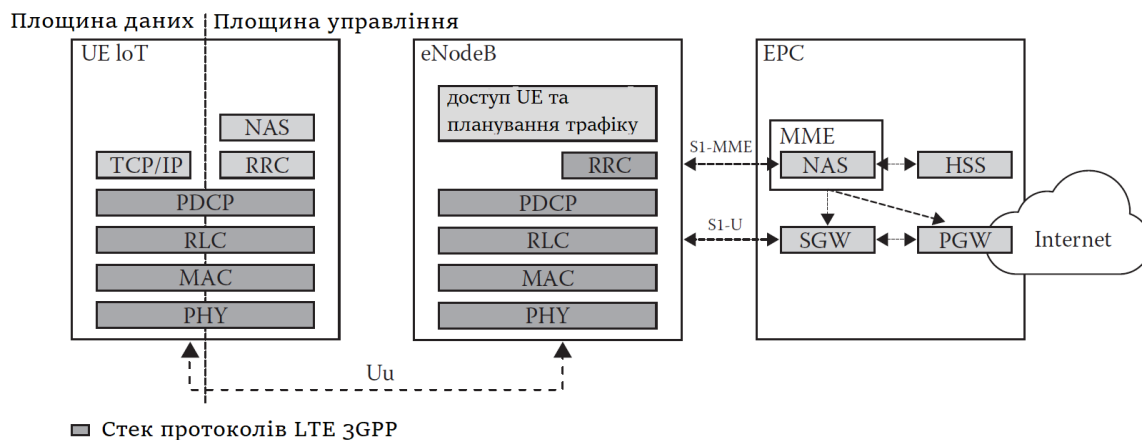


Рис. 1.17 Стек протоколів 3GPP для NB-IoT в мережі LTE для пристрою користувача UE та вузла eNodeB

На рис. 1.17 показаний загальний стек протоколів NB-IoT 3GPP для пристрою користувача UE, вузла eNodeB і базової мережі (EPC). Ядро пакетної мережі LTE (Evolved Packet Core, EPC) має два інтерфейси з вузлом eNodeB: протокол S1-MME передає всі сигнальні повідомлення, а S1-U передає всі повідомлення користувача або дані. Трафік площини даних проходить від UE до eNodeB, через інтерфейс S1-U до SGW, шлюз пакетів (Packet Gateway, P-GW) до мережі Інтернет. Трафік площини управління проходить від UE до eNodeB через інтерфейс S1-MME до MME.

MME є компонентом площини управління, оскільки він містить NAS, який є опорною точкою для обміну з UE сигнальними повідомленнями. MME може бути перевантажений великою кількістю повідомлень від пристроїв NB-IoT, оскільки кількість пристроїв NB-IoT у регіоні MME може складати сотні тисяч пристроїв. Для роботи з такою великою кількістю пристроїв NB-IoT може бути кілька MME, які спілкуються з одним і тим самим eNodeB і виконують між собою балансування навантаження. MME також спілкується з S-GW і P-GW.

Обслуговуючий шлюз (Serving Gateway, S-GW) є першим компонентом в базовій мережі EPC, який отримує пакети площини даних від UE через інтерфейс

S1-U. Якщо пакети площини даних UE об'єднані сигнальними повідомленнями NAS, то ці пакети не проходять через S-GW.

Шлюз пакетів (Packet Gateway, P-GW) є шлюзом до мережі пакетів даних (Packet Data Network, PDN) і є другим шлюзом у базовій мережі EPC. Він діє як точка доступу для підключення пристрою користувача UE до Інтернету, додатків і послуг.

Сервер абонентських даних (Home Subscriber Server, HSS) — ще один компонент базової мережі EPC, який використовується для зберігання та оновлення інформації про замовників послуг пристроїв користувачів UE. Сервер абонентських даних HSS також зберігає інформацію про пристрої користувачів UE, де генеруються різні ключі безпеки для ідентифікації та шифрування трафіку.

NB-IoT може підтримувати три режими радіоінтерфейсу (див. рис.1.18):

- В середині смуги частот LTE (Inband): використання діапазону частот LTE. В цьому режимі система NB-IoT використовує блоки ресурсів у смугі пропускання оператора LTE, де один фізичний блок ресурсів LTE займає 180 кГц смуги пропускання.
- В захисній смугі частот (Guardband): використання діапазону частот LTE. В цьому режимі для послуг NB-IoT відведена смуга частот захисного інтервалу між смугами частот LTE.
- Окрема частота (Standalone): використання виділеного оператора, відмінного від LTE (наприклад, GSMr). В цьому режимі NB-IoT займає один канал GSM (200 кГц).

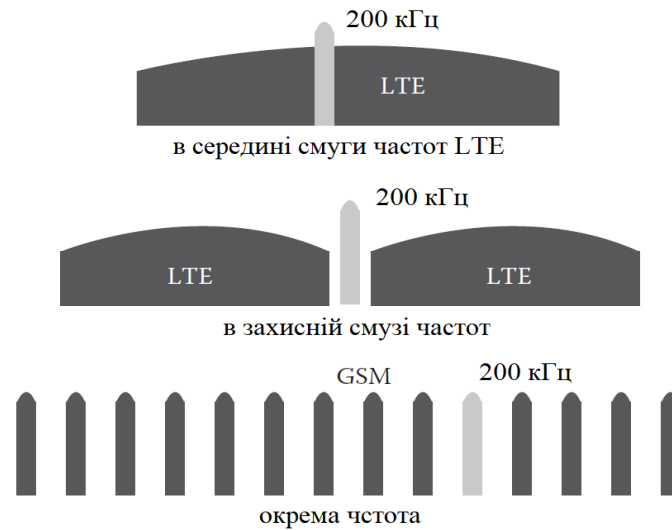


Рис.1.18 Режими роботи NB-IoT

### Фізичний рівень LTE NB-IoT

Фізичний рівень відповідає за фізичні канали, передачу та прийом пакетів даних MAC-рівня (MAC PDU) (див. рис.1.19). Рівень управління ресурсом радіомережі RRC надає параметри конфігурації для фізичного рівня PHY. На інтерфейсі MAC/PHY транспортні канали відображаються на фізичні канали і навпаки під час передачі та прийому відповідно.

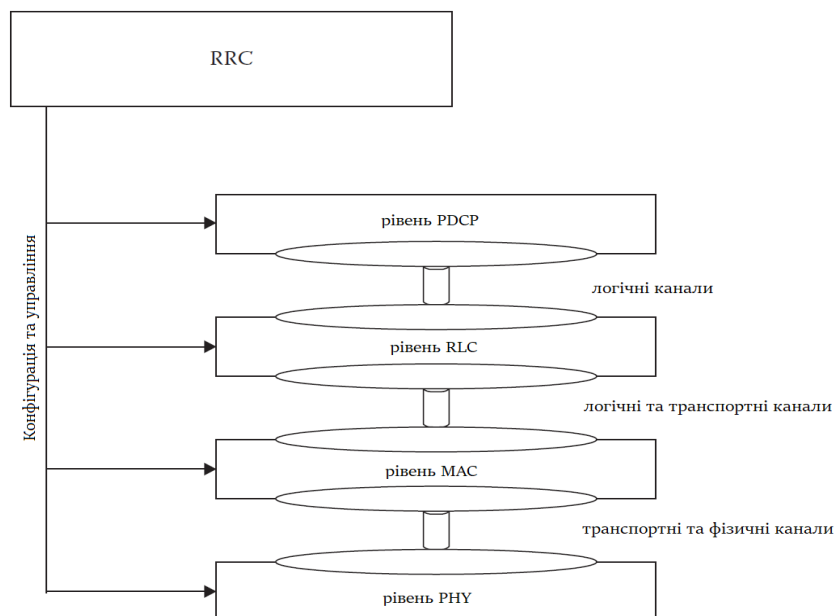


Рис.1.19 Опис фізичного рівня

На рис.1.20 показана структура кадру низхідної лінії. Кожен кадр має довжину  $T_f = 10$  мс і складається з 20 слотів довжиною  $T_{slot} = 0,5$  мс, які пронумеровані від 0 до 19. Підкадр визначається як два послідовних слоти, де підкадр  $n_{sf}$  складається зі слотів  $2n_{sf}$  та  $2n_{sf} + 1$ . Підкадр  $n_{sf}$  у системному номері кадру  $n_f$  має абсолютний номер підкадру  $n_{sf}^{abs} = 10n_f + n_{sf}$ .

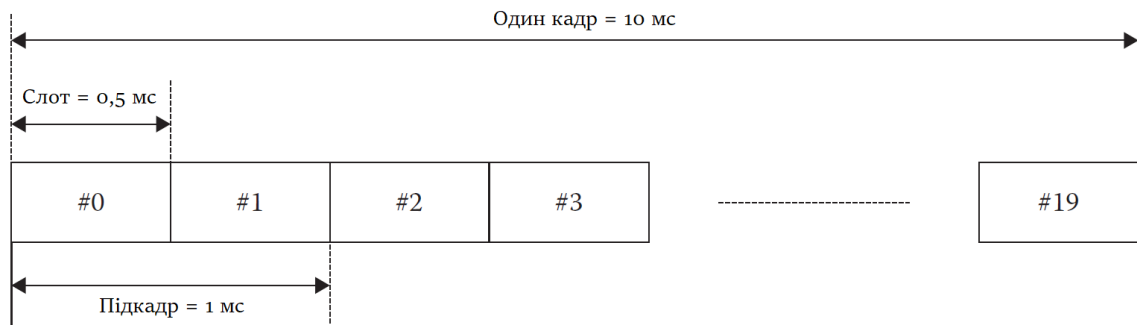


Рис.1.20 Структура кадру низхідної та висхідної лінії LTE NB-IoT для розності між підносійними (тонами)  $\Delta f = 15$  кГц

Для кадру висхідної лінії номер слоту в кадрі позначається  $n_s$ , де  $n_s \in \{0, 1, \dots, 19\}$  для розносу між підносійними (тонами)  $\Delta f = 15$  кГц, і  $n_s \in \{0, 1, \dots, 4\}$  для розносу між підносійними (тонами)  $\Delta f = 3,75$  кГц.

Структура кадру висхідної лінії така ж, як показана на рис.1.20, із довжиною 10 мс і 20 слотами, в разі, коли використовується рознесення між підносійними (тонами)  $\Delta f = 15$  кГц. Якщо рознесення становить  $\Delta f = 3,75$  кГц, тривалість кадру становить 10 мс, і кадр містить лише 5 слотів (тривалість слоту становить 2 мс), як це показано на рис.1.21, де тривалість слоту така ж, як і тривалість субкадру на рис.1.20.



Рис.1.21 Структура кадру висхідної лінії для рознесення між підносійними  $\Delta f = 3,75$  кГц

Для напівдуплексного частотного ущільнення (half-duplex FDD) для передачі по низхідній лінії доступні 20 слотів. Для передачі по висхідній лінії доступні 20 слотів, в разі використання рознесення між підносійними (тонами)  $\Delta f = 15$  кГц), та 5 слотів в разі використання рознесення між підносійними (тонами)  $\Delta f = 3,75$  кГц в кожному інтервалі 10 мс. Смуги частот, що використовуються для передачі по висхідній і низхідній лінії, розділені. В напівдуплексному режимі роботі із частотним ущільненням FDD пристрій користувача UE не може одночасно передавати й отримувати інформацію.

Пристрій користувача UE NB-IoT підтримує лише напівдуплекс типу В. У напівдуплексному FDD типу В цілий підкадр використовується як захисний інтервал між прийомом і передачею. Це дозволяє реалізувати недорогу реалізацію лише з одним генератором, який можна перемикає між частотами висхідної та низхідної лінії зв'язку.

В низхідній лінії пристрій користувача UE використовує 12 підносійних (тонів) із смугою пропускання кожної підносійної 15 кГц (загальна смуга пропускання становить 180 кГц), а у висхідній лінії одну підносійну зі смугою пропускання підносійної 3,75 кГц чи 15 кГц, або альтернативно, 3, 6 або 12 підносійні (тони) із смугою пропускання підносійної (тону) 15 кГц.

У частотній області в кожному слоті є лише один блок ресурсів на кожному несучу NB-IoT. Пристрій користувача UE NB-IoT використовує певний канал або смугу пропускання в залежності від режиму роботи (окрема частота, в межах смуги частот LTE, в межах захисної смуги частот LTE – див. рис. 1.18). Для роботи NB-IoT на окремій частоті ширина каналу передачі становить 200 кГц, а каналу прийому - 180 кГц. В цьому режимі для передачі NB-IoT доступний лише один блок ресурсів. На рис.1.22 показаний приклад спектру сигналу (сигнал, представлений в частотній області) одного ресурсного блоку в каналі, шириною 200 кГц.

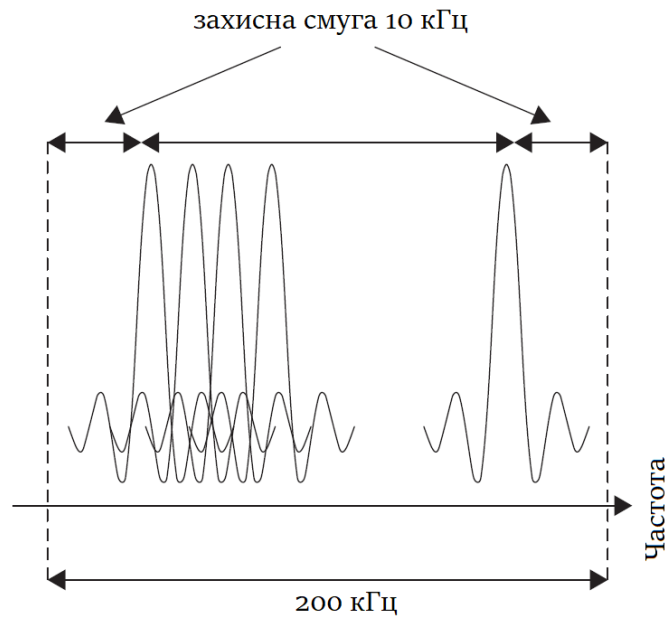


Рис.1.22 Сму́га пропускання каналу 200 кГц в частотній області

Для режиму роботи в середині, сму́га частот LTE може коливатися від 3 до 20 МГц. В цьому разі сму́га пропускання NB-IoT становить 180 кГц (див. рис.1.23).

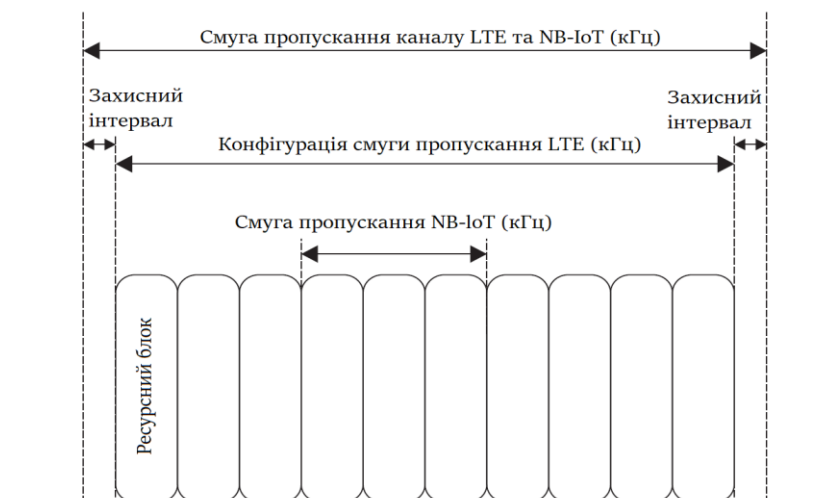


Рис.1.23 Сму́га частот каналу та сму́га частот передачі для режиму роботи NB-IoT в середині сму́ги частот LTE

В режимі роботи Nb-IoT в захисній смузі частот, для передачі інформації NB-IoT використовується сму́га частот, що показана на рис. 1.24. Сму́га пропускання для NB-IoT становить 180 кГц.

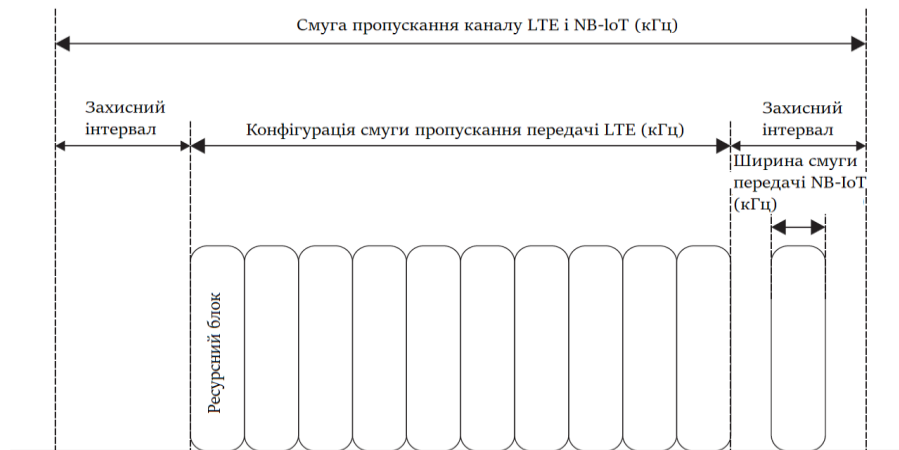


Рис.1.24 Полоса пропускання каналу та полоса пропускання передачі для режиму роботи NB-IoT в полосі частот захисного інтервалу LTE

### *Фізичні канали та структура низхідної лінії*

Низхідна лінія NB-IoT містить такі канали:

- Спільний вузькосмуговий фізичний низхідний канал (Narrowband Physical Downlink Shared Channel, NPDSCH).
- Вузькосмуговий фізичний широкомовний канал (Narrowband Physical Broadcast Channel, NPBCH).
- Вузькосмуговий фізичний канал управління низхідною лінією (Narrowband Physical Downlink Control Channel, NPDCCH).

Крім того, визначаються такі сигнали:

- Вузькосмуговий опорний сигнал (Narrowband Reference Signal, NRS).
- Вузькосмуговий сигнал синхронізації.
- Вузькосмуговий еталонний сигнал позиціонування (Narrowband Positioning Reference Signal, NPRS).

Схема передачі по низхідній лінії заснована на традиційному множинному доступі із ортогональною частотною модуляцією (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) з використанням циклічного префікса. В NB-IoT використовується лише рознос між підносійними OFDM  $\Delta f = 15$  кГц. Одному ресурсному блоку низхідної лінії відповідають 12 послідовних підносійних в



частотній області на тривалості одного слота. В часовій області кількість ресурсних блоків становить один і тільки один ресурсний блок на слот, призначений для пристрою користувача UE NB-IoT. У випадку рознесення підносійних 15 кГц існує дві довжини циклічного префікса, що відповідає семи та шести символам OFDM на слот відповідно.

- Звичайний циклічний префікс:  $T_{CP} = 5,2$  мкс (OFDM-символ №0),  $T_{CP} = 4,7$  мкс (OFDM-символ №1-6).
- Розширений циклічний префікс:  $T_{CPE} = 16,67$  мкс (від символу OFDM №0 до символу OFDM №5).

На рис.1.25 показано OFDM символ, який складається з циклічного префікса  $T_{CP}$  і тривалості корисного символу  $T_u$ , де  $T_u = 1/\Delta f$ .

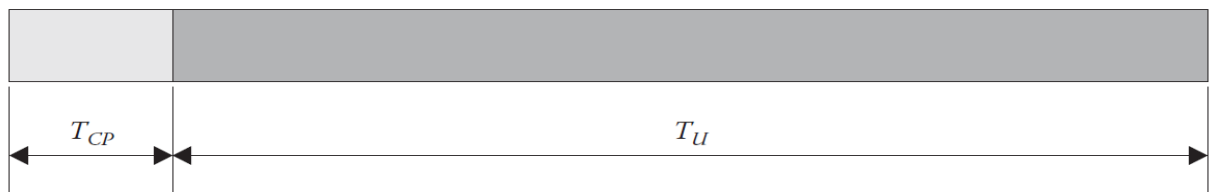


Рис.1.25 Символ OFDM

Ресурсна сітка низхідної лінії складається з 7 або 6 символів OFDM у часовій області та 12 підносійних в частотній області. Це показано на рис.1.26. Кожен елемент ресурсу представляє одну підносійну.

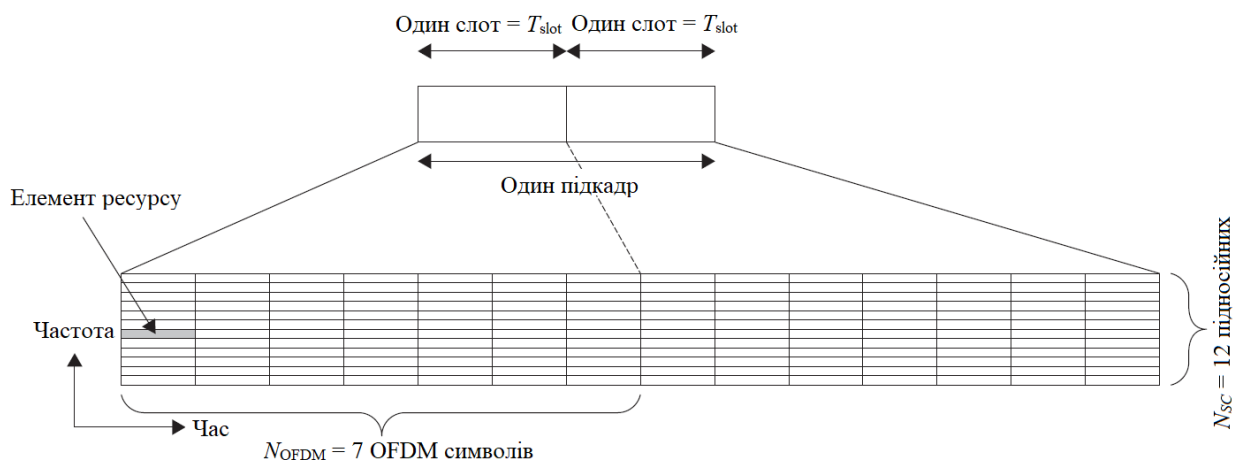


Рис.1.26 Ресурсна сітка низхідної лінії

Вузькосмуговий первинний сигнал синхронізації (Narrowband Primary Synchronization Signal, NPSS) і вузькосмуговий вторинний сигнал синхронізації (Narrowband Secondary Synchronization Signal, NSSS) є першими сигналами, які отримує пристрій користувача UE. Коли UE увімкнено, або встановлено карту USIM, пристрій користувача UE починає сканувати всі доступні частотні радіо канали, щоб знайти відповідну чарунку. Пристрій користувача UE приймає сигнали NPSS і NSSS для того, щоб отримати ідентифікатор ID фізичної чарунки,  $PHY^{ID}_{CELL}$ , і мати можливість декодувати та кодувати фізичні канали низхідної та висхідної лінії. Існує 504 можливих ідентифікатора фізичної чарунки, і UE використовує сигнали NPSS/NSSS для визначення ідентифікатора фізичної чарунки ID. Вузол eNodeB передає сигнал NPSS у підкадрі №5 у кожному радіокадрі та знаходиться в OFDM символі №3 до кінця підкадру та починається від підносійної №0 до підносійної №10. Сигнал NSSS передається в підкадрі №9 у радіокадрах, які задовольняють умові  $n_f \bmod 2 = 0$ . Він також розташований від OFDM символу №3 до кінця слота та використовує всі 12 призначених підносійних.

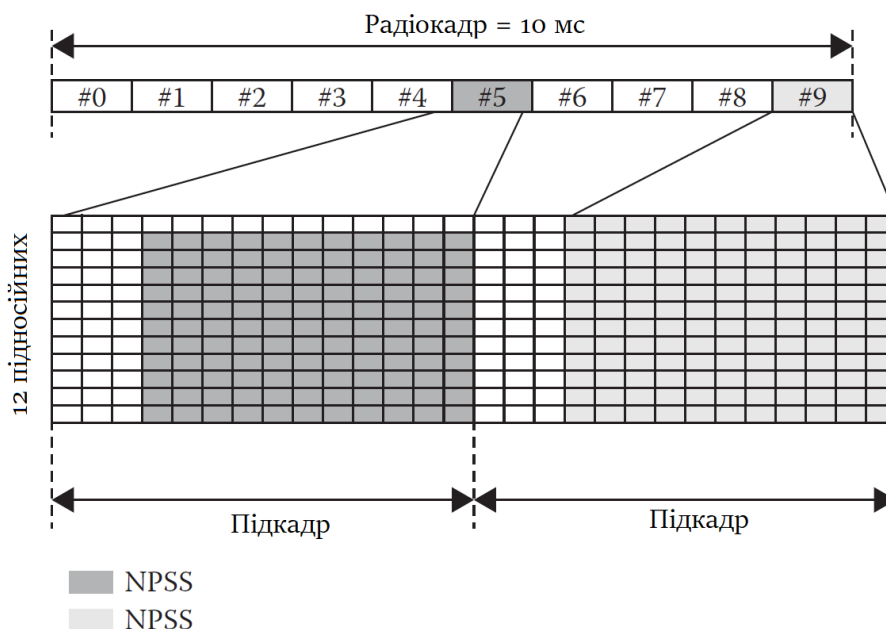


Рис. 1.27 Ресурсні блоки NSSS та NPSS

На рисунку 1.27 показані блоки ресурсів і підносійні, що використовуються для сигналів NPSS і NSSS. Перші 3 символи OFDM не зайняті ні NPSS, ні NSSS, оскільки вони можуть нести NPDCCH для режиму роботи в смузі LTE каналу. Ці 3

OFDM символи використовуються як захисний інтервал, оскільки, коли пристрій користувача UE намагається отримати сигнали NPSS/NSSS, він ще не знає, який режим роботи використовується.

Висхідна лінія складається з таких фізичних каналів:

- Спільний вузькосмуговий фізичний висхідний канал (Narrowband Physical Uplink Shared Channel, NPUSCH).
- Вузькосмуговий фізичний канал довільного доступу (Narrowband Physical Random Access Channel, NPRACH).

На додаток до наступних фізичних сигналів:

- Вузькосмугова демодуляція опорного сигналу.

Пристрій користувача UE не має NPUSCH.

Схема передачі по висхідній лінії зв'язку побудована на FDMA з однією носійною (single-carrier FDMA, SC-FDMA). SC-FDMA також описується як OFDM з розширенням DFT (DFTS-OFDM), який виконує попереднє кодування DFT до модулятора OFDM висхідної лінії. Існує лише одна визначена довжина циклічного префікса, яка відповідає семи символам OFDM на слот відповідно.

Для  $\Delta f = 15$  кГц інтервал між підносійними,

- Нормальний циклічний префікс:  $T_{CP} = 5,2$  мкс (OFDM-символ №0),  $T_{CP} = 4,7$  мкс (OFDM-символ №1-6).
- $T_s = 1/(2048 \times \Delta f)$ .

Для  $\Delta f = 3,75$  кГц інтервал між підносійними,

- Нормальний циклічний префікс:  $T_{CP} = 8,3$  мкс (символ OFDM від 0 до 6).
- $T_s = 1/(8192 \times \Delta f)$ , де  $T_s$  є період дискретизації для символу OFDM.

Пристрої користувача UE використовують як одночастотний, так і багаточастотний режими передачі. Для одночастотного режиму передачі визначено два значення рознесення між підносійними 3,75 та 15 кГц.

У частотній області блоки ресурсів не визначені, але визначено одиницю ресурсу RU. Якщо рознесення підносійних висхідної лінії становить  $\Delta f = 15$  кГц, використовуються 12 послідовних підносійних, або тонів. Якщо інтервал підносійних висхідної лінії становить  $\Delta f = 3,75$  кГц, використовуються 48 послідовних підносійних.

На рис. 1.28 і 1.29 показано тривалість інтервалу висхідної лінії та кількість підносійних для обох рознесень 15 і 3,75 кГц відповідно.

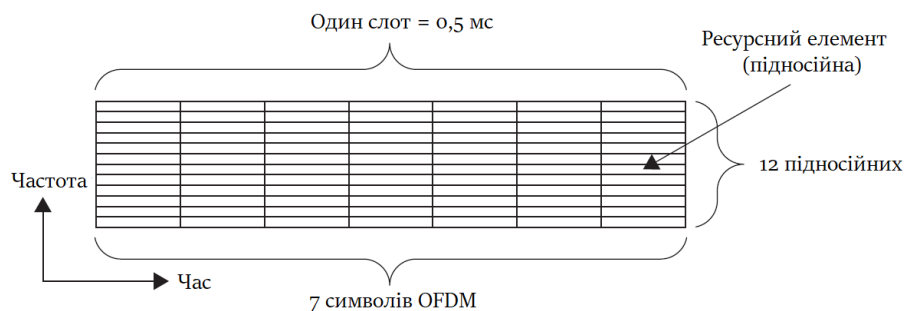


Рис. 1.28 Слот висхідної лінії для рознесення підносійних  $\Delta f = 15$ кГц

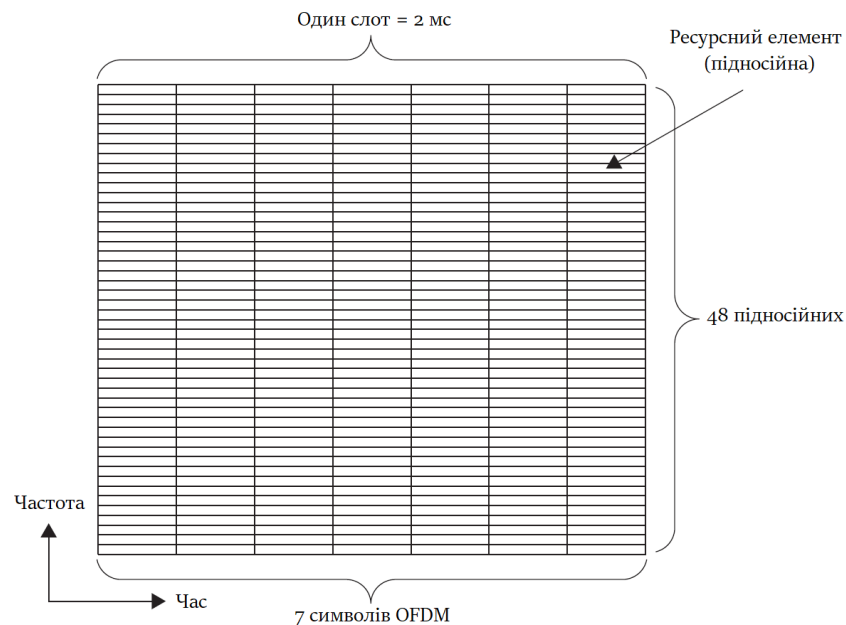


Рис.1.29 Слот висхідної лінії для рознесення частот  $\Delta f = 3,75$  кГц

Одночастотний режим передачі з рознесенням між підносійними 3,75 кГц організований у вигляді слотів тривалістю 2 мс. Кожен слот складається з семи символів, розташованих від початку слота. Границя слота вирівнюється з границею

підкадру структури кадру типу 1. із Для випадку рознесення підносійних 3,75 кГц тривалість одного символу становить 275 мкс. Ця тривалість включає циклічний префікс, тривалістю 8,3 мкс. Оскільки тривалість слота становить 2 мс і він містить сім символів, залишок тривалості в 75 мкс використовуються як захисний інтервал.

В багаточастотному режиму передачі у висхідній лінії використовуються 12 послідовних підносійних із рознесенням між підносійними  $\Delta f = 15$  кГц. Підносійні можуть бути згруповані в набори з 3, 6 або 12 послідовних підносійних.

Одиниця ресурсу RU, що виділена для одночастотного NPUSCH з передачею UL-SCH, визначається як одна підносійна 3,75 кГц для 16 слотів (разом 32 мс), або одна підносійна 15 кГц для 16 слотів (разом 8 мс).

Одиниця ресурсу RU, що виділена для багаточастотного NPUSCH з передачею UL-SCH, визначається як 3 підносійні тривалістю 4 мс; або 6 підносійних по 2 мс; або 12 підносійних за 1 мс.

Одиниця ресурсу RU, що виділена для NPUSCH з передачею ACK/NACK, використовує формат 2 NPUSCH. Він визначається як одна підносійна 3,75 кГц тривалістю 8 мс або одна підносійна 15 кГц тривалістю 2 мс.

Транспортний блок NPUSCH (UL-SCH) може бути запланований для однієї, або більше ніж однієї одиниці ресурсу RU.

На рис. 1.30 показано, що одиниця ресурсу RU складається з однієї підносійної, що охоплює 16 слотів (слот становить 2 мс для  $\Delta f = 3,75$  кГц і 0,5 мс для  $\Delta f = 15$  кГц). На малюнку 1.31 показано, що одиниця ресурсу RU складається з шести підносійних, що охоплюють чотири слоти.

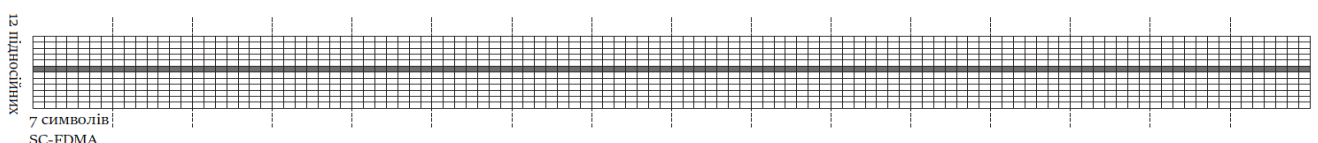


Рис. 1.30 Одиниця ресурсу RU для 16 слотів в одночастотному режимі для рознесення підносійних  $\Delta f = 15$  кГц (загальна тривалість 8 мс)

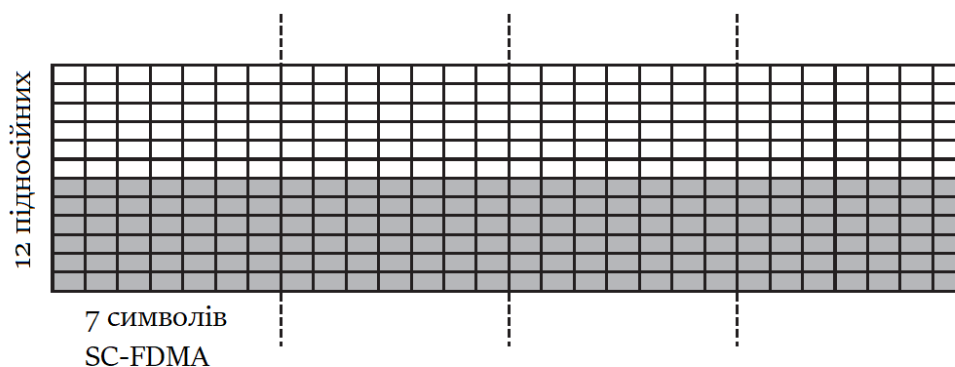


Рис.1.31 Одиниця ресурсу RU для слоту в багаточастотному режимі (шість підносійних) для рознесення підносійних  $\Delta f = 15$  кГц (загальна тривалість 2 мс)

#### 1.4 Впровадження низькоорбітальних супутникових систем для послуг вузькосмугового Інтернету речей

Ефективним методом побудови телекомунікаційної системи, яка здатна забезпечити глобальне покриття для надання послуг IoT, є створення системи супутникового зв'язку. Для систем супутникового зв'язку, орієнтованих на надання послуг IoT, особливий інтерес становить використання низької навколоземної орбіти (LEO, Low Earth Orbit). Серед переваг LEO-орбіти — близькість до поверхні Землі, що забезпечує мінімальну тривалість затримки при передачі сигналу та мінімальну необхідну потужність передавального пристрою супутникової радіолінії.

Мережі IoT, як правило, розгортаються на існуючій стільниковій інфраструктурі. Зони покриття стільникових мереж напряму пов'язані із розподілом щільності населення. Такий стан речей зумовлений економічними факторами створення та експлуатації стільникових мереж. Для розширення зони покриття базових станцій стільникових мереж зазвичай використовуються башти та дахи високих будівель. У разі використання високих веж радіус зони покриття базової станції становить близько 20 км. Розмір зони покриття базової станції залежить від особливостей рельєфу, характеру забудови, діапазону частот, тощо. Таким чином, економічна доцільність, чисельність населення та особливості

місцевості є основними факторами, що впливають на доступність стільникового зв'язку в конкретному місці або місцевості.

В значній мірі залежності від чисельності населення та особливостей рельєфу і забудови місцевості позбавлені супутникові системи. Супутникові мережі можуть охоплювати велику територію. Супутникові системи не є альтернативою наземним мережам, а доповнюють їх. Так в межах районів із високою щільністю населення і відповідно із розвиненою інфраструктурою наземних систем стільникового зв'язку послуги Інтернету речей надаються із використанням ресурсу наземних систем, а за межами зон покриття наземних мереж – за допомогою супутникових систем. Такий підхід дозволяє забезпечити суцільне покриття для послуг Інтернету речей.

Таким чином, впровадження супутникових систем IoT в поєднанні із стільниковими IoT є перспективним напрямком досліджень для широкомасштабного багатоцільового розгортання IoT [12].

Кожен супутник має свою зону покриття. Вони залежать від ширини променя. Зазвичай зона покриття супутника набагато більша, ніж у стільникових передавачів. Тому багатоадресна передача інформаційного потоку IoT на певну територію через супутники набагато простіша та економічно ефективніша, ніж стільникова передача. Для багатоадресної розсилки на основі IoT, де енергетичні обмеження дуже суворі, це дуже вигідно.

Беззаперечні переваги супутникової телекомунікаційної технології стали причиною уваги Проекту партнерства третього покоління (3GPP). Релізи 14, 16, 17, 18 передбачають використання супутникових складових для активації та розширення 5G.

Супутники, які розглядаються 3GPP, включають супутники на геостационарній орбіті (GEO) і супутники на низькій орбіті (LEO). Кожна із двох супутникових складових має переваги на слабкі місця. До переваги GEO складової відносяться здатність забезпечити безперервне обслуговування 24/7 за допомогою одного супутника, відносна простота наведення антен, відносно невеликі значення доплерівського зсуву частоти. До недоліків відносяться велика затримка

двосторонньої передачі та велике затухання радіосигналу на поширення від поверхня Землі до геостаціонарної орбіти. Супутники LEO мають перевагу меншої затримки та втрат енергії на поширення, ніж супутники на GEO. Але LEO системи не здатні забезпечити безперервне обслуговування в режимі 24/7 за допомогою одного супутника. Для забезпечення безперервного обслуговування LEO системи будуються як багатосупутникові системи. Незважаючи на це, зараз активно ведуться дослідження використання супутників LEO для систем Інтернету речей.

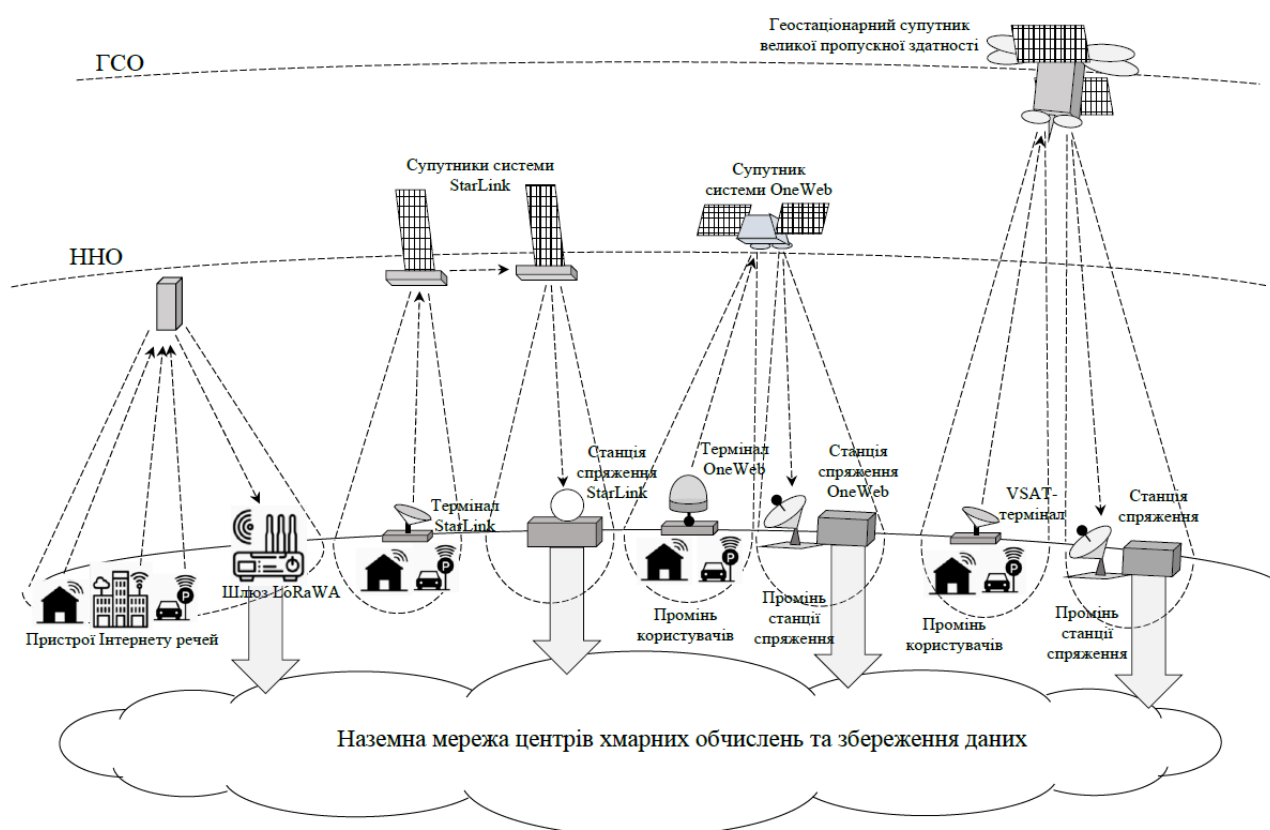


Рис.1.32 Використання супутникових телекомунікаційних систем для забезпечення роботи систем Інтернету речей

На рис.1.32 наведено приклади застосування супутникових телекомунікаційних систем різного типу для забезпечення роботи систем Інтернету речей. На рисунку показано супутникові телекомунікаційні системи, що використовують два типи орбіт: низьку навколоземну орбіту (ННО) та геостаціонарну орбіту (ГСО). Враховуючи той факт, що супутникові системи широкопasmового доступу на низькій навколоземній орбіті і та середній навколоземній орбіті не мають принципових відмінностей в архітектурі і побудові,



на рис.1.32 не представлені супутникові телекомунікаційні системи на середній навколоземній орбіті, до яких відноситься, зокрема, система O3b.

Першим варіантом застосування низькоорбітальних супутникових телекомунікаційних систем є використання протоколу низькошвидкісної передачі інформації Інтернету речей на великі відстані LoRaWAN та NB-IoT із застосуванням космічних апаратів форм-фактора кубсат. Пристрої Інтернету речей, що знаходяться в зоні радіобачення кубсата, передають пакети інформації Інтернету речей за протоколом LoRaWAN та NB-IoT. Кубсат приймає та ретранслює прийняті сигнали, що поступають на шлюз LoRaWAN та NB-IoT, який під'єднаний до мережі Інтернет і забезпечує передачу інформації по наземній мережі до хмарних центрів обробки даних. Команди управління передаються в зворотному напрямку. В цьому варіанті супутниковий сегмент використовується в якості радіоподовжувача, тобто засобу, що забезпечує збільшення дальності передачі сигналів протоколу LoRaWAN.

На сьогодні послуги передачі інформації Інтернету речей здатні надавати геостационарні супутники традиційної конфігурації та супутники великої пропускної здатності. Обидва типи геостационарних супутників можуть бути оснащені корисним навантаженням із транспондерами прозорого типу, або транспондерами із обробкою на борту, або регенеративного типу. На рис.1.32 наведено приклад передачі інформації Інтернету речей із використанням супутника великої пропускної здатності. До особливостей геостационарних супутників великої пропускної здатності відноситься використання променів двох типів (за призначенням та за показниками): променів користувачів та променів станцій спряження. Зовнішнім інтерфейсом геостационарної супутникової системи до пристроїв Інтернету речей є інтерфейс VSAT-терміналу до локальної мережі, або до радіомережі WiFi. VSAT-термінал об'єднує в єдиному транспортному потоці висхідної супутникової лінії пакети інформації Інтернету речей та інформацію інших служб. Супутник великої пропускної здатності спрямовує прийнятий потік от VSAT-терміналу користувача з променю користувача до променю станції спряження. Станція спряження, аналогом якої у випадку використання

геостационарного супутника традиційної конфігурації є центральна станція VSAT-мережі, підключена до магістральної мережі системи Інтернет, по якій пакети інформації Інтернету речей поступають до центру хмарних обчислень на зберігання даних для обробки та узагальнення. Для підвищення ефективності хмарних сервісів, що надаються із застосуванням супутникових телекомунікаційних систем, компанія Microsoft спільно з компанією Azure розпочали реалізовувати проект щодо розміщення центрів хмарних обчислень та збереження даних безпосередньо на території супутникових телепортів [13].

У традиційному супутниковому зв'язку наземні станції використовують параболічні антени. Однак, оскільки параболічна антена має великий об'єм, проводяться дослідження щодо формування променя через фазовану антену.

Щоб супутники LEO могли спілкуватися з NB-IoT, необхідно вирішити дві проблеми. Перший – високий доплерівський зсув. На відміну від супутників GEO, супутники LEO обертаються навколо Землі на високій швидкості, якщо дивитися із Землі, що спричиняє високі доплерівські зсуви під час зв'язку з ними. Це збільшує зсув несучої частоти, що ускладнює оцінку каналу приймача. Традиційний супутниковий зв'язок LEO передбачає єдину лінію зв'язку зі шлюзом. Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) визначає положення супутника та обчислює доплерівський зсув, що робить можливою компенсацію.

Однак непросто застосувати ці методи до висхідних каналів зв'язку NB-IoT, які використовують множинний доступ з частотним поділом каналів на одній несучій (SC-FDMA). SC-FDMA — це технологія, яка об'єднує кілька операторів. Оскільки зв'язана несуча має одну частоту, але поєднує сигнали з різними доплерівськими зсувами, компенсація окремих доплерівських зсувів є складною.

Друга проблема у зниженні швидкості передачі даних пов'язана з великим часом проходження в обидві сторони (RTT). Серед поточних сценаріїв цільової продуктивності NTN підключення IoT вимагає швидкості передачі даних 10 Кбіт/с або більше. Тим не менш, виконати цю вимогу складно через поточний довгий RTT. У випуску 17 3GPP немає консенсусу щодо рішення для покращення

пропускної здатності через проблему заряду батареї, спричинену GNSS. Таким чином, це дослідження показує досягнуто пропускну здатність у вказаних сценаріях [3].

Недоліком LEO-систем є мала зона обслуговування кожного супутника і його постійний рух відносно поверхні Землі. Як наслідок, в LEO-системах виникає необхідність відстеження терміналом земної станції зміни положення супутника у ході сеансу зв'язку при використанні спрямованих антен і компенсація впливу ефекту Доплера.

Очікуване зростання попиту на вільну пропускну здатність телекомунікаційних систем, пов'язане із перспективами впровадження систем мобільного зв'язку 5G, і результати двадцятирічної орбітальної експлуатації LEO-систем персонального мобільного супутникового зв'язку першого покоління Iridium, Global Star, Orbcomm стимулювали появу супутникових LEO систем зв'язку нового покоління, призначених для надання послуг широкосмугового доступу до Інтернету, IoT, і послуг хмарного зберігання даних.

## **ВИСНОВКИ**

IoT стає важливим фактором розвитку IT-індустрії і буде серйозно впливати на практично всі сфери діяльності. Використання IoT з роками розширилися й охоплюють все більше галузей нашого життя.

Розвиток Інтернету речей стримується обмеженими зонами дії наземних мобільних мереж широкосмугового доступу, які із комерційних міркувань охоплюють території з відносно високою щільністю населення. Розширити зону надання послуг Інтернету речей можливо шляхом використання ресурсу супутникових телекомунікаційних систем, вузькопрофільного та широкого застосування.

Супутниковий IoT розробляється, щоб доповнити стільниковий IoT, а не повністю замінити наземні мережі IoT. Найновіші стандарти та конфігурації як супутникового, так і стільникового зв'язку дозволяють формувати комбіновані

гібридні мережі, щоб скористатися перевагами найкращих характеристик обох типів мереж і максимально збільшити глобальне підключення.

Рішенням є впровадження низькоорбітальних супутникових систем для послуг Інтернету речей на базі протоколів LoRaWAN та NB-IoT, які добре адаптовані до реалізації супутникових IoT.

## РОЗДІЛ 2.

### РОЗРОБКА МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНОЇ СУПУТНИКОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ІЗ ВУЗЬКОСМУГОВИМИ ПРОТОКОЛАМИ

#### 2.1. Багаторівнева ГСО-НГСО супутникова система Інтернету речей

Багаторівнева ГСО-НГСО супутникова система Інтернету речей на базі вузькосмугових протоколів представлена трирівнева мережею, що складається з наземних засобів зв'язку, супутників на геостаціонарній та низькій навколоземній орбітах. На різних орбітах, з'єднаних між собою високошвидкісними супутниковими лініями зв'язку (ISL), які можуть напрямку направляти пакети даних через космос. Архітектура має відповідати вимогам цільових вертикальних галузей і використовувати активи та інфраструктуру, що належать багатьом зацікавленим сторонам. Сегмент користувача включає пристрої IoT та термінали користувача, які можуть бути стаціонарними або мобільними, розгорнутими на платформах, таких як поїзди чи літаки, тобто розташовані на кількох рівнях.

Космічний рівень включає угруповання супутників і великі супутники, що працюють на різних орбітах, і зв'язки між ними. Корисне навантаження супутника може бути «прозорого або регенеративного типу». В останньому випадку частина функцій базової станції виконується супутником (наприклад, демодуляція та повторна модуляція сигналу), тоді як у випадку використання корисного навантаження «прозорого типу» діє як простий ретранслятор, який підсилює сигнал і здійснює перетворення частоти між частотами висхідної (UL) і низхідної (DL) лінії.

Супутники GEO використовуються для забезпечення широкосмугового доступу та високошвидкісного зв'язку, особливо до віддалених районів, які інакше не можуть обслуговуватися - з технічних або економічних причин. Сучасні супутники великої пропускної здатності (HTS) здатні забезпечити достатню швидкість передачі даних для більшості споживачів. Однак доступність широкосмугових послуг GEO супутників стає обмеженою в полярних областях

вище 80 широти. Таким чином, супутникові угруповання на нижчих орбітах також розроблені для підтримки [14].

Низькоорбітальна складова супутникової інфраструктури Інтернету речей призначена для забезпечення взаємодії із пристроями користувачів Інтернету речей безпосередньо, або із використанням універсальних VSAT-терміналів, та реалізації туманних обчислень. Низькоорбітальна складова передбачає використання низької навколоземної орбіти і відноситься до класу супутникових систем, що відмінні від геостаціонарних супутникових систем, тобто НГСО супутникові системи.

Сегмент супутникового зв'язку (Satellite Communication Segment) забезпечує канал передачі даних (IoT Data Relay) від пристрою Інтернету речей (сенсора) до хмарного центру обробки даних і в зворотному напрямку до пристрою Інтернету речей (актюатору). Канал супутникового зв'язку формується із застосуванням наступних елементів:

- VSAT-термінал, який знаходиться в безпосередній близькості від пристроїв Інтернету речей, сенсорів і актюаторів, і забезпечує підключення цих пристроїв з використанням технології малого радіусу дії: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee. Для супутникової телекомунікаційної системи інтерфейс VSAT-терміналу до локальної мережі або до наземної мережі зв'язку є межею системи;
- телекомунікаційний супутник (Communication Satellite), що забезпечує ретрансляцію інформаційних пакетів пристроїв Інтернету речей. Для цілей ієрархічної моделі системи Інтернету речей хмарної архітектури немає принципового значення тип корисного навантаження, чи ретранслятора, телекомунікаційного супутника: ретранслятор «прозорого» типу (Transparent Payload) чи ретранслятор «обробкою на борту» (Regenerative Payload);
- центральна станція мережі VSAT (VSAT-Network HUB) або станція спряження GateWay). Як правило, цей об'єкт підключений до магістральної мережі зв'язку та магістральної мережі Інтернет (Internet Backbone), через яку забезпечується передача інформації в хмарний центр обробки даних.

На рис.2.1 наведено приклади використання супутникових телекомунікаційних систем різного типу забезпечення роботи систем Інтернету речей. На рис. 2.1 представлені супутникові телекомунікаційні системи, що використовують два типи орбіт: низьку навколоземну орбіту (LEO – Low Earth Orbit) та геостаціонарну орбіту (GEO – Geostationary Orbit).

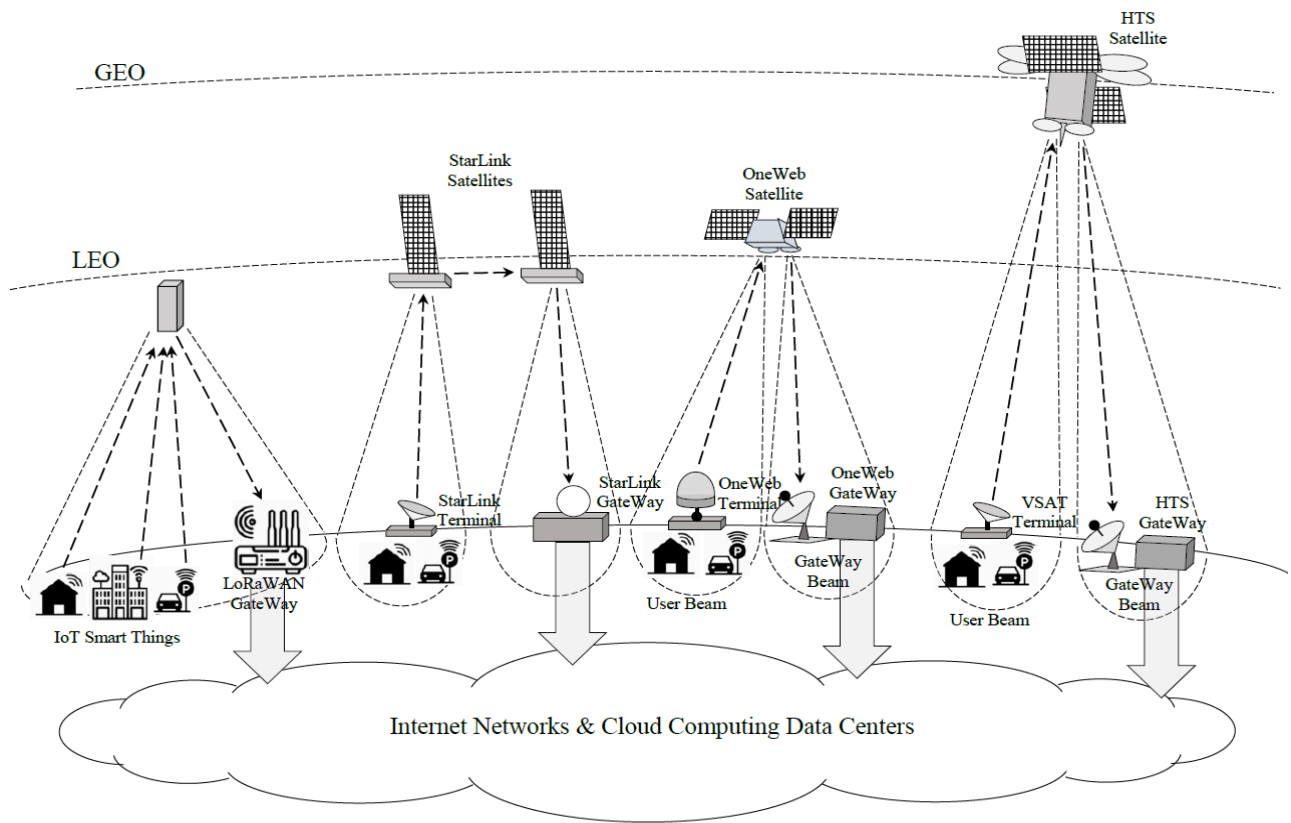


Рис.2.1 Використання супутникових телекомунікаційних систем для забезпечення роботи систем Інтернету речей

Варіантом застосування низькоорбітальних супутникових телекомунікаційних систем є використання протоколу низькошвидкісної передачі інформації Інтернету речей великі відстані LoRaWAN із застосуванням космічних апаратів форм-фактора кубсат (CubeSat) [5]. Пристрої Інтернету речей, що у зоні радіобачення кубсата, передають інформаційні посилки Інтернету речей за протоколом LoRaWAN. Кубсат приймає та ретранслює прийняті сигнали, які надходять на LoRaWAN шлюз (GateWay), який підключить до мережі Інтернет та забезпечує передачу інформації через наземну мережу системи Інтернет до хмарного центру обробки даних. Керівні дії передаються у зворотному напрямку.

У цьому варіанті супутниковий сегмент використовується як подовжувач, тобто. засоби, що забезпечує збільшення дальності передачі сигналів протоколу LoRaWAN.

### **Геостационарна складова**

На сьогодні послуги передачі інформації Інтернету речей здатні забезпечувати геостационарні супутники зв'язку традиційної конфігурації (Regular Satellite) і супутники високої пропускної спроможності (HTS - High Throughput Satellite). Обидва типи геостационарних супутників можуть бути оснащені корисним навантаженням з транспондерами прозорого типу (Transparent Transponder) або транспондерами з обробкою інформації (Regenerative Transponder). На рис.2.1 наведено приклад передачі інформації Інтернету речей з використанням супутника високої пропускної спроможності HTS. Особливістю архітектури геостационарних систем супутникового зв'язку високої пропускної спроможності є виділення окремих променів для підключення VSAT-терміналів користувачів – User Beam, та виділення окремих променів для підключення до станцій сполучення (GateWay) – GateWay Beam. Зовнішнім інтерфейсом геостационарної системи супутникового зв'язку до пристроїв Інтернету є інтерфейс VSAT-терміналу до локальної мережі або WiFi. VSAT-термінал мультиплексує пакети інформації Інтернету речей у загальний потік та передає його лінією UpLink. Супутник HTS переносить прийнятий потік від VSAT-терміналу користувача промінь станції сполучення. Станцію сполучення, аналогом якої у разі використання геостационарного супутника традиційної конфігурації є центральна станція VSAT-мережі HUB, підключена до магістральної мережі системи Інтернет, через яку пакети інформації Інтернету речей надходять до хмарного центру обробки інформації. Для підвищення ефективності хмарних сервісів, що надаються із застосуванням супутникових телекомунікаційних систем, компанія Microsoft спільно з компанією Azure розпочали реалізацію проекту з розміщення центрів хмарного зберігання даних у безпосередній близькості до супутникових телепортів.



Як очевидно з наведеної структури супутникові телекомунікаційні системи займають місце каналів передачі між пристроями Інтернету речей і хмарними центрами обробки даних. У хмарній архітектурі системи Інтернету речей супутникові телекомунікаційні системи мають забезпечувати двосторонню передачу всього обсягу інформації Інтернету речей, що суттєво збільшує завантаження каналів та системи.

### **Негеостаціонарна складова**

Нова хвиля стартапів пропонує рішення IoT, що спираються на новіші недорогі супутникові технології з низьким енергоспоживанням, щоб досягти справді глобального покриття підключення із використання LEO орбіти, що дозволяє використовувати модеми малої потужності для підключення наземних датчиків. Будучи здатними надавати послуги з'єднання з низькою вартістю, низьким енергоспоживанням і низькою швидкістю передачі даних, невеликі супутники забезпечують архітектуру прямого зв'язку з супутником, яка дозволяє обходити локальні мережі IoT і наземні шлюзи IoT.

Глобальною тенденцією в розвитку супутникових LEO-систем різного призначення є використання малих і надмалих космічних апаратів: міні-, мікро-, наносупутників і кубсатів як окремого сегменту наносупутників. Класифікація малих і надмалих космічних апаратів проводиться за показником стартової маси космічного апарата (маса космічного апарата на початку строку експлуатації з урахуванням запасу палива).

Зусилля щодо досліджень і розробок малих супутників швидко зростають із появою нових гравців, які зосереджуються на негеостаціонарних орбітах та інтегрують продукти та послуги різних технологій провайдерів. Більшість запланованих невеликих супутникових місій по всьому світу розглядають зв'язок і використання дуже маленькі платформи, такі як CubeSats. Окрім забезпечення покриття віддалених районів, космічний сегмент повинен мати можливість підтримувати послуги з низькою затримкою, а це можливо лише на нижчих орбітах. Супутники в майбутній системі можна адаптувати в процесі орбітальної

експлуатації за допомогою вбудованих можливостей обробки. Наприклад, програмно-визначені радіоприймачі з космічним захистом можуть забезпечити вбудовану обробку сигналів, яка може бути оновлена протягом терміну експлуатації супутника. Удосконалюючи технічні можливості, також важливо мати можливість дуже ефективно використовувати радіоресурси, що може означати вузькі промені антен і динамічне спільне використання.

В дослідженні запропоновано концепцію архітектури низькоорбітальної супутникової системи Інтернету речей, орієнтованої на широке коло споживачів послуг Інтернету речей, як толерантних до величини затримки обробки інформації інтернету речей, так і чутливих до величини затримки. Низькоорбітальну складову супутникової системи Інтернету речей побудовано з використанням стандартизованих інформаційних технологій супутникового зв'язку та Інтернету речей. Вона реалізує механізми, спрямовані на виконання вимог міжнародних регуляторних документів у галузі регулювання використання радіочастот, доступу до орбіт, космічного сміття тощо. Низькоорбітальна складова забезпечує взаємодію безпосередньо із пристроями Інтернету речей, що розташовані на поверхні Землі. Геостаціонарна складова сформована двома типами супутників – супутники-ретранслятори, які забезпечують взаємодію із супутниками зі складу LEO орбітального угруповання і забезпечують безпеку доступу до супутникових хмарних центрів обробки та збереження інформації, і власно супутниками – хмарними центрами обробки інформації.

## **2.2 НГСО складова системи на базі архітектури розподіленого супутника**

### *Архітектура «розподіленого супутника»*

НГСО складова супутникової інфраструктури Інтернету речей побудована на основі архітектури «розподіленого супутника». Основою концепції архітектури «розподіленого супутника» (РС-архітектура) є розподіл корисного навантаження одного супутника більшого класу між декількома супутниками меншого класу (за показником маси космічного апарата), і формування на орбіті польотної структури,

яка визначає взаємне розташування супутників для спільного виконання функціонального завдання. Супутники в складі РС створюють мікроугруповання і здійснюють груповий політ у безпосередній близькості один від одного. У кожного супутника зі складу РС є свої функції та функціональні завдання корисного навантаження. РС-архітектура дозволяє використовувати для створення НГСО-систем зв'язку супутники класу мікросупутник (масою від 10 до 100 кг) і наносупутник або кубсат (масою від 1 до 10 кг).

Можливі два варіанти РС-архітектури: централізована і децентралізована архітектура. У централізованій або ієрархічній архітектурі РС-архітектурі є один кореневий супутник (див. рис. 2.2). Це супутник більшого класу (за показником маси). Його функції – це керування польотом мікроугруповання і управління функціонуванням всіх прикінцевих супутників, які є супутниками меншого класу. У децентралізованій РС-архітектурі функції управління польотом і функціонуванням мікроугруповання розподілені між супутниками одного класу і реалізуються на основі алгоритмів управління розподіленими структурами, що самоорганізуються.

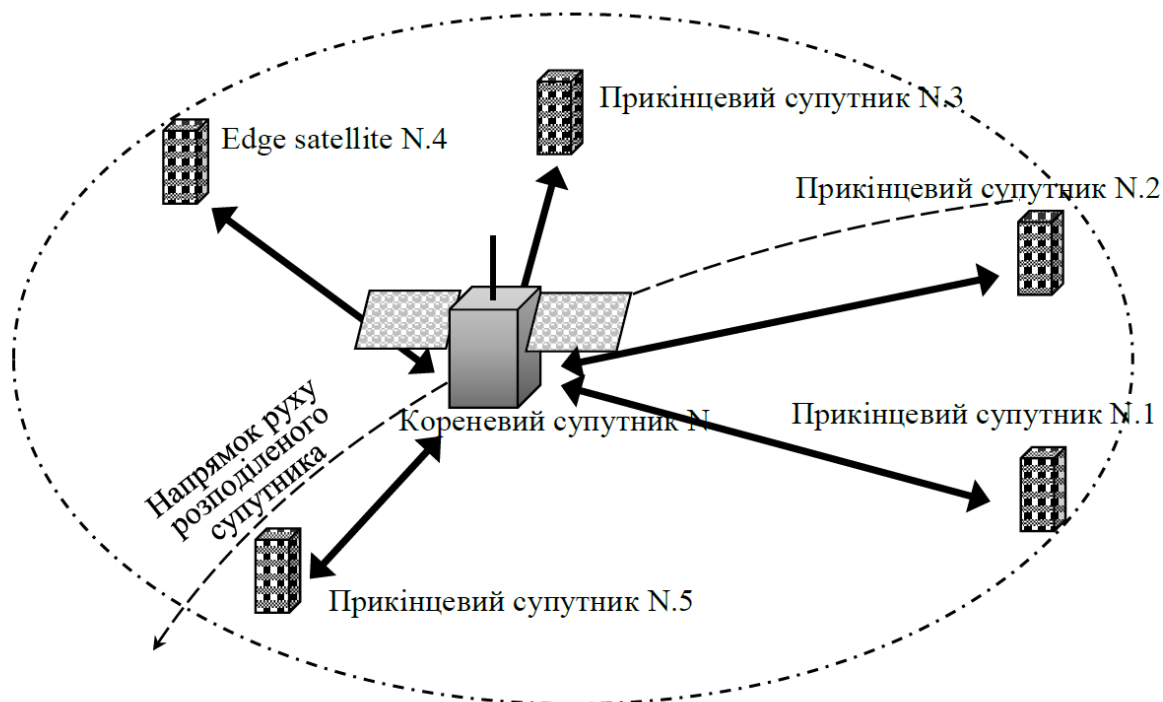


Рис. 2.2 Централізована РС-архітектура

До складу розподіленого супутника централізованої архітектури (див. рис.2.2) входять такі елементи:

- Кореневий супутник;
- Прикінцеві супутники;
- Внутрішня радіомережа.

Кореневий супутник забезпечує управління функціонуванням і груповим польотом РС, як власне кореневого супутника, так і усіх прикінцевих супутників, а також управління і координацію функціонування корисного навантаження прикінцевих супутників щодо виконання функціональних завдань розподіленого супутника і супутникової системи в цілому. До функцій кореневого супутника відноситься підтримка ліній зв'язку із кореневими супутниками двох сусідніх розподілених супутників в своїй та двох сусідніх орбітальних площинах, по одному в кожній. Сукупність радіоліній зв'язку між супутниками утворює транспортну мережу для орбітальної системи передачі даних.

Прикінцеві супутники призначені для виконання обмеженого обсягу функціональних задач. Функціональне призначення прикінцевого супутника визначається його корисним навантаженням. В НГСО складовій супутникової інфраструктури Інтернету речей визначені такі прикінцеві супутники за своїм функціональним призначенням: супутники-ретранслятори стандарту NB-IoT, супутники-ретранслятори стандарту LoRaWAN, супутники-обчислювачі орбітальної обчислювальної мережі туманних обчислень, супутники-ретранслятори лінії зв'язку між НГСО та ГСО складовими супутникової інфраструктури.

Внутрішня радіомережа розподіленого супутника призначена для забезпечення інформаційного обміну між кореневим супутником і прикінцевими супутниками. Внутрішня радіомережа розподіленого супутника побудована на базі модифіцированого протоколу широкосмугової передачі інформації типу WiMAX, 4G/LTE. Додатково до забезпечення передачі інформаційних потоків за функціональним призначенням внутрішня радіомережа розподіленого супутника

забезпечує передачу командно-телеметричної інформації між кореневим та прикінцевими супутниками, та проведення вимірювання взаємного положення і взаємного руху супутників у складі мікроугруповання розподіленого супутника. Останнє завдання має важливе значення для забезпечення безпеки групового польоту і запобігання небезпечному наближенню або зіткненню супутників. На рис. 2.3 показаний принцип проведення вимірювань відносного взаємного положення та відносного взаємного руху прикінцевих супутників в пов'язаній супутниковій (орбітальній) системі координат кореневого супутника.

Вимірювання передбачають визначення похилої дальності між кореневим та прикінцевим супутником та обчислення двох кутів:  $\alpha$  і  $\beta$ . Обчислення зазначених параметрів дозволяє визначити поточне розташування усіх прикінцевих супутників зі складу розподіленого супутника.

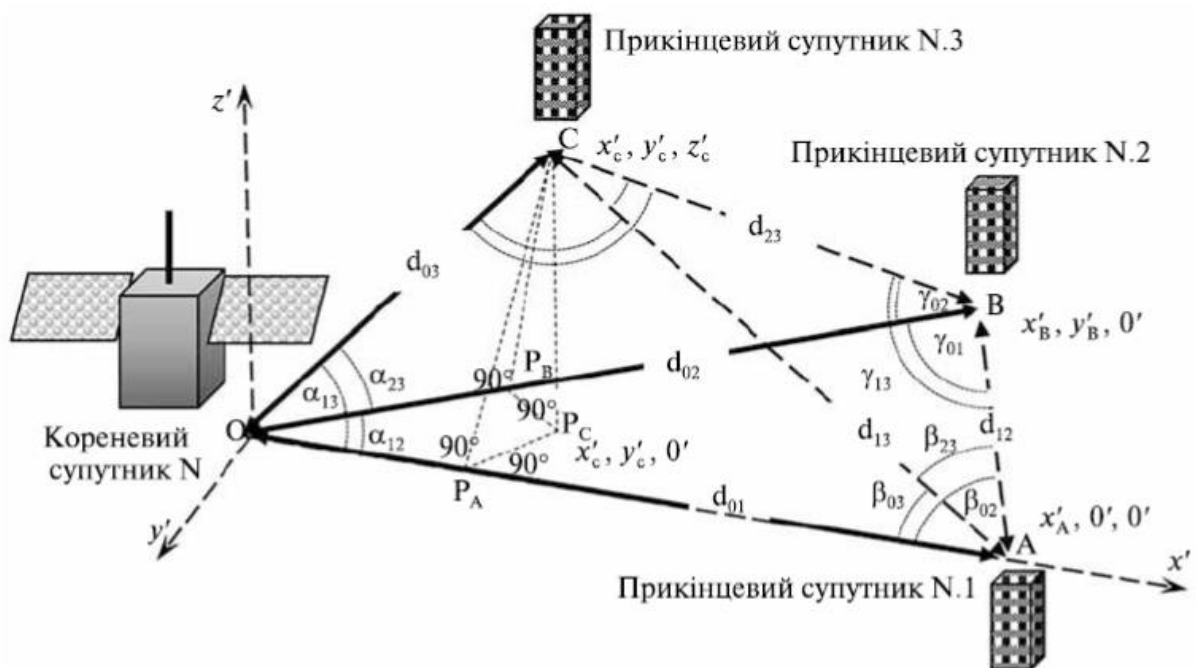


Рис. 2.3 Визначення координат прикінцевих супутників в супутниковій системі координат кореневого супутника

Для забезпечення надавання безперервної послуги НГСО складова системи Інтернету речей має сформувати орбітальне угруповання.

Основними параметрами орбітального угруповання НГСО складової системи Інтернету речей є:

- висота орбіти,  $h$ ;
- нахилення орбіти,  $i$ ;
- мінімальна і максимальна широта зони пріоритетного обслуговування, або суцільного покриття,  $l_{\min}$ ,  $l_{\max}$ ;
- мінімальний кут місця антен терміналів земних станцій, VSAT-терміналів, пристроїв користувачів Інтернету речей,  $\beta_{\min}$ ;
- ширина смуги обслуговування для однієї орбітальної площини,  $L$ .

На основі зазначених параметрів визначаються:

- кількість космічних апаратів в орбітальній площині  $M$  і кутове, або фазове, рознесення між ними;
- кількість орбітальних площин  $N$  і кутове рознесення між ними по довготі висхідного вузла.

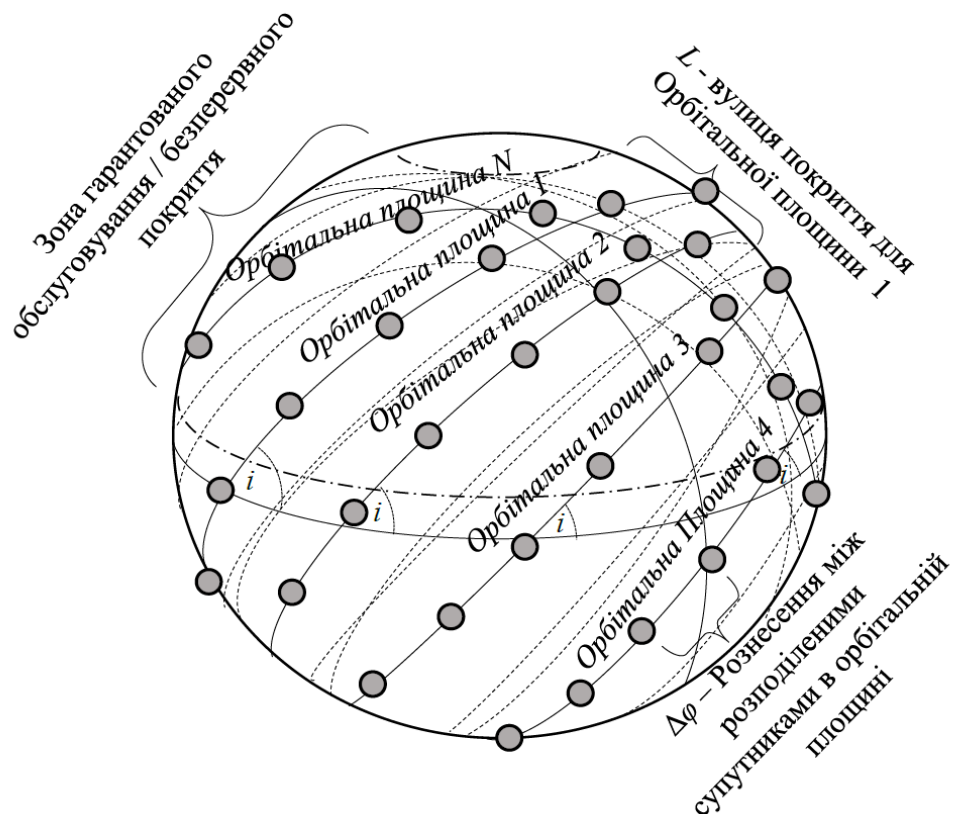


Рис.2.4 Структура орбітального угруповання НГСО складової супутникової інфраструктури Інтернету речей

На рис.2.4. наведено приклад архітектури орбітального угруповання НГСО складової системи Інтернету речей, яке складається з  $N$  орбітальних площин, і в кожній орбітальній площині розташовано  $M$  РС. При визначенні архітектури орбітального угруповання НГСО складової системи IoT кожен РС позначається як один супутник.

На рис.2.5 наведено приклад розташування РС в одній орбітальній площині НГСО складової супутникової системи Інтернету речей.

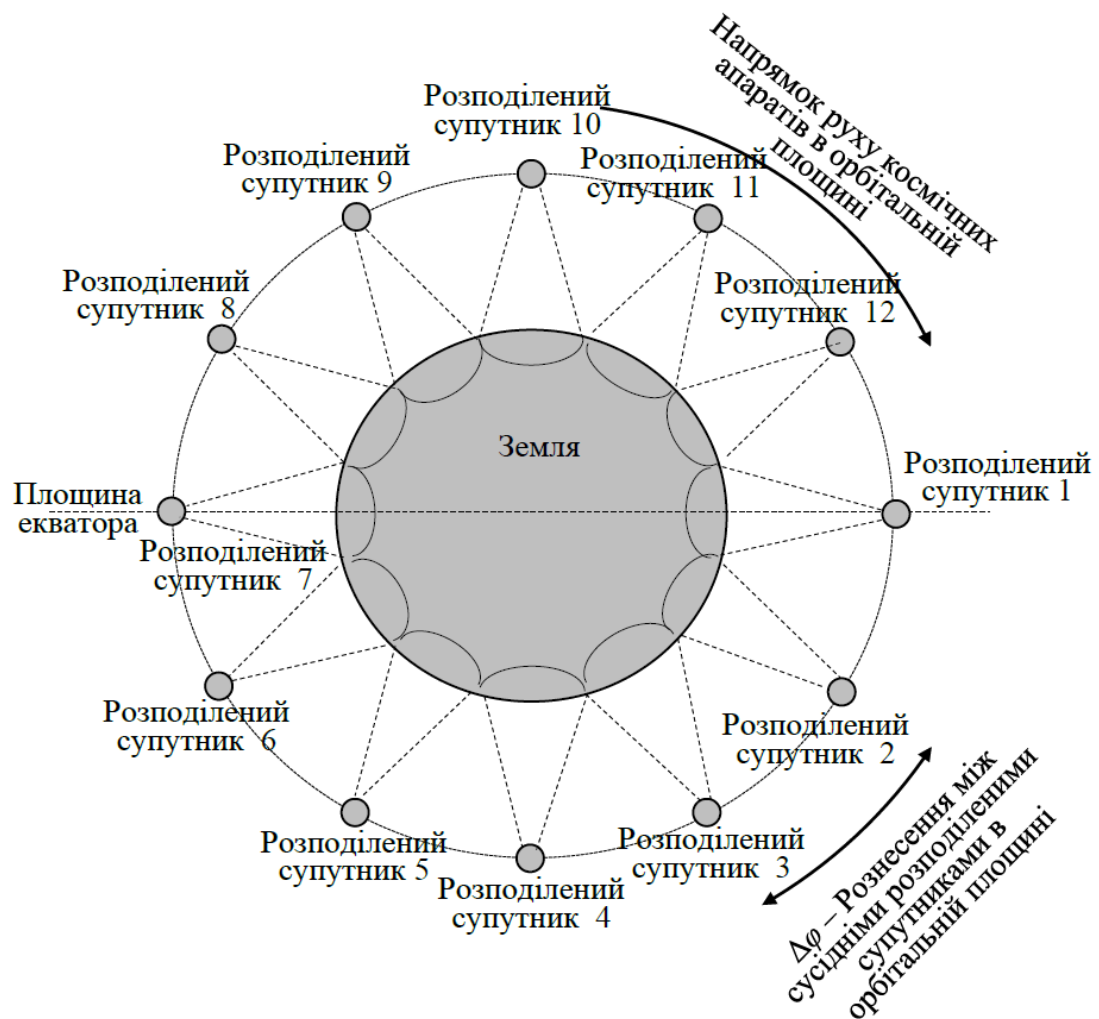


Рис.2.5 Розташування розподілений супутників в орбітальній площині НГСО угруповання системи Інтернету речей

Зона обслуговування розподіленого супутника формується як сукупність зон обслуговування прикінцевих супутників – ретрансляторів. На рис. 2.6 показаний

приклад формування зони обслуговування одного розподіленого супутника, який забезпечує надання послуг в стандартах LoRaWAN та NB-IoT (3GPP).

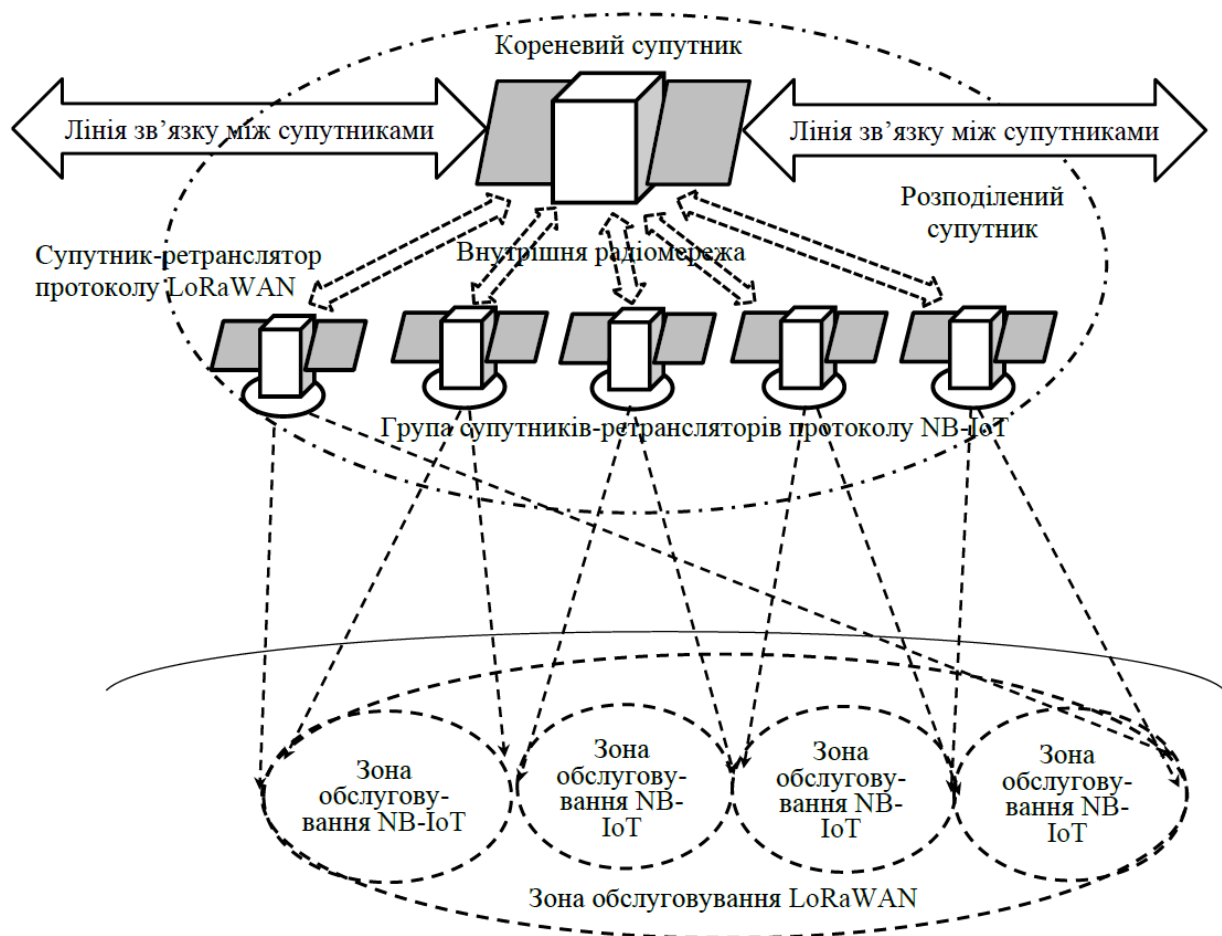


Рис.2.6 Формування зони обслуговування одного розподіленого супутника в протоколах LoRaWAN та NB-IoT (3GPP)

Зважаючи на те, що кожен прикінцевий супутник – ретранслятор зі складу розподіленого супутника забезпечує передачу/прийом інформації від пристроїв Інтернету речей тільки в одному протоколі, LoRaWAN або NB-IoT, розміри зони обслуговування кожного супутника – ретранслятора визначаються особливостями функціонування протоколу у складі супутникової системи. До факторів супутникової радіолінії, які негативно впливають на умови передачі – прийому радіосигналів в НГСО супутникових системах відносяться: затримка на поширення сигналу по трасі «пристрій користувача – супутник – сервер – супутник – пристрій користувача», що визначається часом двосторонньої передачі (в англійській літературі використовується термін Round Trip Time, RTT); доплерівський зсув



частоти, який зумовлений взаємним рухом супутника та пристрою на поверхні Землі.

Протокол LoRaWAN, фізичний рівень якого побудований із використанням лінійно-частотної модуляції, може бути адаптований до особливостей НГСО супутникової радіолінії шляхом вимірювань і компенсації доплерівського зсуву частоти та врахування зміни часу двосторонньої передачі інформації. У зв'язку із цим супутник-ретранслятор протоколу LoRaWAN має широку зону обслуговування, як це показано на рис. 2.6.

Фізичний рівень протоколу NB-IoT побудований із використанням сигналів ортогональної частотної модуляції (сигнали OFDM), які досить чутливі до впливу доплерівського зсуву частоти. Для адаптації систем із сигналами OFDM до особливостей НГСО систем в ряді досліджень запропоновано формувати вузькі зони обслуговування супутників, в межах яких здійснюється компенсація середнього значення доплерівського зсуву. Розмір цієї парціальної зони обслуговування пов'язаний із здатністю системи з OFDM сигналами функціонувати із залишковим доплерівським зсувом. На рис.2.6 показано чотири супутники – ретранслятори NB-IoT, кожен з яких формує власну зону обслуговування. Суцільна зона обслуговування протоколу NB-IoT одного розподіленого супутника формується як сукупність суміжних зон обслуговування супутників – ретрансляторів NB-IoT.

Для забезпечення безперервного надання послуг Інтернету речей в НГСО складовій супутникової системи Інтернету речей розподілені супутники розташовані в одній орбітальній площині таким чином, щоб зони обслуговування двох розподілених супутників, що послідовно рухаються по орбіті, були сумісними (див. рис.2.7). Кілька космічних апаратів, які розташовані послідовно в одній орбітальній площині на низькій навколоземній орбіті, формують смугу обслуговування орбітальної площини (Street).

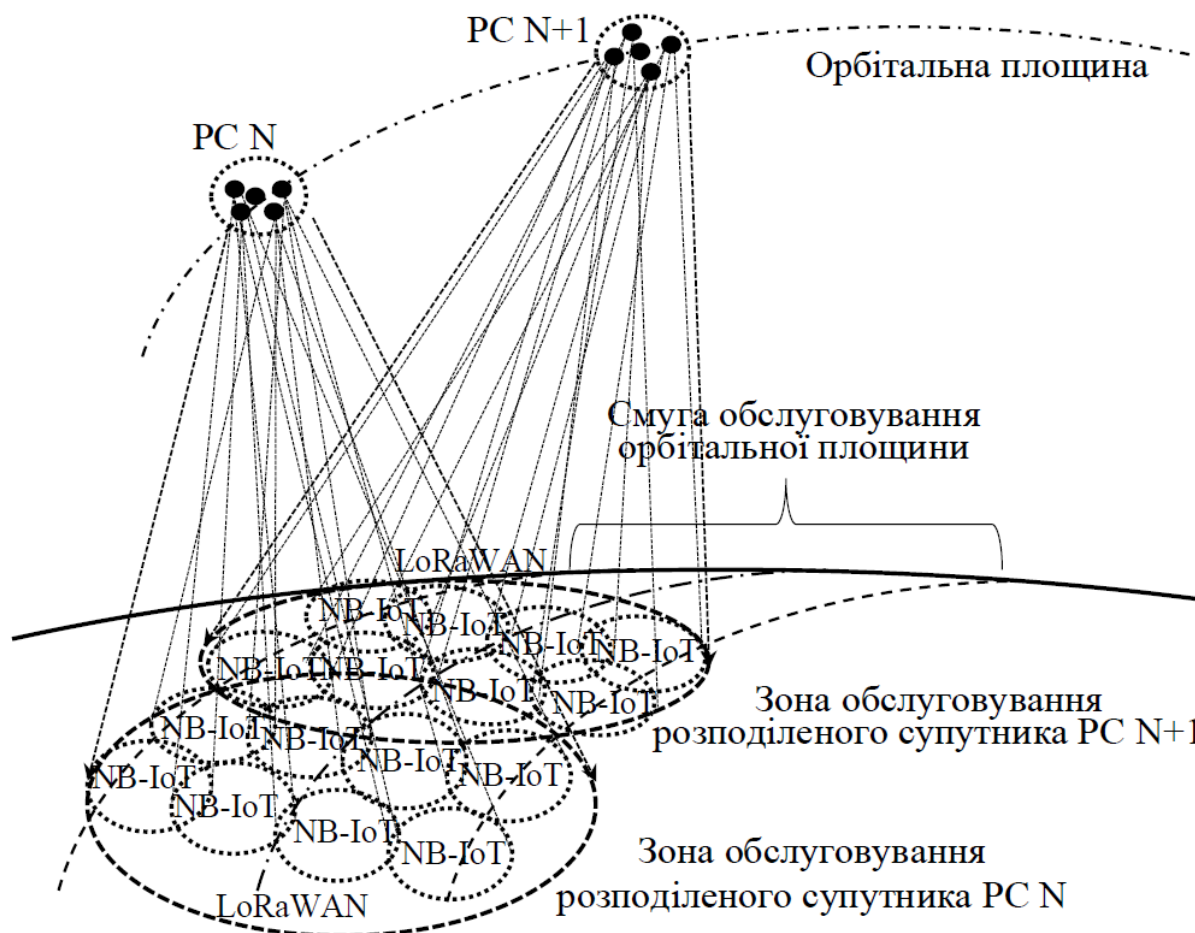


Рис. 2.7 Формування смуги обслуговування (вулиці) однієї орбітальної площини в LEO System IoT з PC-архітектурою

Зважаючи на те, що в супутниках – ретрансляторах протоколу LoRaWAN та протоколу NB-IoT здійснюється компенсація доплерівського зсуву, пристрої користувачів Інтернету речей, що розташовані на Землі, послідовно переходять із зони обслуговування одного розподіленого супутника до зони обслуговування наступного за ним розподіленого супутника. Для здійснення плавного переходу із однієї зони обслуговування до іншої між розподіленими супутниками здійснюється процедура хендоверу, яка є звичайною процедурою для стандартів наземного стільникового зв'язку. Аналогічна процедура виконується і в межах одного розподіленого супутника для протоколу NB-IoT.

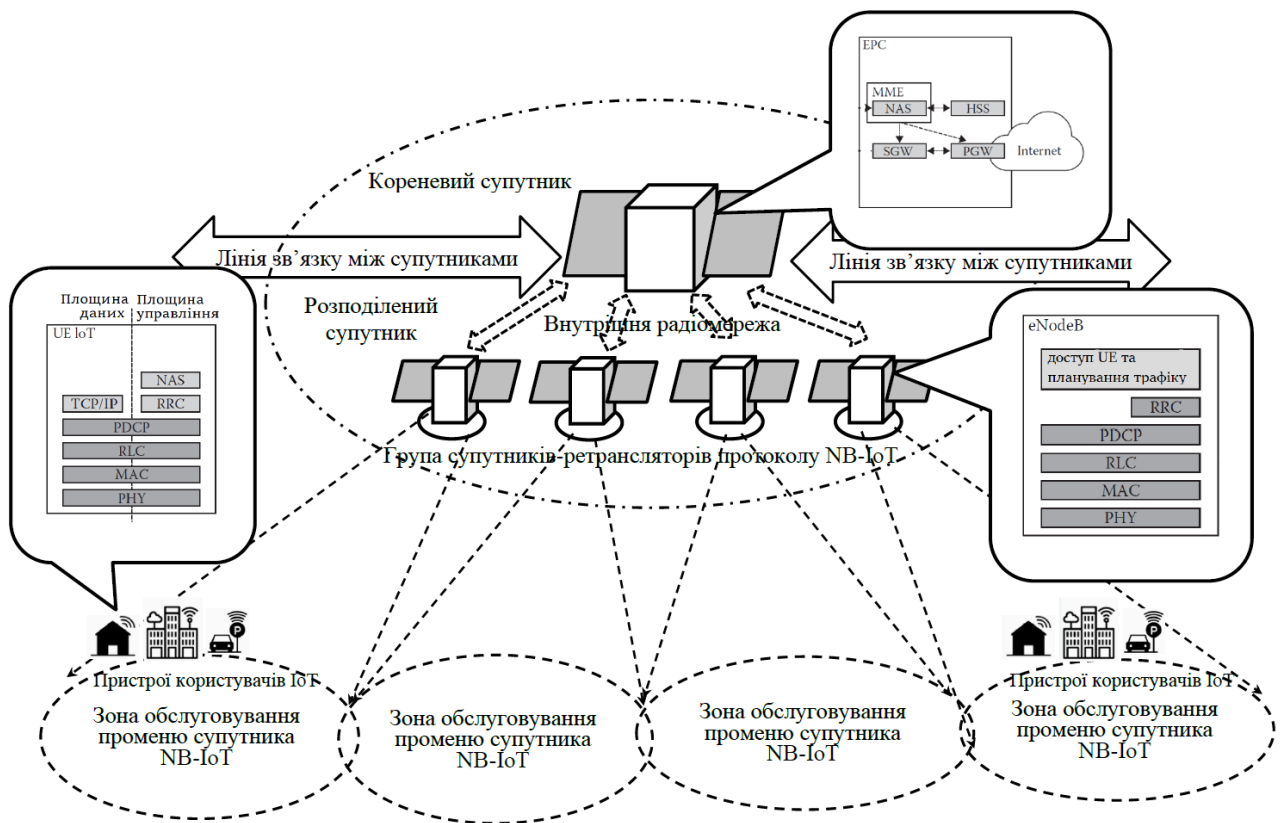


Рис.2.8 Реалізація протоколу NB-IoT в НГСО складовій супутникової інфраструктури Інтернету речей

На рис.2.8 показана реалізація протоколу NB-IoT (3GPP) в НГСО складовій супутникової інфраструктури Інтернету речей. Пристрій користувача, який знаходиться на поверхні Землі і підключений до фіксованого або рухомого об'єкту, реалізує функції, які відповідають завданням пристрою користувача UE в системі NB-IoT, що побудована на базі мережі 4G/LTE, 5G. В площині даних та управління пристрій користувача UE реалізує протоколи фізичного рівня PHY, рівня доступу до середи передачі MAC, рівня управління радіолінією RLC та протокол обміну пакетами даних між рівнями PDCP.

Супутник-ретранслятор, який входить до складу розподіленого супутника і є прикінцевим супутником, виконує функції, що аналогічні функціям eNodeB базової станції мережі UTRAN. По радіоінтерфейсу UE супутник-ретранслятор забезпечує інформаційний обмін з пристроями користувачів UE, що знаходяться в межах зони обслуговування супутника-ретранслятора. Корисне навантаження супутника-ретранслятора виконує функції на таких рівнях: фізичний рівень PHY, рівень

керування доступу до середи передачі MAC, рівень управління радіолінією RLC, протокол передачі пакетів між рівнями PDCP та рівень керування радіоресурсом RRC. Супутник-ретранслятор взаємодіє із кореневим супутником зі складу розподіленого супутника за допомогою внутрішньої мережі розподіленого супутника. До корисного навантаження кореневого супутника включено обладнання, яке здійснює функції, що аналогічні функціям кореневої мережі EPS за релізами 3GPP. Для реалізації протоколу NB-IoT до корисного навантаження кореневого супутника включене обладнання, що реалізує функції центру мобільної комутації MME. Кореневий супутник розподіленого супутника за допомогою ліній зв'язку з іншими розподіленими супутниками формують базову орбітальну кореневу мережу системи NB-IoT.

Для реалізації протоколу LoRaWAN до складу кожного розподіленого супутника зі складу HGSO складової включено окремий супутник-ретранслятор протоколу LoRaWAN. На рис.2.9 наведено схему надання послуг системи LoRaWAN на базі архітектури розподіленого супутника, та показані функції кожного елемента в структурі моделі OSI. Пристрої кінцевих користувачів UE розташовані на поверхні Землі і з'єднані із стаціонарними та мобільними фізичними пристроями: датчиками та актуаторами. Кожен пристрій користувача здійснює функції на фізичному рівні, що пов'язано із модуляцією LoRa, на рівні контролю доступом до середи передачі MAC та на рівні додатків, що відображає функціональне призначення фізичних пристроїв.

Прикінцевий супутник, який призначений для надання послуг за стандартом LoRaWAN, забезпечує прийом/передачу сигналів LoRaWAN і виконує функції шлюзу LoRaWAN (див. рис.2.9). Основною функцією шлюзу в системі LoRaWAN є прийом інформації від пристрою IoT, демодуляція LoRaWAN, і формування транспортного потоку до серверу мережі. Корисне навантаження прикінцевого супутника забезпечує прийом/передачу інформації на фізичному рівні модуляції LoRa, та передачу інформації по внутрішній радіомережі розподіленого супутника в форматі UDP до серверу мережі, який реалізований у складі корисного навантаження кореневого супутника. Корисне навантаження кореневого супутника

реалізує операції з обробки та передачі інформації на транспортному рівні, рівні керування доступом до середи передачі інформації та прикладному рівні додатків (див. рис.2.9). На відміну від інфраструктури обробки інформації протоколу NB-IoT, конфігурація передачі та обробки інформації за стандартом LoRaWAN передбачає використання серверів додатків (рівень 7 моделі OSI). Ці функції покладено на окремий прикінцевий супутник-обчислювач. Для реалізації функцій серверу додатків корисне навантаження супутника-обчислювача має виконувати завдання, що відносяться до рівнів 4-7 моделі OSI (див. рис.2.9).

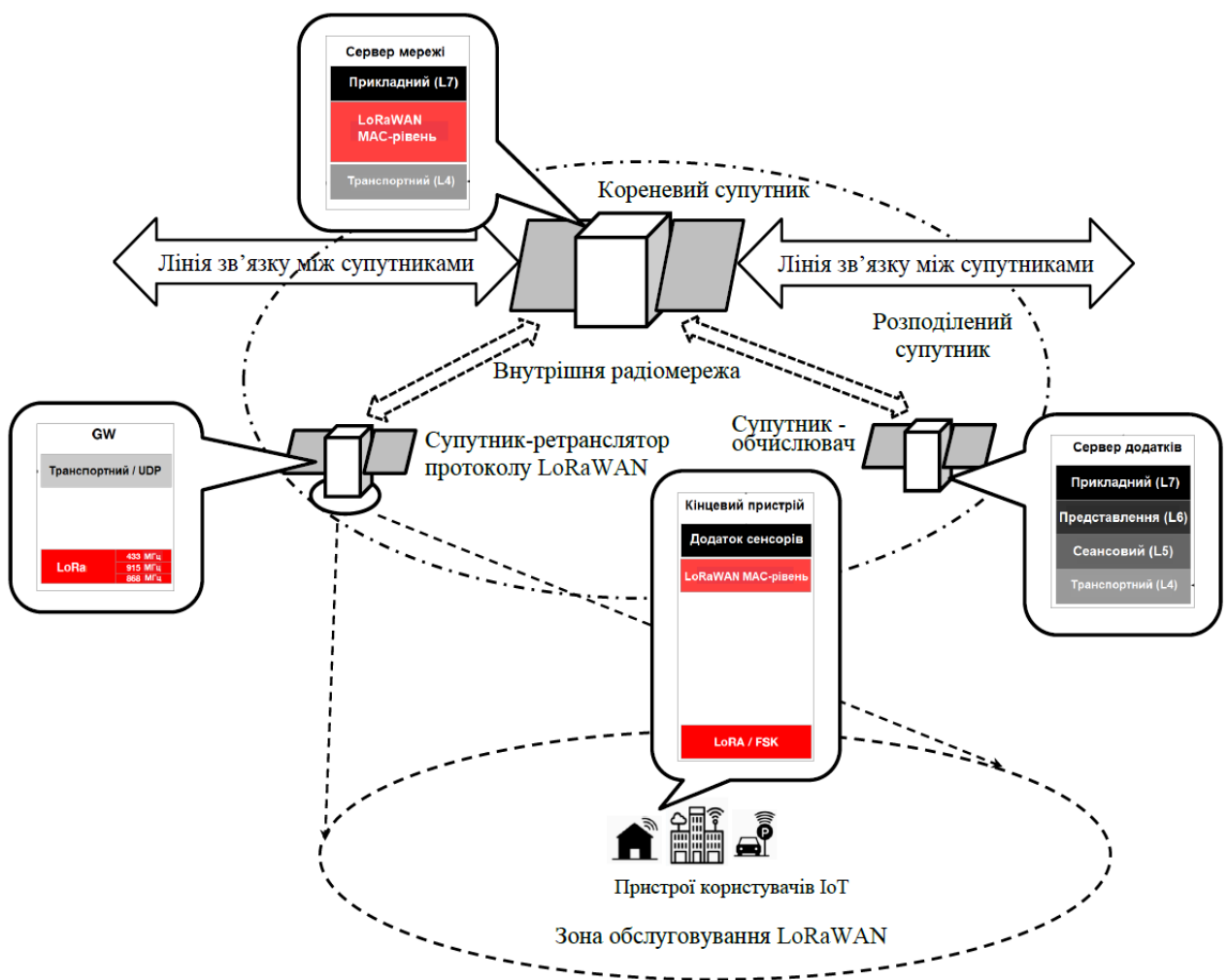


Рис.2.9 Реалізація протоколу LoRaWAN в НГСО складовій супутникової інфраструктури Інтернету речей

Для забезпечення взаємодії ГСО та НГСО сегментів супутникової інфраструктури Інтернету речей до складу окремих, спеціально визначених розподілених супутників зі складу НГСО орбітального угруповання включені

спеціальні супутники-ретранслятори лінії зв'язку НГСО – ГСО. На рис.2.10 приведена схема, що пояснює взаємодію НГСО та ГСО складових супутникової інфраструктури Інтернету речей.

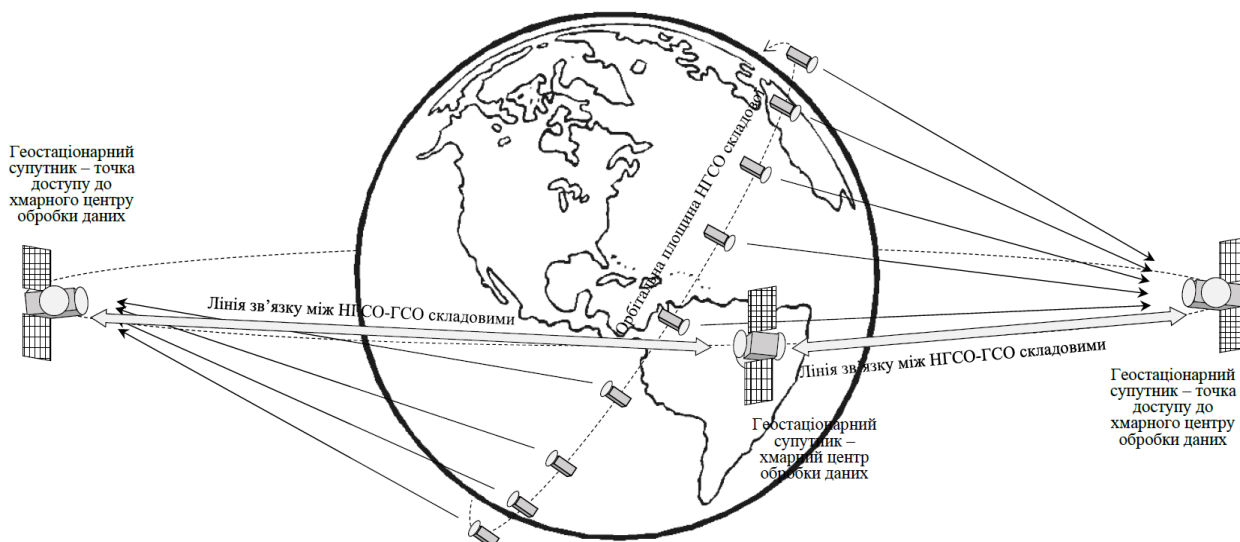


Рис.2.10 Взаємодія НГСО та ГСО складових супутникової інфраструктури Інтернету речей на прикладі однієї орбітальної площини НГСО складової

Для організації зв'язку між НГСО та ГСО сегментами супутникової інфраструктури Інтернету речей до складу НГСО сегменту введені окремі супутники-ретранслятори НГСО-ГСО. Як показано на рис.2.10, супутники-ретранслятори НГСО-ГСО забезпечують організацію та підтримку супутникової радіолінії НГСО-ГСО із супутником-ретранслятором на ГСО, до зони радіобачення якого входить супутник НГСО.

Архітектура Розподіленого супутника дозволяє включати до складу розподіленого супутника додаткові прикінцеві супутники, які призначені для виконання спеціалізованих завдань. Зокрема, до складу розподіленого супутника може бути включений окремий супутник-ретранслятор НГСО-ГСО супутникової радіолінії. На рис.2.11 показаний приклад включення до складу розподіленого супутника N+1 окремого супутника-ретранслятора НГСО-ГСО.

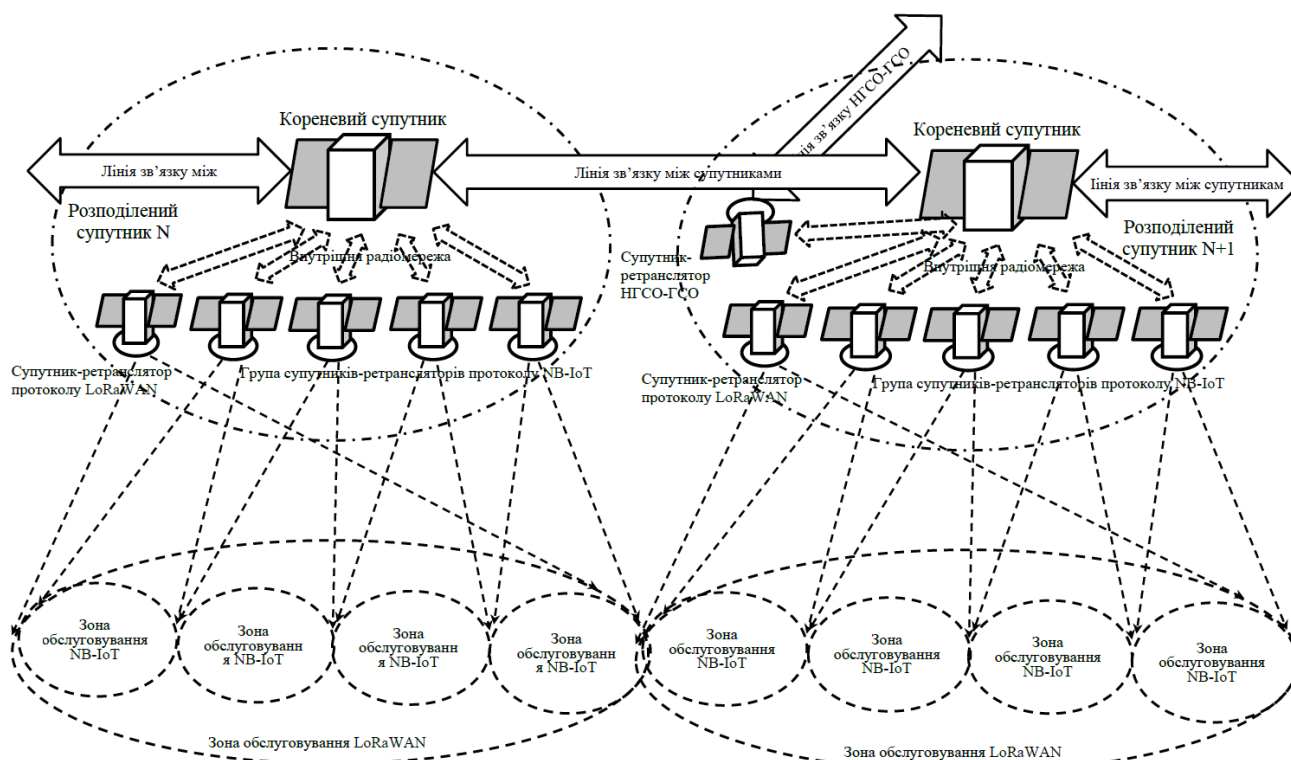


Рис.2.11 Організація взаємодії НГСО сегменту із ГСО сегментом шляхом включення до складу розподіленого супутника окремого супутника-ретранслятора НГСО-ГСО

Зважаючи на обсяги інформації, що циркулюють в ланці НГСО-ГСО за умови впровадження концепції туманних обчислень, обсяг трафіку в галі НГСО-ГСО буде меншим, ніж в ланці пристрій користувача – супутник-ретранслятор LoRaWAN / NB-IoT. Тому супутник-ретранслятор НГСО-ГСО можна включити до обмеженої кількості супутників-ретрансляторів в кожній орбітальній площині (див. рис.2.12).

Як показано на рис.2.12, до складу чотирьох з дванадцяти розподілених супутників орбітальної площини НГСО сегменту включені додатково супутники-ретранслятори НГСО-ГСО (РС номер 1, 4, 7, 10). Сусідні із ними розподілені супутники зі складу орбітальної площини отримують доступ до супутникової лінії НГСО-ГСО із використанням ліній зв'язку між розподіленими супутниками в орбітальній площині, як це показано на рис.2.12. Для мінімізації затримки передачі в лінії НГСО-ГСО, розподілені супутники згуртовані в умовні групи по три розподілені супутники: група 1 у складі РС№1, РС№2 та РС№12 згуртована



навколо РС№1, до складу якого включений супутник-ретранслятор НГСО-ГСО, група 2 згуртована навколо РС №4 і до її складу входять РС№3, РС№4 та РС№5. В разі виходу з ладу супутника-ретранслятора НГСО-ГСО, або перевантаження цього супутника-ретранслятора трафіком понад пропускну здатність лінії міжсупутникового зв'язку, що ним утворена, частина трафіку, або увесь трафік, буде спрямований до іншого розподіленого супутника із супутником-ретранслятором із використанням ліній зв'язку між супутниками в орбітальній площині.

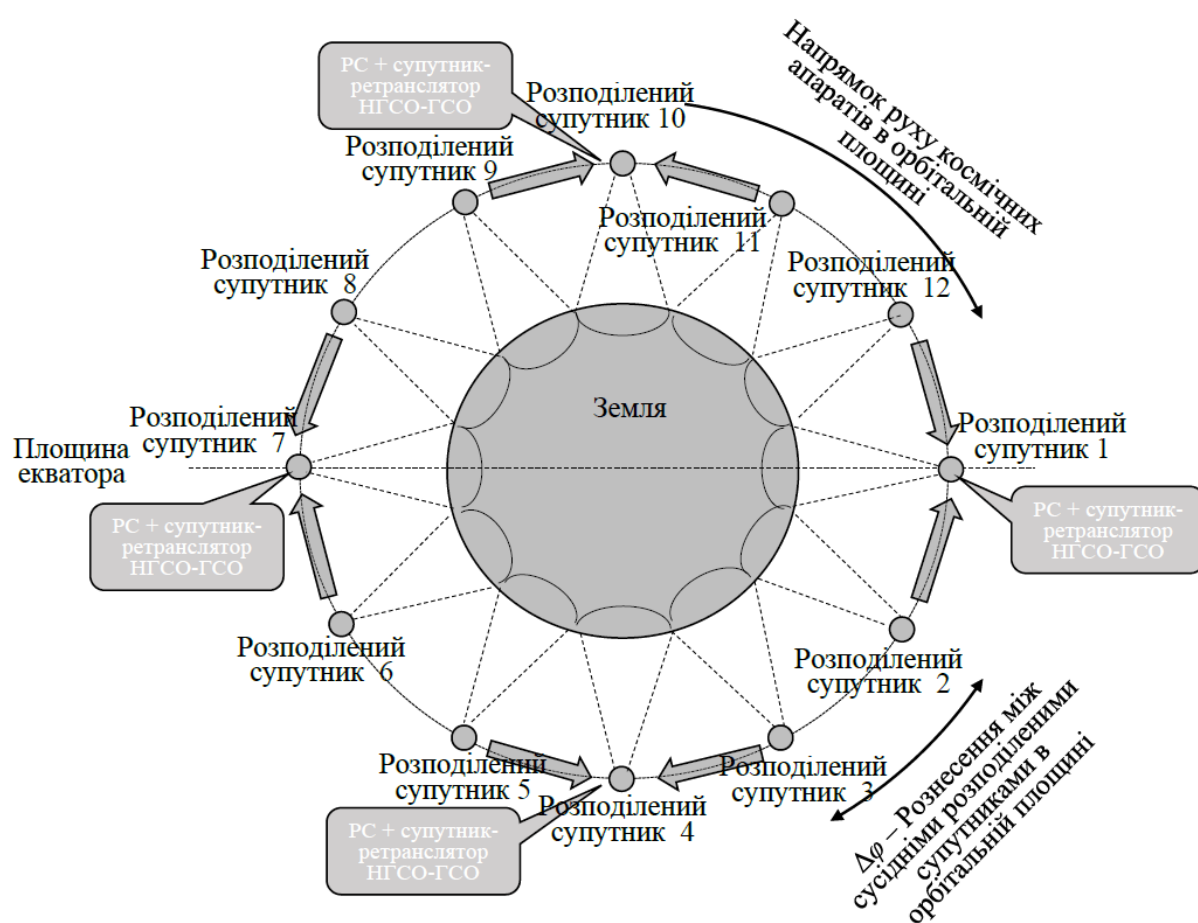


Рис.2.12 Напрямки передачі інформації в орбітальній площині сегменту НГСО для взаємодії з ГСО сегментом

Сучасні технології бортових антен діапазонів Ku, Ka, які використовуються для створення супутників радіолокаторів із синтезованою апертурою (скорочення англ. SAR) класу куб-сат дозволяють створити спрямовані параболічні антени зонтичного типу для організації супутникової лінії НГСО-ГСО. На рис. 2.13.



показано приклад куб-сату, який обладнаний параболічною антеною зонтичного типу, яка розгортається після виведення супутника на робочу орбіту. Цей прототип розроблений на замовлення NASA для використання у складі кубсатів форм-фактору 3U [15].



Рис.2.13. Концептуальна розробка параболічної антени, що розгортається, зонтичного типу на замовлення NASA

На відміну від інших прикінцевих супутників-ретрансляторів зі складу розподіленого супутника, супутник-ретранслятор НГСО-ГСО обладнаний спрямованою антеною, яка має бути наведена на супутник на ГСО. Таким чином, кубсат, який виконує функції супутника-ретранслятора НГСО-ГСО має забезпечувати орієнтацію в напрямку ГСО по трьох осях: рискання, тангажу та обертання.

Згідно Регламенту Радіозв'язку визначено, що для створення ліній зв'язку між супутниками визначено окрему супутникову службу: Стаття 1.22 міжсупутникова служба: Служба радіозв'язку, що забезпечує зв'язок між штучними супутниками. Для міжсупутникової служби в К-діапазоні виділені на первинній основі такі смуги частот: 22,55-23,15 ГГц (смуга 600 МГц), 23,15-23,55 ГГц (смуга 400 МГц), 24,45-24,65 ГГц (смуга 200 МГц), 24,65-24,75 ГГц (смуга 100 МГц). Для завдань обміну інформацією між НГСО та ГСО сегментами супутникової інфраструктури вузькосмугових послуг Інтернету речей можна обрати дві смуги частот по 100 МГц в напрямку «НГСО-ГСО» в смузі частот 22,55-

23,15 ГГц та в напрямку «ГСО-НГСО» в смузі частот 24,65-24,75 ГГц. Визначена загальна смуга 100 МГц поділена на смуги по 10 МГц, які розподілені для організації окремих ліній зв'язку між супутниками НГСО-ГСО із врахуванням відомих методів багаторазового використання частот.

На рис.2.14 показана ситуаційна схема, яка визначає вихідні дані для розрахунку НГСО-ГСО супутникової радіолінії.

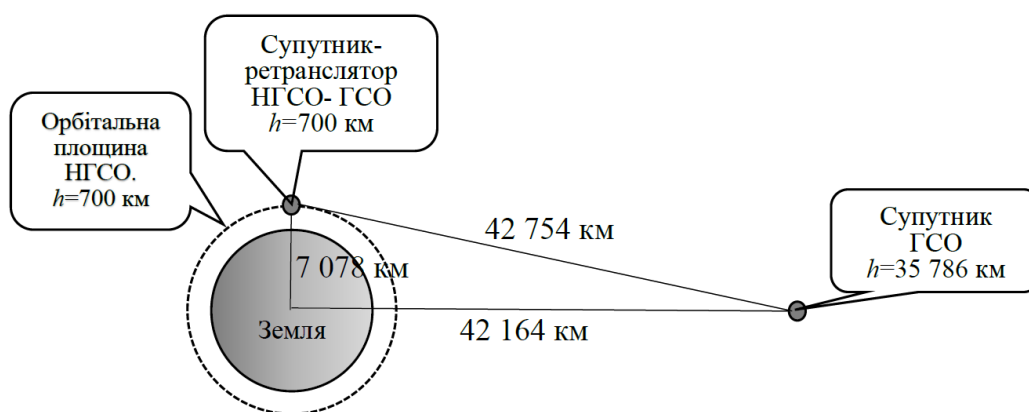


Рис.2.14 Ситуаційна схема організації лінії зв'язку між супутниками НГСО-ГСО

Для розрахунку прийнято, що НГСО складова супутникової інфраструктури використовує нахилену низьку навколоземну кругову орбіту висотою 700 км. Супутник-ретранслятор НГСО-ГСО входить до розподіленого супутника зі складу однієї з орбітальних площин. Як видно з рис. 2.14 організація лінії зв'язку між супутниками НГСО-ГСО можлива, коли розподілений супутник виходить із тіні Землі та із-за щільних шарів атмосфери. Практична відсутність атмосфери на висоті 700 км (присутні залишки атмосферних газів) дозволяє спростити розрахунок супутникової радіолінії НГСО-ГСО. Для розрахунку приймаємо, що кубсат – супутник-ретранслятор НГСО-ГСО обладнаний зонтиковою антеною діаметром 0,5м, а ГСО супутник-ретранслятор обладнаний антеною діаметром 3,5м. Для функціонування лінії НГСО-ГСО відношення сигнал/шум має становити 10 дБ, для лінії ГСО-НГСО відповідно 18 дБ. Наведені дані враховують запас +2дБ.

*Результати розрахунку:*

- Підсилення антени кубсата на прийом  $G_{\text{НГСО}}=38,6$  дБ, на передачу  $G_{\text{НГСО}}=39,2$  дБ.
- Підсилення антени ГСО супутника на прийом  $G_{\text{ГСО}}=58,5$  дБ, на передачу  $G_{\text{ГСО}}=59,1$  дБ.
- Затухання на лінії НГСО-ГСО становить  $L_{\text{НГСО-ГСО}}=212,3$  дБ, на лінії ГСО-НГСО відповідно  $L_{\text{ГСО-НГСО}}=212,9$  дБ.
- Потужність шуму в смузі частот 10 МГц для прийомного тракту кубсату  $P_{\text{шНГСО}}=-127,46$  дБВт, для ГСО супутника відповідно  $P_{\text{ш}}=-127,8$  дБВт
- Потужність випромінювання передавача супутника ГСО становить 10 Вт, або  $P_{\text{ГСО}}=10$  дБВт, потужність передавача супутника НГСО становить 2 Вт, або  $P_{\text{НГСО}}=3$  дБВт.
- Еквівалентна ізотропно випромінювана потужність для супутника ГСО становить  $E_{\text{ГСО}}=66,09$  дБВт, для супутника НГСО становить  $E_{\text{НГСО}}=41,6$  дБВт.
- Потужність сигналу, що приймається, становить:
  - для супутника ГСО  $P_{\text{РГСО}}=-121,25$  дБВт,
  - для супутника НГСО  $P_{\text{РНГСО}}=-107,62$  дБВт.
- Величина відношення сигнал/шум становить:
  - для супутника ГСО  $[C/\text{Ш}]_{\text{ГСО}}=12,55$  дБ
  - для супутника НГСО  $[C/\text{Ш}]_{\text{НГСО}}=19,84$  дБ

Як показують розрахунки радіолінії для визначених параметрів радіолінії НГСО-ГСО виконуються визначені вимоги по показнику відношення сигнал/шум як в напрямку НГСО-ГСО, так й в зворотному напрямку ГСО-НГСО.

### **2.3. ГСО складова телекомунікаційної супутникової інфраструктури Інтернету речей**

Геостаціонарна (ГСО) складова телекомунікаційної системи супутникової інфраструктури Інтернету речей призначена для забезпечення доступу усіх елементів супутникової інфраструктури до орбітального хмарного сховища даних. ГСО складова забезпечує формування НГСО-ГСО ліній зв'язку між супутниками та ліній зв'язку між ГСО супутниками «ГСО супутник-ретранслятор – ГСО

спутник-хмарний центр обробки та збереження даних». На рис.2.15 показана схема взаємодії НГСО та ГСО складових супутникової інфраструктури Інтернету речей.

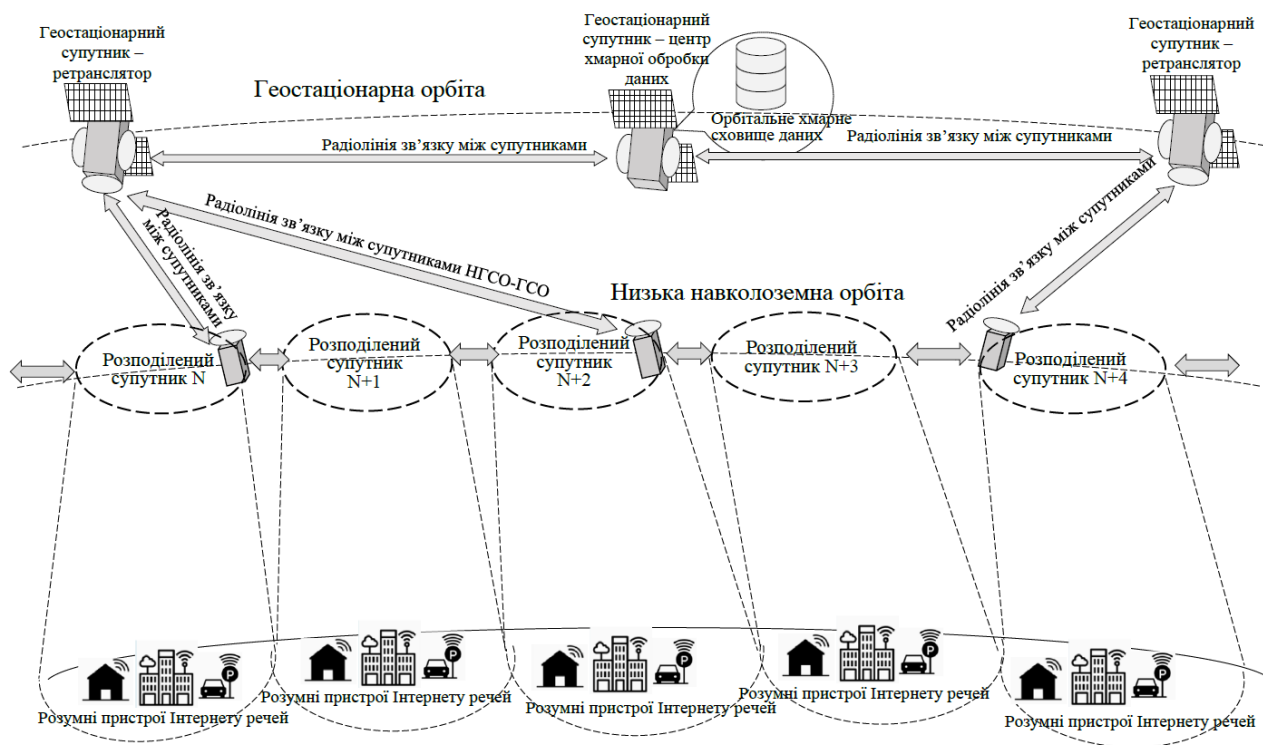


Рис.2.15 Схема взаємодії НГСО та ГСО складових супутникової інфраструктури Інтернету речей

Як видно з рис.2.15 та як показано в розділі 2.2, НГСО складова супутникової інфраструктури забезпечує безпосередню взаємодію із пристроями користувачів Інтернету речей (на рис.2.15 позначені як розумні пристрої Інтернету речей), використовуючи вузькосмугові стандарти LoRaWAN та NB-IoT. Архітектура розподіленого супутника, що покладена в основу побудови НГСО складової супутникової інфраструктури Інтернету речей дозволяє об'єднати в одній телекомунікаційній системі ці два стандарти. Частина розподілених супутників в кожній орбітальній площині має в своєму складі додатково супутник-ретранслятор НГСО-ГСО, який призначений для організації взаємодії НГСО та ГСО сегментів супутникової інфраструктури Інтернету речей. На геостационарній орбіті (ГСО) знаходяться як мінімум три ГСО супутники-ретранслятори, які забезпечують підключення НГСО сегменту до ГСО сегменту супутникової інфраструктури, і

передачі інформації до ГСО супутника – хмарного центру обробки та збереження даних (див. рис.2.15). Взаємодія супутників ретрансляторів НГСО та ГСО здійснюється за допомогою окремих ліній зв'язку між супутниками, які використовують частотний діапазон 22-24 ГГц, в якому згідно з Регламентом Радіозв'язку виділені окремі смуги частот для міжсупутникової служби (п.1.22 Регламенту Радіозв'язку).

Для організації взаємодії із ГСО супутниками – хмарними центрами збереження даних ГСО супутники-ретранслятори забезпечують формування окремої радіомережі передачі даних на ГСО за допомогою радіоліній зв'язку між супутниками.

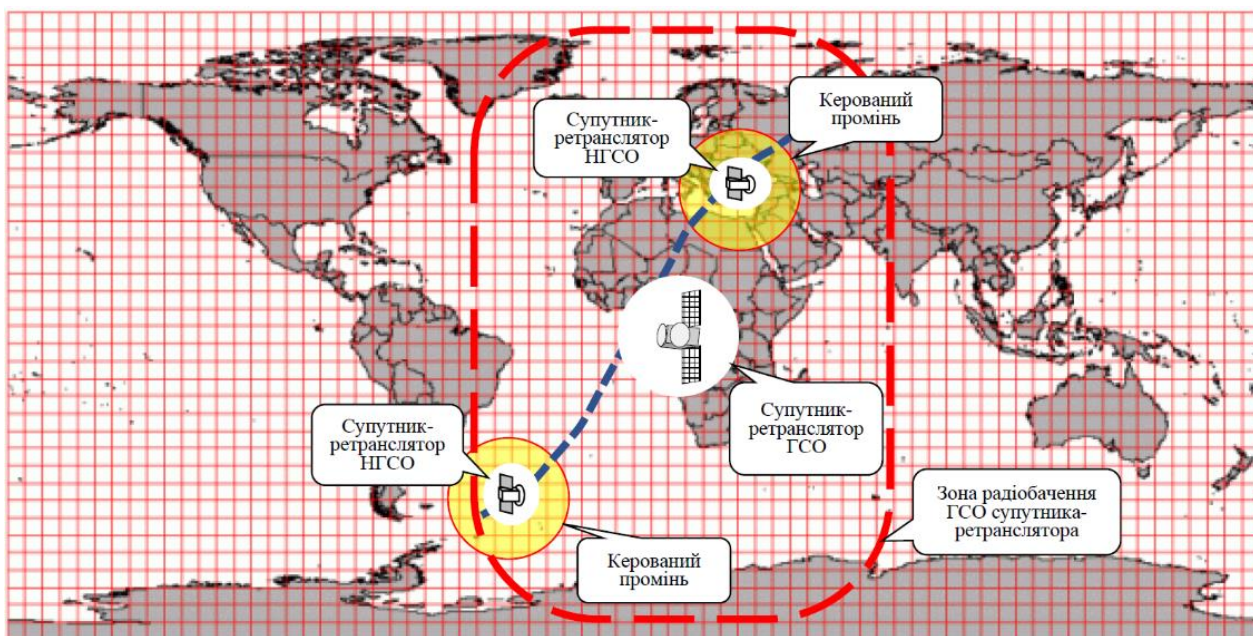


Рис.2.16 Організація лінії зв'язку між супутниками НГСО-ГСО за допомогою керованих променів

ГСО супутник-ретранслятор побудований із використанням технологій, що застосовуються для створення супутників надвеликої пропускної здатності (англійський термін HTS). В залежності від обраної архітектури радіотракту та антенної системи корисного навантаження ГСО супутника-ретранслятора можливі два варіанти забезпечення організації та підтримки лінії зв'язку між супутниками НГСО-ГСО. На рис.2.16 показаний варіант організації та підтримки лінії зв'язку між супутниками НГСО-ГСО за допомогою керованих променів ГСО супутника-



ретранслятора. Червоним пунктиром на рис.2.16 показана зона радіобачення ГСО супутника. Синім пунктиром показана траса супутника-ретранслятора НГСО-ГСО в межах зони радіобачення ГСО супутника-ретранслятора. На рис.2.16 показано випадок, коли в межах зони радіобачення знаходяться два супутники-ретранслятори НГСО-ГСО. ГСО супутник-ретранслятор формує окремий промінь для супроводження кожного супутника-ретранслятора НГСО-ГСО. Первинна орієнтація променя визначається даними балістичного розрахунку руху супутника-ретранслятора НГСО-ГСО.

На рис.2.17 представлена структура схема корисного навантаження ГСО супутника-ретранслятора. Основу корисного навантаження становить модуль цифрового корисного навантаження, який виконує в цифровому вигляді операції демодуляції/модуляції, декодування/кодування завадостійкими кодами із виправленням помилок, мультиплексування вхідних потоків та мультиплексування вихідних потоків, маршрутизації інформації від НГСО сегменту до ГСО супутників – хмарних центрів збереження даних.

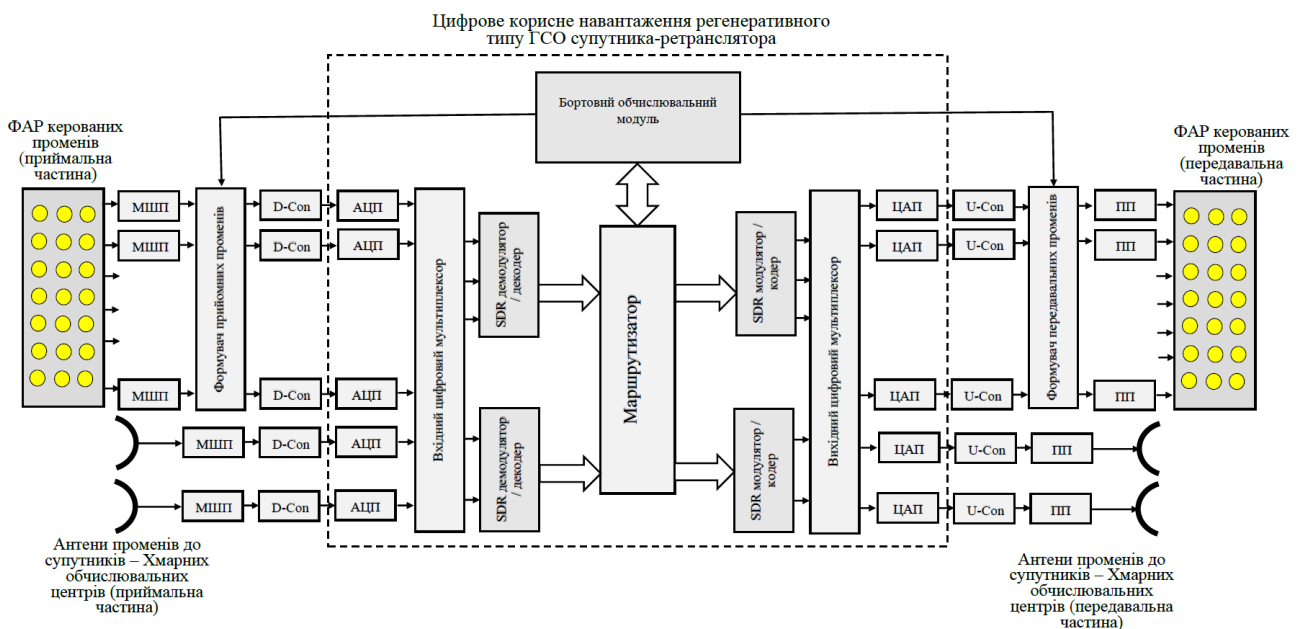


Рис.2.17 Корисне навантаження ГСО супутника-ретранслятора

Для забезпечення формування окремих променів до НГСО супутників-ретрансляторів корисне навантаження ГСО супутника-ретранслятора обладнано фазованими антенними решітками (окремо приймальна та передавальна). Бортовий

обчислювальний модуль виконує функції управління маршрутизатором та формувачами променів приймальної та передавальної фазованої антенної решітки. Для визначення орієнтації приймального та передавального променів використовуються дані балістичних розрахунків руху НГСО супутників-ретрансляторів.

Окрема до складу корисного навантаження НГСО супутника-ретранслятора включено два канали прийому та передачі інформації для формування ліній зв'язку між супутниками на ГСО. В цій лінії використовуються антени із фіксованим наведенням. Дві лінійки приймального та передавального обладнання дозволяють підтримувати лінії зв'язку між супутниками для забезпечення доступу до двох ГСО супутників-хмарних обчислювальних центрів.

Включення до складу центрального модуля цифрового корисного навантаження бортового обчислювального модуля дозволяє на додаток до функцій управління маршрутизацією та орієнтацією керованих променів забезпечити на рівні ГСО-супутника-ретранслятора контроль доступу до хмарного сховища даних.

Другим варіантом організації та підтримки лінії зв'язку між супутниками є використання технології фіксованих надвузьких променів. Зона обслуговування ГСО супутника-ретранслятора сформована як сукупність надвузьких променів. В цьому разі використовується технологія формування спотвих, або надвузьких променів, яка є відмінністю супутників надвисокої пропускної здатності. В розділі 2.2 для проведення розрахунку лінії зв'язку між супутниками встановлено, що ГСО супутник-ретранслятор обладнаний антеною діаметром 3,5м. В частотному діапазоні 22-24 ГГц, де виділені окремі смуги частот для міжсупутникової служби, довжина хвилі становить  $1,22 \div 1,3$  см. Для довжини хвилі 1,3 см, яка є показником лінії НГСО-ГСО, ширина променю за рівнем -3дБ становить  $0,26^\circ$ . Зважаючи на досвід існуючих ГСО супутників надвисокої пропускної здатності, наприклад супутники серії Inmarsat-V, які формують зону обслуговування аналогічним чином в частотному діапазоні Ka 20/30 ГГц, кількість надвузьких променів може становити до 90. На рис.2.18 показаний приклад руху супутника-ретранслятора

НГСО-ГСО в межах зони радіобачення ГСО супутника-ретранслятора, яка сформована у спрощеному вигляді 18 променів. Супутник-ретранслятор НГСО-ГСО рухаючись по орбіті потрапляє в зону радіобачення ГСО супутника-ретранслятора. Використовуючи балістичну інформацію щодо руху супутника-ретранслятора НГСО-ГСО, яка представляється у вигляді дволінійного елемента (англійське скорочення TLE), ГСО супутник-ретранслятор визначає номер променя, до зони обслуговування якого потрапить супутник-ретранслятор НГСО-ГСО, і починає процедуру встановлення і підтримки лінії зв'язку між супутниками НГСО-ГСО. До особливостей процедури встановлення лінії відноситься врахування великого доплерівського зсуву частоти, який для діапазону частот 22-24 ГГц у границі зони радіобачення становить 585 МГц.

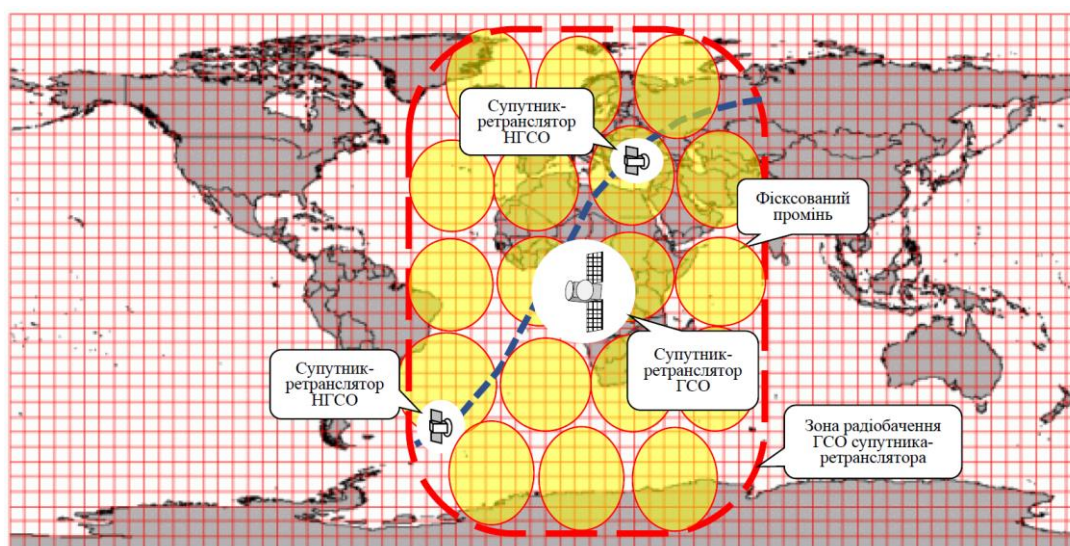


Рис.2.18 Організація лінії зв'язку між супутниками НГСО-ГСО за допомогою фіксованих променів

По мірі руху супутника-ретранслятора НГСО-ГСО в межах зони радіобачення ГСО супутника-ретранслятора, він переходить із зони обслуговування одного надвузького променя до зони обслуговування іншого. ГСО супутник-ретранслятор підключає інший надвузький промінь, а бортове обладнання цифрового корисного навантаження виконує функцію м'якого хендовера, тобто м'якої передачі управління від одного до іншого надвузьких променів.



На рис. 2.19 показана структурна схема корисного навантаження ГСО супутника-ретранслятора супутникової інфраструктури Інтернету речей. Основу корисного навантаження складає модуль цифрового корисного навантаження, який виконує функції підключення обраного надвузького променя до лінійки цифрових демодуляторів та декодерів для прийому інформації, формування групового цифрового потоку для передачі до супутників-ретрансляторів НГСО-ГСО окремо для кожного надвузького променя, а також маршрутизації інформації. До завдань модуля цифрового корисного навантаження також входять функції обробки та передачі інформації по лініях зв'язку між супутниками на ГСО, тобто до та від ГСО супутника-хмарного сховища даних.

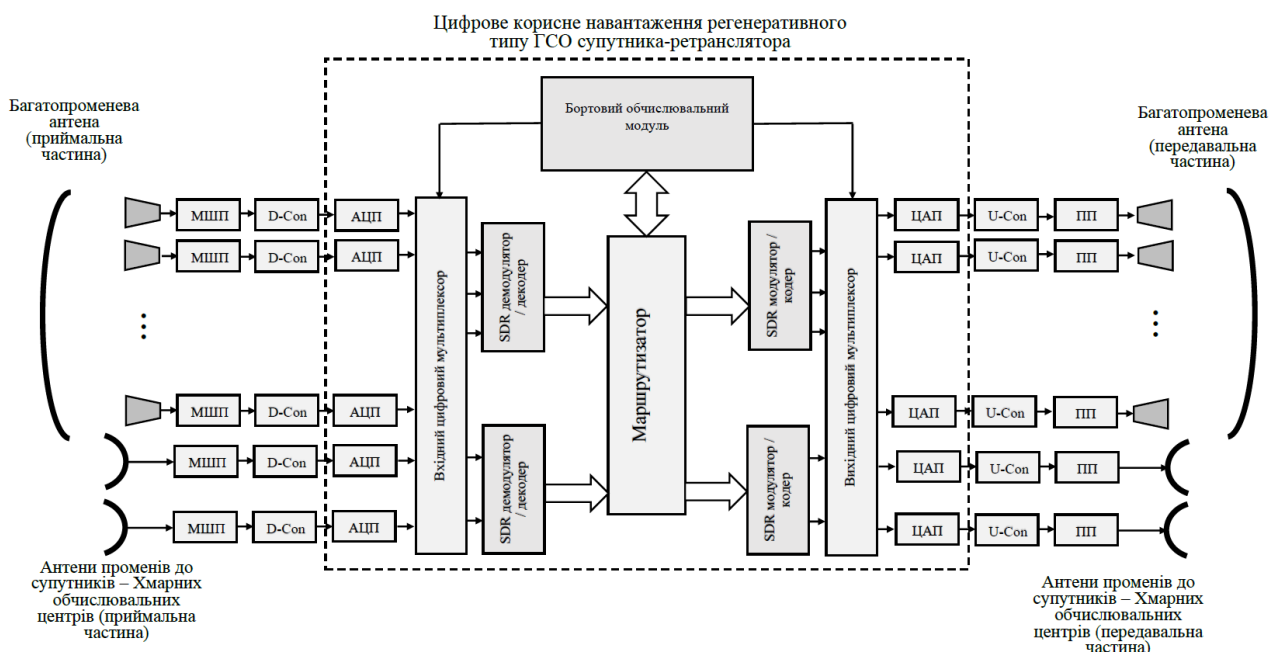


Рис.2.19 Корисне навантаження ГСО супутника-ретранслятора з фіксованими променями

Бортний обчислювальний модуль зі складу цифрового корисного навантаження виконує функції управління маршрутизацією інформаційних потоків, встановленням видів модуляції та швидкості завадостійкого кодування, функцій кібер-захисту ГСО сегменту. Крім того, бортний обчислювальний модуль здійснює обчислення руху супутників-ретрансляторів НГСО-ГСО на основі балістичної інформації TLE для підключення фіксованих променів та оцінки очікуваного (прогнозованого) доплерівського зсуву частоти.

Високочастотна частина корисного навантаження включає лінійки каналів/транспондерів, до складу яких входять приймальний тракт та передавальний тракт, комбіновану параболічну офсетну антену діаметром 3,5 м із системою приймально-передавальних опромінювачів рупорного типу, що формують надвузькі промені. Для підтримки лінії зв'язку між супутниками до ГСО супутників – хмарних центрів даних до складу високочастотного обладнання ГСО супутника-ретранслятора включене приймально-передавальне обладнання із комплектом спрямованих антен.

## **ВИСНОВКИ**

Багаторівнева ГСО-НГСО супутникова система Інтернету речей на базі вузькосмугових протоколів представляє собою трирівневу мережу, що складається з наземних засобів зв'язку і супутників на геостаціонарній та низькій навколоземній орбіті. Супутникова складова включає угруповання супутників на низькій навколоземній та на геостаціонарній орбітах, та лінії зв'язку між ними.

Низькоорбітальна складова супутникової інфраструктури Інтернету речей призначена для забезпечення взаємодії із пристроями користувачів Інтернету речей безпосередньо, або із використанням універсальних VSAT-терміналів, та реалізації туманних обчислень. Низькоорбітальна складова передбачає використання низької навколоземної орбіти і відноситься до класу супутникових систем, що відмінні від геостаціонарних супутникових систем, тобто НГСО супутникові системи.

Наземна складова сформована пристроями користувачів – пристрої Інтернету речей, засоби операторів систем Інтернету речей, що забезпечують управління послугами, доступом пристроїв до системи, тощо.

Низькоорбітальна складова супутникової інфраструктури призначена для забезпечення безпосередньої взаємодії із пристроями Інтернету речей: давачами та актюаторами. Низькоорбітальна складова побудована на базі централізованої архітектури розподіленого супутника. Розподілений супутник представляє собою мікроугруповання космічних апаратів класу мікросупутник та кубсат. До складу

кожного розподіленого супутника входять кореневий супутник та прикінцеві супутники.

Низькоорбітальна складова надає послуги із використанням вузькосмугових протоколів і стандартів: LoRaWAN та NB-IoT (3GPP). Для реалізації протоколів до складу кожного розподіленого супутника включені по супутнику-ретранслятору LoRaWAN із широкою зоною обслуговування та чотири-вісім супутників-ретрансляторів NB-IoT із вузькою зоною обслуговування.

Взаємодія між низькоорбітальним та геостаціонарним сегментами супутникової інфраструктури забезпечується за допомогою ліній зв'язку між супутниками НГСО-ГСО. Для цього до складу окремої групи розподілених супутників додатково введені прикінцеві супутники-ретранслятори НГСО-ГСО. У складі геостаціонарної складової підтримання взаємодії між НГСО та ГСО сегментами супутникової інфраструктури забезпечує ГСО супутник-ретранслятор.

Реалізація супутникової ГСО-НГСО системи, де одна складова доповнює іншу, забезпечує зручну ієрархічну супутникову систему, яка є економічно вигідною в експлуатації.

## РОЗДІЛ 3.

### СУПУТНИКОВА АРХІТЕКТУРА ОБЧИСЛЮВАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ІЗ ВУЗЬКОСМУГОВИМИ ПРОТОКОЛАМИ

#### 3.1. Використання концепції хмарних, туманних та граничних обчислень в системах Інтернету речей.

Хмарні обчислення або скорочено хмара — модель забезпечення повсюдного та зручного доступу на вимогу через мережу до спільного пулу обчислювальних ресурсів і центрів зберігання даних, що підлягають налаштуванню (наприклад, до комунікаційних мереж, серверів, засобів збереження даних, прикладних програм та сервісів), і які можуть бути оперативно надані та звільнені з мінімальними управлінськими затратами та зверненнями до провайдера.

При використанні хмарних обчислень обчислювальна потужність та ємність сховищ даних великих дата-центрів надаються користувачам як Інтернет-сервіс із застосуванням програмного забезпечення та технології гіпервізорів для відображення обчислювальних потужностей і баз даних. Користувач має доступ до власних даних, але не повинен піклуватися про інфраструктуру, операційну систему і програмне забезпечення, з яким він працює. «Хмарою» метафорично називають Інтернет, який приховує всі технічні деталі. Згідно з документом IEEE, опублікованим у 2008 році, «Хмарні обчислення — це парадигма, в рамках якої інформація постійно зберігається на серверах у мережі інтернет і тимчасово кешується на клієнтській стороні, наприклад на персональних комп'ютерах, ігрових приставках, ноутбуках, смартфонах тощо» [16].

Хмарні обчислення та Інтернет речей стали двома дуже тісно пов'язаними Інтернет-технологіями майбутнього, причому одна забезпечує іншу платформою для успіху.

Інтернет-хмарні послуги розглядають IoT (Інтернет речей), як набір інформаційно-телекомунікаційних технологій, які не мають чіткого єдиного визначення. Простим визначенням Інтернету речей може бути набір технологій, які

можна розглядати як використання підключених до мережі пристроїв, які використовуються у фізичному середовищі для інновацій; їх можна використовувати, щоб увімкнути новий сценарій або додати покращення до попередніх.

### *Хмарні обчислення*

Хмарне обчислення є класичним принципом зовнішнього сервера, підключеного до віддалених консолей (рис. 3.1). Перевагою хмарних обчислень є використання необмеженої обчислювальної потужності майже необмеженої кількості драйверів. Програми, обробку, рендеринг і зберігання можна підтримувати за межами сайту та миттєво надавати будь-кому, хто має мобільне чи дротове підключення до Інтернету.

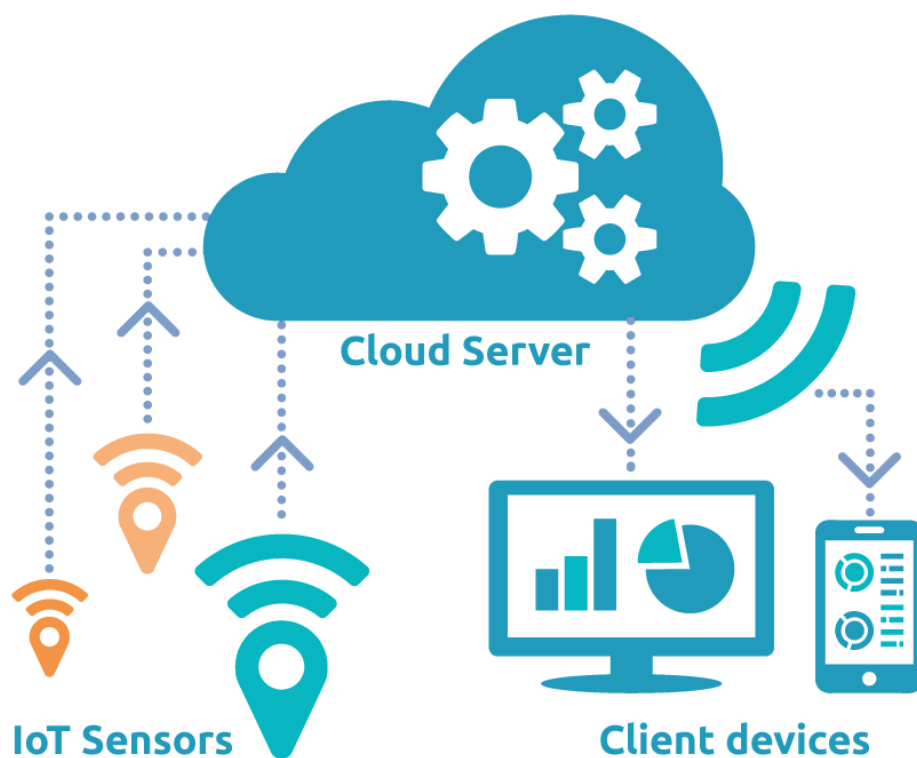


Рис. 3.1. Використання хмарних обчислень в системах Інтернету речей

Інтернет речей і хмарні комп'ютери створюють симбіотичні ділові відносини. Хмарні обчислення можуть мати SaaS, PaaS або IaaS як продукт, але за допомогою IoT вони здатні розробити не тільки підключений домашній пристрій, який можна контролювати, але й створює продукт, який миттєво масштабується на будь-якому

на земному ринку з високою ефективністю, швидкістю і швидкістю. Ви створюєте пристрій, а хмара робить його актуальним.

Хмарні обчислення надають абстрактний інтерфейс, який агрегує ресурси для ефективного використання ресурсів і дозволяє користувачам масштабуватися для вирішення більших наукових проблем. Це дає змогу налаштовувати системне програмне забезпечення відповідно до вимог індивідуальної програми.

Великі дані мають три виміри: обсяг, різноманітність і швидкість. Обсяг відноситься до великих транзакцій, різноманітність стосується типів даних (табличні дані, документи, відео, зображення, електронні листи, дані про біржовий тикер), що походять із соціальних мереж і мобільних пристроїв, а швидкість стосується структурування даних і надання їм доступу та доставка. Проблеми, пов'язані з великими даними, полягають у зборі, пошуку, спільному використанні, візуалізації, зберіганні даних за допомогою існуючих технологій баз даних, а також обробці та аналізі даних. Аналіз великих даних допомагає приймати рішення в різних областях, таких як наука, астрономія, дослідження навколишнього середовища, комерційна діяльність, економіка, медицина, соціальні мережі тощо.

Хмара може бути найбільш перспективним і економічно ефективним рішенням для підключення, керування та відстеження IoT. Хмарні моделі, придатні для IoT: - IaaS для бізнес-моделей датчиків і приводів і моделей доступу до ресурсів. - PaaS надає доступ до даних IoT і служб контролю. - SaaS, для домену програми моніторингу послуг.

Хоча Інтернет речей був досягнутий на примітивному рівні за допомогою RFID; це була б надійна платформа, як-от хмара, яка могла б слугувати ефективним хребтом для створення мережі датчиків і виконавчих механізмів, які можна з користю використовувати для покращення продуктивності повсякденних гаджетів/діяльності.

Існуючі супутникові телекомунікаційні системи здатні забезпечувати передачі трафіку систем Інтернету речей, що побудовані на базі архітектури хмарних обчислень. На рис. 3.2 представлена модель системи Інтернету речей, що

побудована на базі архітектури хмарних обчислень та яка використовує супутникову телекомунікаційну систему для передачі інформації між нижнім та верхнім ієрархічними рівнями. На нижньому рівні ієрархічної структури системи Інтернету речей знаходяться пристрої Інтернету речей, або розумні речі. До цієї групи пристроїв відносяться сенсори, тобто пристрої, які перетворюють фізичні процеси в електричні сигнали та формують на базі цих сигналів пакети інформації Інтернету речей, а також пристрої, що реалізують фізичний вплив на згідно отриманих команд – актюатори. На верхньому ієрархічному рівні системи знаходиться хмарний центр обробки та збереження даних.

Сегмент супутникового зв'язку утворює канал передачі даних від пристроїв Інтернету речей, сенсорів, до хмарного центру обробки та збереження даних, і в зворотному напрямку, до пристроїв Інтернету речей, до актюатора.

Супутниковий канал передачі даних формується із застосуванням таких елементів:

- VSAT-термінал, що знаходиться в безпосередньо в місці розташування пристроїв Інтернету речей – сенсорів та актюаторів, і забезпечує підключення цих пристроїв із використанням радіотехнологій малого радіусу дії, як-то: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee. Для супутникової телекомунікаційної системи інтерфейс VSAT-терміналу до місцевої локальної мережі або до наземної мережі зв'язку є межею системи;
- телекомунікаційний супутник, що забезпечує ретрансляцію пакетів інформації пристроїв Інтернету речей. Для систем Інтернету речей, побудованих на базі хмарної архітектури, тип корисного навантаження телекомунікаційного супутника не має принципового значення, будь то ретранслятор «прозорого» типу, або ретранслятор «з обробкою на борту»;
- центральна станція VSAT-мережі, або станція спряження. Зазвичай цей об'єкт підключений до магістральної мережі зв'язку та магістральної мережі Інтернет, через яку здійснюється по передача інформації до хмарного центру обробки даних.

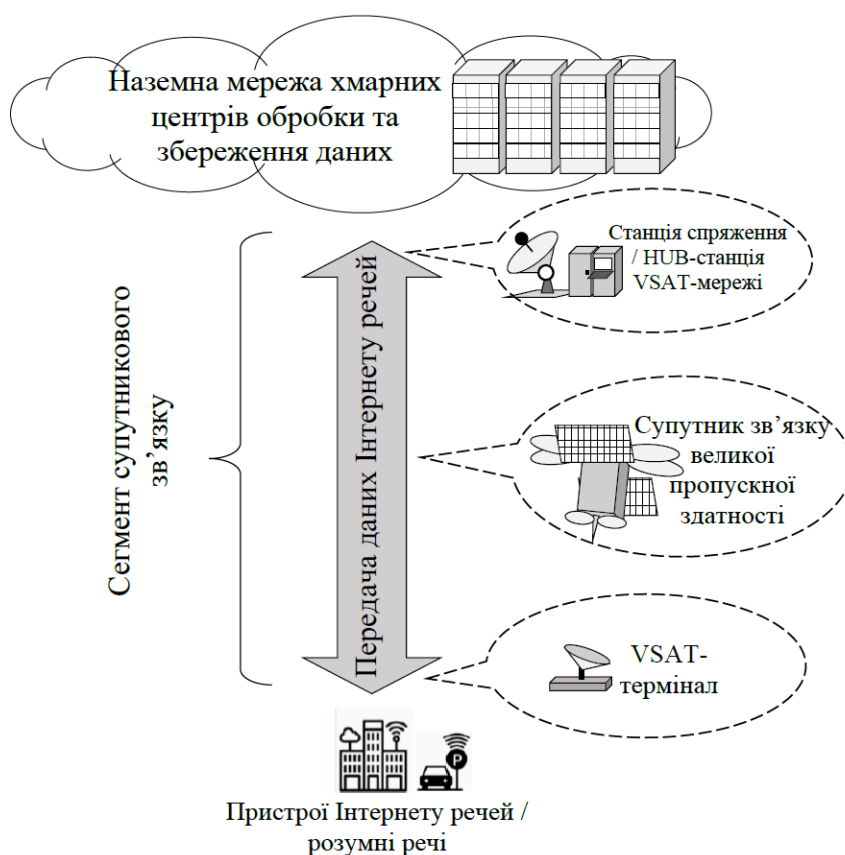


Рис. 3.2. Використання супутникових систем зв'язку в системах Інтернету речей з архітектурою хмарних обчислень

Як можна переконатись із наведеної структури супутникові телекомунікаційні системи займають місце каналів передачі даних між пристроями Інтернету речей та центрами хмарних обчислень і збереження даних.

В системах Інтернету речей, що побудовані за хмарною архітектурою, супутникові телекомунікаційні системи повинні забезпечувати двосторонню передачу усього обсягу трафіку інформації Інтернету речей, що значно збільшує завантаження супутникових каналів та супутникової системи в цілому [17].

#### *Переваги хмарних обчислень для Інтернету речей*

Оскільки під'єднані пристрої обмежують ємність та обчислювальну потужність, інтеграція із хмарними обчисленнями допомагає забезпечити:

- Покращення роботи (швидкий зв'язок між давачами інтернету речей та системами обробки даних);



- Ємність (добре масштабоване та необмежене місце для зберігання, що здатне об'єднати, з'єднати та розподілити великий обсяг даних);
- Можлива обробка (віддалені центри обробки даних забезпечують необмежені віртуальні можливості обробки по запиту);
- Зменшення витрат (ліцензійні збори нижче, ніж вартість обладнання на початковому рівні, та його безперервне обслуговування).

#### *Недоліки використання хмарних обчислень для Інтернету речей*

В технології хмари існують певні недоліки щодо використання для Інтернету речей.

- Великий час очікування (застосунки Інтернету речей все більше вимагають, щоб час очікування бум якомога меншим, але хмара не здатна гарантувати це зважаючи на відстань між клієнтом та центром обробки даних);
- Час простою (технічні проблеми та збої в мережах можуть виникати з різних причин в будь-якій системі, що використовує Інтернет речей, і дані клієнта можуть потерпати при відключенні електрики; щоб запобігти проблемам, багато компаній використовують декілька каналів зв'язку з автоматизованою відмовастійкістю;
- Безпека та особиста інформація (ваша особиста інформація, яка передана через глобально зв'язані канали разом із тисячею гігабайтів інформації інших користувачів; така система стає вразливою для втрати даних або кібератак; проблему можна частково вирішити за допомогою гібридної хмари, або створення особистого хмарного сховища).

#### *Туманні та граничні обчислення*

Туманні обчислення — це модель, яка забезпечує обчислення та зберігання даних між кінцевими пристроями та традиційними центрами хмарних обчислень. Туманні обчислення — концепція, за якою частина даних оброблюється в локальних мережах, а не виключно в дата-центрі. Будь-який пристрій, що має обчислювальні здібності, сховище та мережу підключення, може бути вузлом

туману. Приклади пристроїв включають промислові контролери, комутатори, маршрутизатори, вбудовані сервери та камери відеоспостереження [18].

Туманні обчислення визначаються як децентралізована інфраструктура, яка розміщує компоненти зберігання та обробки на межі хмари, де існують джерела даних, такі як користувачі програм і датчики. Туманні обчислення передбачають використання пристроїв із меншими можливостями обробки для розподілу частини навантаження хмари. Метою туманних обчислень є використання хмари лише для довгострокової та ресурсомісткої аналітики. Ці пристрої на «краї» хмари, тобто там, де система організації взаємодіє із зовнішнім світом, піклуються про короткочасну та важливу за часом аналітику, таку як сповіщення про несправності, стан тривоги тощо.

Оскільки хмарні обчислення непридатні для багатьох додатків Інтернету речей (IoT), часто використовується туманне обчислення. Його розподілений підхід задовольняє потреби IoT та промислового IoT (IIoT), а також величезну кількість даних, які генерують інтелектуальні датчики та пристрої IoT, надсилання яких у хмару для обробки та аналізу було б дорогим і трудомістким. Обчислення Fog зменшує необхідну пропускну здатність і зменшує обмін даними між датчиками та хмарою, що може негативно вплинути на продуктивність IoT.

Туманні обчислення є прошароком між периферійними пристроями та хмарою. Цей рівень покладається на групу невеликих обчислювальних серверів, розташованих поблизу периферійних пристроїв і не обов'язково на сам пристрій. Сервери з'єднані один з одним і централізованими хмарними серверами, що забезпечує інтелектуальний потік інформації. Ці невеликі пристрої працюють разом, щоб виконувати попередню обробку даних, короткострокове зберігання та моніторинг у реальному часі на основі правил. Архітектура туманного обчислення зменшує кількість даних, що транспортуються через систему, і покращує загальну ефективність [19].

Методом підвищення ефективності систем IoT є перенесення обчислювальних потужностей ближче до границь мережі і реалізація концепції

«туманних обчислень» (Fog Computing, FC). У цьому випадку, на відміну від хмарної архітектури, обробка інформації IoT-пристроїв здійснюється на нижніх і проміжних рівнях ієрархічної структури інформаційної системи (рис. 3.3). Це дозволяє звільнити систему зв'язку від передачі всього обсягу трафіка від IoT-пристроїв, що перебувають на нижньому ієрархічному рівні системи, до центра хмарних обчислень, який перебуває на верхньому ієрархічному рівні, і у зворотному напрямку. При реалізації концепції FC на вищі ієрархічні рівні передаються лише результати обробки інформації, що скорочує обсяг переданої інформації і підвищує «коштовність» цієї інформації [20].

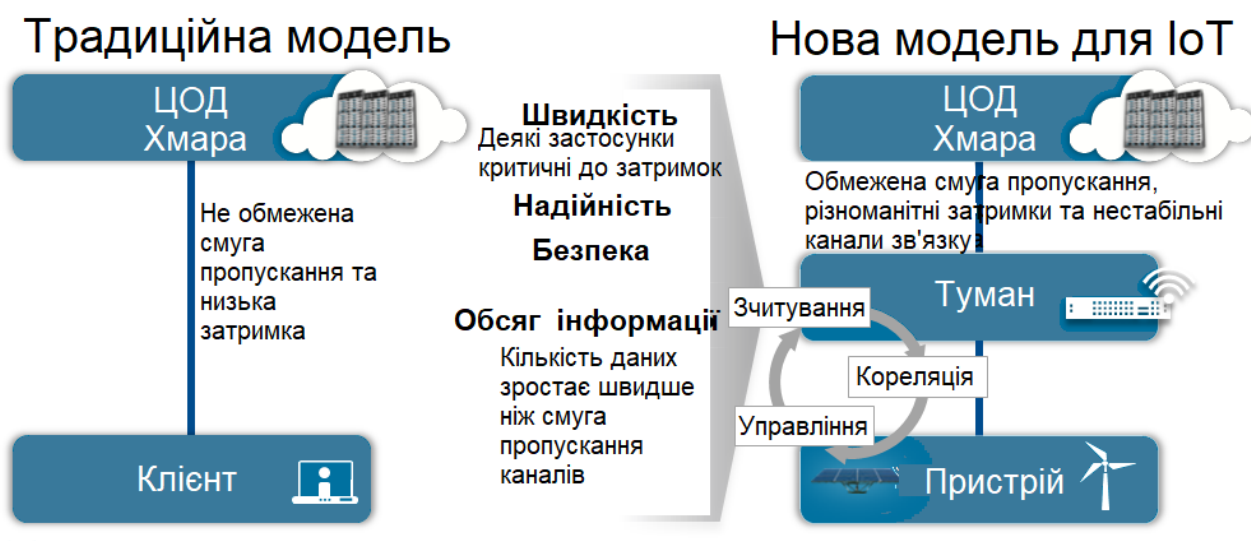


Рис. 3.3 Порівняння моделі хмарних та туманних обчислень для систем IoT

Інформаційна система, яка призначена для надання послуг IoT і підтримує концепцію FC, повинна мати власні обчислювальні потужності, розташовані якомога ближче до границі мережі, і забезпечувати доступ до цих потужностей системам і споживачам послуг IoT.

Доповнення орбітального сегменту супутникових телекомунікаційних систем обчислювальною потужністю дозволить реалізувати туманні обчислення для обробки інформації Інтернету речей від пристроїв, що знаходяться в межах зони обслуговування супутника-ретранслятора. В результаті підвищується оперативність обробки інформації, скорочується час затримки. Трафік інформації Інтернету речей буде завантажувати тільки ланку супутникового зв'язку «термінал користувача – супутник-ретранслятор». В напрямку «супутник-ретранслятор –

станція спряження (англ. GateWay) / центральна станція VSAT-мережі (англ. VSAT-network HUB)» буде передаватися тільки результат обробки та узагальнена інформація Інтернету речей, що суттєво скоротить обсяг інформації, що передається, та збільшить її коштовність.

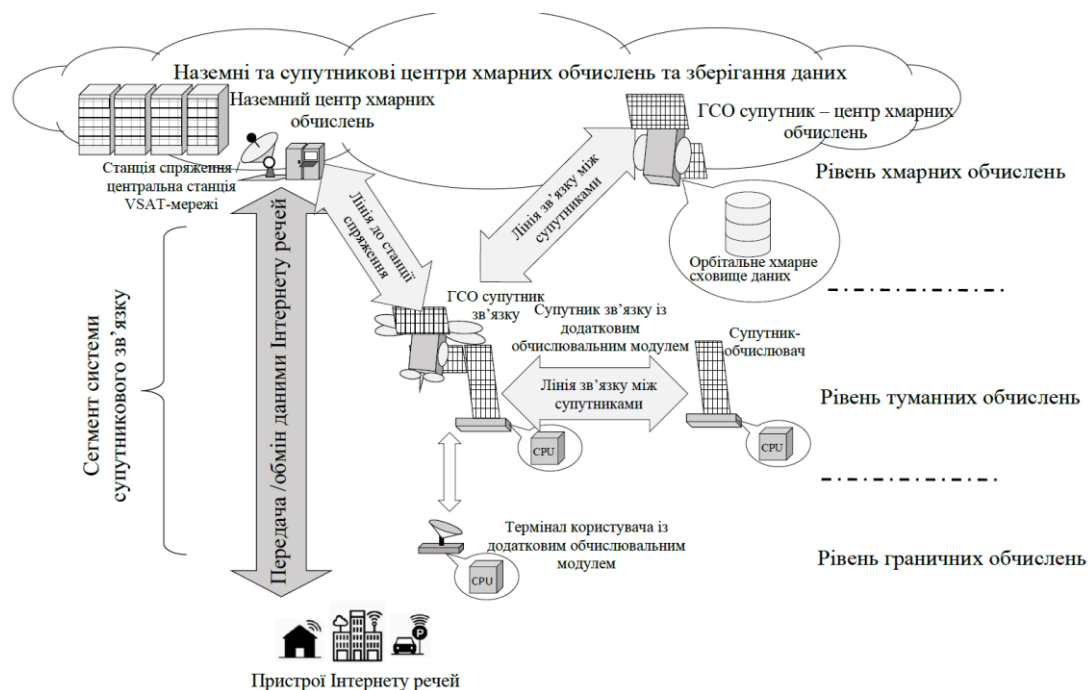


Рис. 3.4 Впровадження концепції туманних обчислень в супутникову систему Інтернету речей

Граничні обчислення – це модель розподілених обчислень, згідно якої обчислення здійснюються в поруч із місцем, де збираються та аналізуються дані, на відміну від обробки інформації на централізованому сервері або в хмарі. У більшості випадків межею супутникової телекомунікаційної системи / мережі є інтерфейс терміналу користувача, або VSAT-термінал, що знаходяться поруч із місцем розташування пристроїв Інтернету речей – сенсорів і актуаторів. Забезпечити впровадження граничних обчислень в супутникові телекомунікаційні системи можливо додавши до обладнання модему VSAT-терміналу окремий обчислювальний модуль або одноплатний комп'ютер. Конструктивно модем терміналу користувача, або VSAT-терміналу - це плата, на якій встановлені мікросхеми та навісні елементи модему. Плата модему встановлена в корпус із вбудованим, або виносним блоком живлення. Методом модернізації така конструкція може бути доповнена одноплатним комп'ютером, який забезпечує

реалізацію граничних обчислень. Альтернативним варіантом є включення одноплатного комп'ютера до складу локальної мережі типу Ethernet, до якої під'єднаний Wi-Fi роутер, інше обладнання технології радіодоступу пристроїв Інтернету речей малого радіусу дії. Додавання обчислювальної потужності буде задовольняти обчислювальні потреби пристроїв Інтернету речей, що заходяться в межах зони дії мережі радіодоступу малого радіусу дії. В цьому разі по каналу супутникового зв'язку буде передаватися тільки інформація про результати обробки локальної інформації Інтернету речей [21].

Сучасні технології організації та функціонування супутникових телекомунікацій та технології проектування і виробництва космічних апаратів різноманітного призначення суттєво розширюють можливості супутникових телекомунікаційних систем щодо реалізації хмарних обчислень, які розташовані на верхньому ієрархічному рівні архітектури системи Інтернету речей. Поруч із традиційним рішенням щодо забезпечення доставки інформації Інтернету речей до хмарного центру обробки даних, яке передбачає використання станції спряження, або центральної станції VSAT-мережі, яка під'єднана до магістральної мережі Інтернет, можливе альтернативне рішення – розробка та запуск спеціалізованих космічних апаратів – космічних хмарних центрів обробки та зберігання даних (англ. Satellite Cloud Data Center). Сьогодні в стадії розробки вже знаходиться проект SpaceBelt. Але цей проект передбачає використання супутників – банків даних (або хмарних сховищ даних), що розташовані на низькій навіколоземній орбіті. Доступ до супутників – сховищ даних передбачається здійснювати через супутник-ретранслятор на геостаціонарній орбіті [21].

### *Переваги туманних обчислень*

Підхід із туманними обчисленнями має багато переваг для Інтернету речей, великих даних і аналітики в реальному масштабі часу. Ось основні переваги туманних обчислень над хмарними:

- Малий час відгуку (туман географічно ближче до користувачів і здатен забезпечити миттєвий відгук);

- Не існує проблем з пропускнуою здатністю (частина інформації агрегується в різних точках, а не відправляється в один центр по одному каналу);
- Неможливість втрати з'єднання (з-за множини з'єднувальних каналів);
- Висока безпека (дані опрацьовуються великою кількістю вузлів в складній розподіленій системі);
- Покращений інтерфейс користувачів (миттєвий відгук та простоїв радують користувачів);
- Енергетична ефективність (периферійні візли використовують в роботі високоефективні протоколи, як-то Bluetooth, Zigbee і Z-хвиля).

#### *Недоліки туманних обчислень*

Технологія не має явних недоліків, але можливо виділити найбільші мінуси:

- Система туманних обчислень більш складна (туман – додатковий шар в системі обробки і зберігання даних);
- Додаткові витрати (компанії повинні купувати периферійні пристрої - роутери, маршрутизатори, шлюзи);
- Обмежений масштаб (на відміну від хмари).

#### *Туманні і хмарні обчислення: Ключові відмінності*

Концепції туманних і хмарних обчислень доволі схожі. Але між ними існує різниця по деяким параметрам. Розглянемо точкове порівняння туманних та хмарних обчислень:

1. Хмарна архітектура централізована і складається з великих центрів обробки даних, які можуть бути розташовані по усьому світу, за тисячі кілометрів від клієнтів. Архітектура туману розподілена і складається з мільйонів невеликих вузлів, розташованих якомога ближче до пристроїв клієнтів.
2. Туман існує як посередник між центрами обробки даних і апаратними засобами, і, відповідно, він ближче до кінцевих користувачів. Якщо не існує шар туману, хмара напряду зв'язується з пристроями, що займає багато часу.

3. В хмарних обчисленнях обробка даних здійснюється у віддалених центрах обробки даних. Обробка і зберігання туманних обчислень здійснюється на граничному сегменті мережі, наближеному до джерела інформації, що має визначальне значення для контролю в режимі реального часу.
4. Хмара є більш функціональною, ніж туман відносно обчислювальних ресурсів і можливостей збереження.
5. Хмара складається з декількох великих серверних вузлів. Туман включає в себе мільйони дрібних вузлів.
6. В туманних обчисленнях здійснюється короткотерміновий аналіз на граничному сегменті мережі з-за миттєвого відгуку, в той час, як в хмарних обчисленнях буде довгостроковий глибокий аналіз з-за більш повільного відгуку.
7. При туманних обчисленнях час затримки – малий, при хмарних обчисленнях – великий.
8. Хмарна система може руйнуватись в разі збою мережі Інтернет. Туманні обчислення використовують різноманітні протоколи і стандарти, тому ризик збою набагато менший.
9. Туман є більш безпечною системою, ніж хмара з-за його розподіленої архітектури.

Таким чином, завдання розробки архітектури багаторівневої системи можна визначити так: розробити архітектуру багаторівневої низькоорбітальної / геостаціонарної супутникової системи зв'язку та широкосмугового доступу, адаптованої до вимог послуг IoT, та розмістити у складі орбітального сегменту системи власні обчислювальні потужності із врахуванням особливостей їхнього функціонування, використання найбільш простих архітектурних рішень і врахування конструктивних особливостей і обмежень платформ космічних апаратів форм-фактора куб-сат чи наносупутник і забезпечити взаємодію низькоорбітального сегменту обчислювальної мережі із геостаціонарним сегментом системи, який реалізує функції хмарного сховища даних.

### 3.2 Реалізація граничних та туманних обчислень із використанням НГСО орбітальної обчислювальної мережі.

На рис. 3.5 показана архітектура супутникової системи Інтернету речей, що адаптована до впровадження концепції туманних та граничних обчислень. Зокрема, рівень туманних обчислень виноситься на рівень космічного апарату або супутника зв'язку.

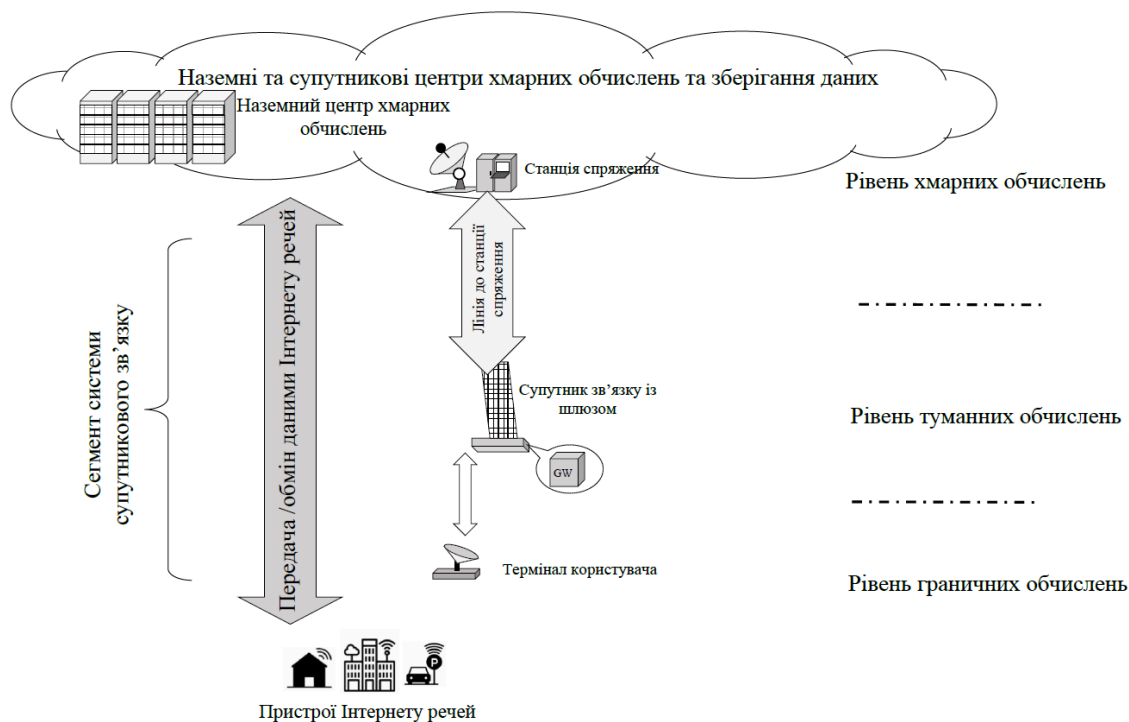


Рис. 3.5 Архітектура супутникової системи Інтернету речей, що адаптована до впровадження туманних та граничних обчислень

Для цього до складу корисного навантаження супутника включаються елементи, що забезпечують спрямування первинного трафіку Інтернету речей, який сформований сукупністю кінцевих пристроїв Інтернету речей, до обчислювальних потужностей, що включені до складу корисного навантаження супутника. Таке рішення дозволяє підвищити ефективність використання пропускну здатності лінії від супутника до станції спряження за рахунок передачі в цій лінії опрацьованої інформації, обсяг якої, і, відповідно, обсяг сформованого нею трафіку менший, а цінність опрацьованої інформації вища. Таким чином до центрів хмарних



обчислень передається менший обсяг інформації, цінність якої вища, ніж цінність первинної інформації.

Для реалізації туманних обчислень в супутниковій інфраструктурі Інтернету речей запропоновано підхід, що передбачає доповнення мікроугруповань розподілених супутників на низькій навколоземній орбіті окремими супутниками-обчислювачами. На рисунку 3.6 представлено склад розподіленого супутника централізованої архітектури.

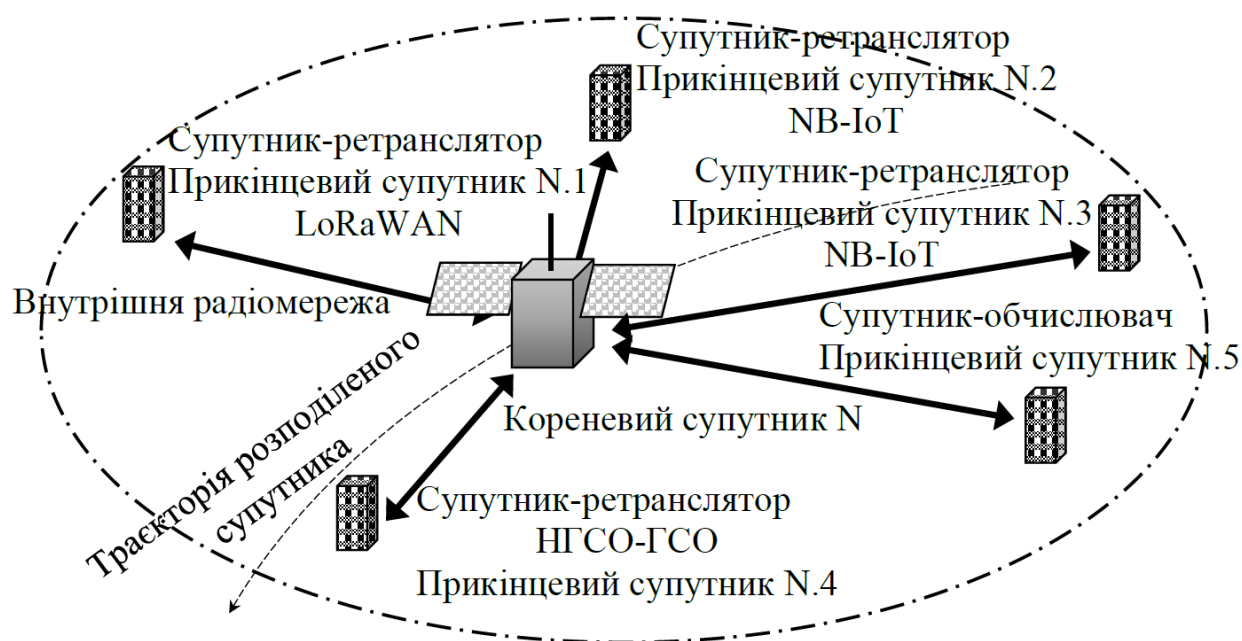


Рис.3.6 Структура розподіленого супутника із супутником-ретранслятором НГСО-ГСО та супутником-обчислювачем

До складу розподіленого супутника, який показаний на рис. 3.6, включено кореневий супутник, супутники-ретранслятори, які використовують протоколи LoRaWAN та NB-IoT, супутник-ретранслятор НГСО-ГСО. Окремо до складу розподіленого супутника включено супутник-обчислювач. Підхід, що побудований на основі архітектури розподіленого супутника, передбачає розробку окремого типу прикінцевих супутників – супутник-обчислювач. Такий супутник, як й інші прикінцеві супутники, побудований у формфакторі кубсат на базі багатофункціональної платформи куб-сата. Корисним навантаженням такого супутника є обчислювальний модуль, що має власне обчислювальне ядро та власний бортовий масив пам'яті.

Такий підхід має певні переваги, які надає архітектура розподіленого супутника, в порівнянні із традиційними супутниками. Зокрема, модернізація обладнання супутників можлива тільки на етапі їх виготовлення, і як результат, реалізація туманних обчислень в орбітальному сегменті супутникових систем IoT займе більше часу. Цей час охоплює розробку проекту модернізованого супутника, його наземні випробування, очікування завершення строку експлуатації вже запускених супутників та черги на послугу запуску.

Включення до складу розподілених супутників, що утворюють НГСО орбітальне угруповання, окремих супутників-обчислювачів дозволяє скоротити тракт передачі інформації Інтернету речей до засобів, що здійснюють її обробку, узагальнення і формування керуючих команд. На рис.3.7 показана структура тракту передачі інформації Інтернету речей між пристроєм користувача та супутником-обчислювачем. Наведена структура використовується для протоколів LoRaWAN та NB-IoT із врахуванням особливостей їх архітектури, що розглянута в розділі 2.2.

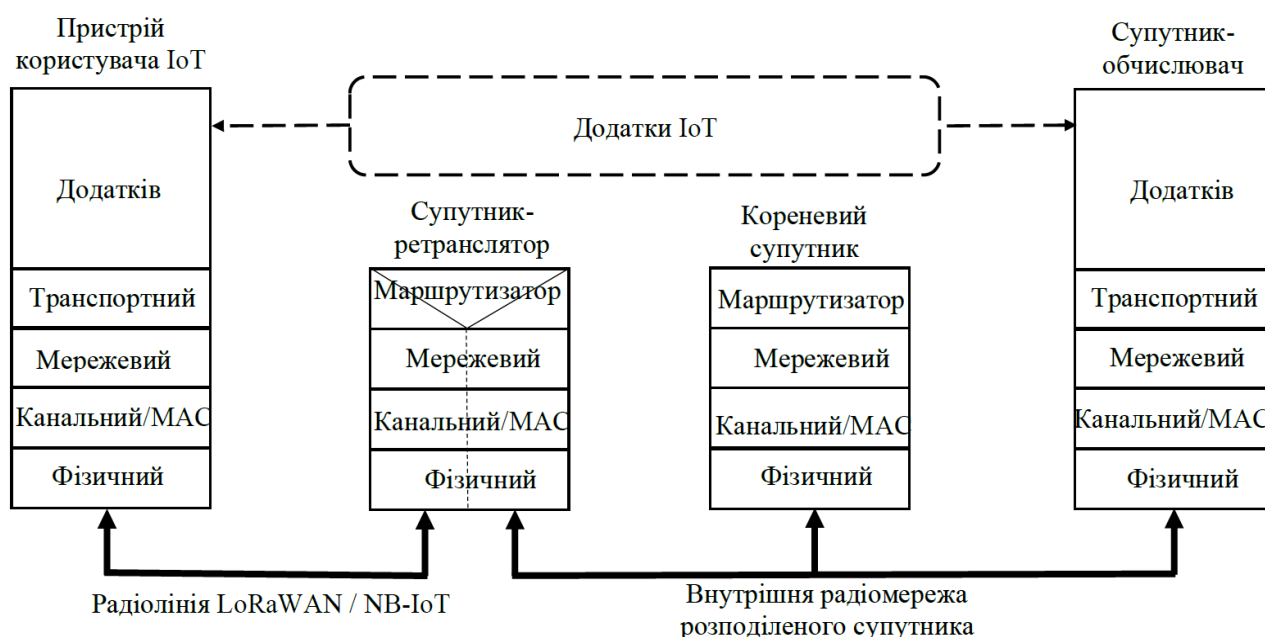


Рис. 3.7 Структура тракту передачі інформації IoT між пристроєм користувача та супутником-обчислювачем

Рівень додатків Інтернету речей застосовується до пристроїв користувача та до обчислювального модуля супутника-обчислювача. Саме ці елементи тракту передачі реалізують функціональне призначення системи щодо послуг Інтернету

речей. Транспортний, мережевий, каналний (доступу до середовища передачі MAC) та фізичний рівень присутні на усіх елементах тракту передачі. На ділянці пристрій користувача UE – супутник-ретранслятор використовуються протоколи LoRaWAN та NB-IoT, що визначає особливості реалізації мережевого, доступу до середовища MAC та фізичного рівнів. Як було показано в розділі 2.2, прикінцевий супутник-ретранслятор зі складу розподіленого супутника виконує функції шлюзу LoRaWAN або базової станції eNode. Зазначені елементи перетворюють інформацію Інтернету речей в транспортний потік і передають цей потік до маршрутизатора кореневого супутника по внутрішній радімережі. Маршрутизатор кореневого супутника із обчислювальним модулем, що входить до його складу, виконує функції серверу мережі в архітектурі LoRaWAN та центру мобільної комутації MSC в архітектурі NB-IoT. Інформація, що призначена для обробки, по внутрішній мережі розподіленого супутника передається до обчислювального модуля прикінцевого супутника-обчислювача, який виконує функції серверу додатків в архітектурі LoRaWAN та серверу застосувань в архітектурі NB-IoT.

Супутник-обчислювач забезпечує обробку отриманої інформації від пристроїв користувачів, що знаходяться в межах зони обслуговування супутників-ретрансляторів, узагальнення отриманої інформації для передачі на рівень хмарних обчислень та до замовника сервісу Інтернету речей і формування для команд управління для пристроїв Інтернету речей (в разі, якщо це передбачено функціональним призначенням системи і послуги Інтернету речей).

До особливостей НГСО орбітального угруповання супутникової інфраструктури Інтернету речей відноситься наявність ліній зв'язку між розподіленими супутниками. Сукупність ліній зв'язку між розподіленими супутниками утворюють орбітальну мережу передачі даних НГСО сегменту. На базі цієї мережі передачі даних побудована однорангова орбітальна розподілена обчислювальна мережа, що об'єднує обчислювальні модулі усіх супутників-обчислювачів зі складу розподілених супутників НГСО складової супутникової

інфраструктури. Структура однорангової орбітальної розподіленої обчислювальної мережі представлена на рис. 3.8.

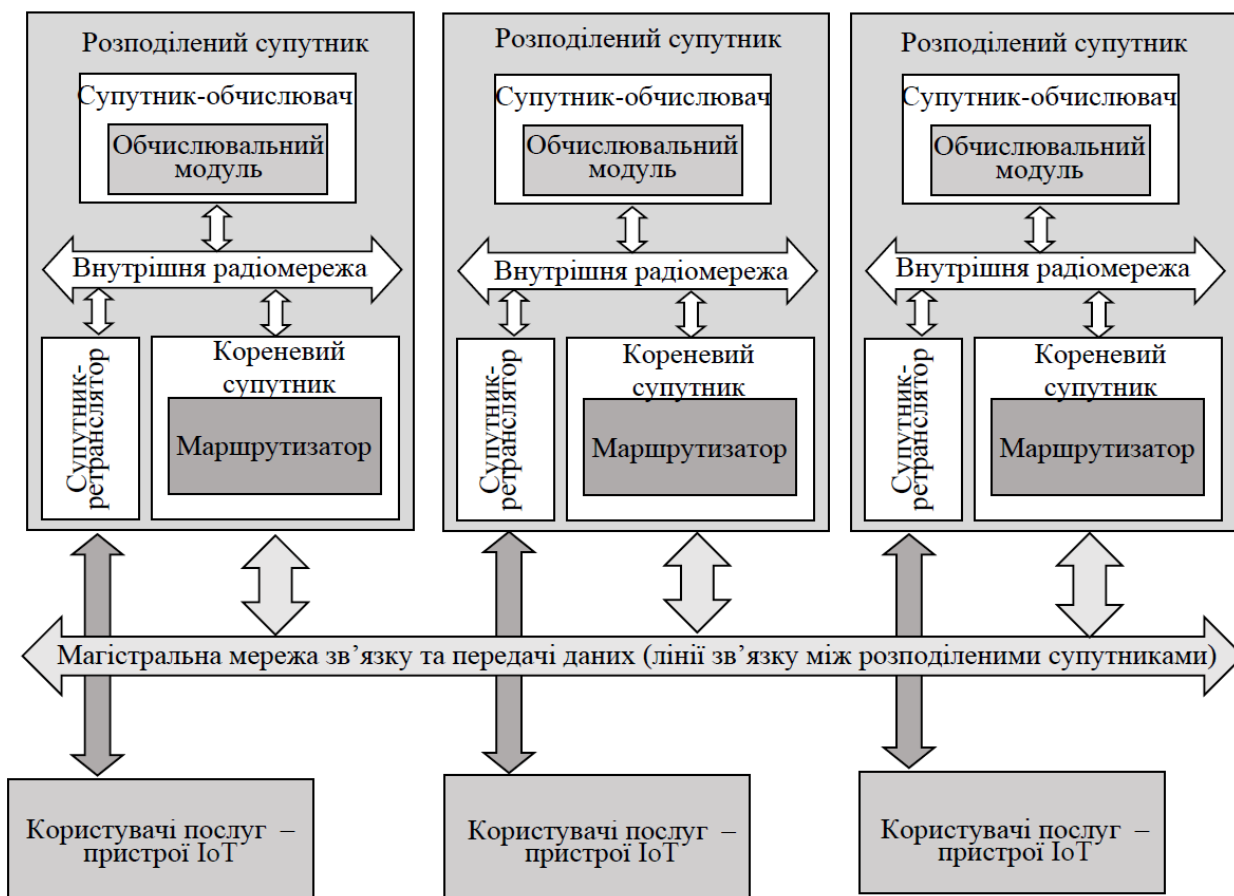


Рис.3.8 Структура однорангової розподіленої обчислювальної мережі

Однорангова орбітальна розподілена обчислювальна мережа є ефективним засобом підвищення ефективності функціонування усього НГСО сегменту. Перевагою такої мережі є здатність перерозподіляти обчислювальне навантаження, що виникає в певних, територіально обмежених районах розташування пристроїв користувачів.

#### *Модель обчислювального навантаження*

При розробці алгоритмів розподілу обчислювального навантаження важливе місце займає побудова моделі обчислювального навантаження. Питанню дослідження характеристик та побудові моделі трафіку та обчислювального навантаження систем інтернету речей присвячено багато робіт. Однак, більшість робіт орієнтована на дослідження характеристик трафіку, що формується

конкретними пристроями інтернету речей, або дослідженню агрегованого трафіку мобільного зв'язку та передачі даних щодо відносно невеликої території, наприклад, стільники мережі 4G [22].

До особливостей НГСО складової супутникової інфраструктури Інтернету речей належить глобальна зона обслуговування і, як наслідок, зміна в широких межах обчислювального навантаження, яке формується пристроями Інтернету речей в окремих районах світу.

Для опису моделі обчислювального навантаження такої системи добре підходить модель точкового процесу Пуассону. Зважаючи на те, що зона обслуговування одного розподіленого супутника сформована у вигляді сукупності парціальних променів, , можна вважати, що кількість пристроїв інтернету речей  $N$ , що знаходяться в даній зоні обслуговування і формують обчислювальне навантаження, є випадковою величиною, що описується виразом

$$P\{N = n\} = \frac{\Lambda^n}{n!} e^{-\Lambda} \quad (3.1)$$

тут  $\Lambda$  – параметр розподілу пристроїв Інтернету речей у цьому регіоні. Параметр розподілу кількості пристроїв інтернету речей у зоні обслуговування одного розподіленого супутника

$$\Lambda = S \cdot \rho_{IoT} \quad (3.2)$$

тут  $S$  – площа зони обслуговування одного розподіленого супутника ( $\text{км}^2$ ),  $\rho_{IoT}$  – середня кількість пристроїв інтернету речей на квадратний кілометр, або середня щільність пристроїв інтернету речей у зоні обслуговування одного розподіленого супутника.

Для цілей опису моделі та аналізу можна вважати, що параметр  $\rho_{IoT}$  пов'язаний із розподілом густини населення в районі надання послуги. Враховуючи динаміку розвитку та впровадження послуг інтернету речей у різних районах світу та розрив у економічному розвитку та рівні доходів населення, показник щільності населення можна вважати песимістичною оцінкою очікуваної щільності пристроїв інтернету речей для різних районів світу. На рис.3.9

представлена ситуаційна модель розподілу щільності населення для зон обслуговування розподілених супутників однієї орбітальної площини НГСО супутникового угруповання. Для цілей опису прийнято, що до складу однієї орбітальної площини входять 60 супутників. Кутове рознесення між сусідніми розподіленими супутниками прийнято  $6^\circ$ . Ця орбітальна площина проходить над територіями Атлантичного океану, вздовж берегів Північної Африки (Марокко), Західна Європа (Іспанія, Франція, Німеччина, Бельгія, Польща), Північні райони Росії (Архангельська обл., Комі), Західний Сибір, північно-західна частина Китаю, морська акваторія між Кореєю та Японією, Тихий океан, на південь від Вогняної Землі, південна Атлантика. Як очевидно з рис.3.9 показник щільності населення коливається не більше від 0 до 600 чол/км<sup>2</sup>. При цьому позиції 6-11 відповідають сегменту орбіти над Західною Європою, позиції 12-20 – ділянці орбіти над Росією, позиції 21-23 відносяться до Північно-східного Китаю, Південної Кореї та частково Японії. Позиції 31-34 відносяться до Нової Гвінеї та Соломонових островів. Позиція 49 відповідає близькому розташуванню траси орбіти від Вогняної Землі.



Рис. 3.9 Розподіл густини населення в зонах обслуговування розподілених супутників зі складу однієї орбітальної площини НГСО складової супутникової інфраструктури інтернету речей

Враховуючи, що в системі визначення якості обслуговування використовуються пріоритети, випадкова величина  $N$  може бути представлена наступним чином

$$N = \sum_{p=1}^P N_p \quad (3.3)$$

тут  $N_p$  – кількість пристроїв IoT, що належать до класу обслуговування за рівнем пріоритету  $p$ .  $P$  – кількість пріоритетів класів обслуговування у системі.

Інтенсивність запитів всіх пріоритетів пристроїв інтернету речей, що формуються в зоні обслуговування одного розподіленого супутника, визначається таким виразом

$$\lambda = \sum_{p=1}^P \lambda_p \quad (3.4)$$

тут  $\lambda_p$  – інтенсивність запитів пріоритету  $p$ . З урахуванням розподілу пристроїв IoT, що знаходяться в зоні обслуговування одного розподіленого супутника, за класами або пріоритетами обслуговування, для визначення інтенсивності вимог  $\lambda_p$  може бути застосована наступна модель

$$\lambda_p = \frac{N_p}{\bar{T}_p} \quad (3.5)$$

Тут  $\bar{T}_p$  – середній період (математичне очікування) генерування запитів одним пристроєм IoT, що належить до класу обслуговування з пріоритетом  $p$ .

Обчислювальна навантаження, сформована сукупністю всіх пристроїв інтернету речей, що знаходяться в аналізованій зоні обслуговування одного розподіленого супутника, описується термінами теорії телетрафіку так.

При аналізі тимчасових співвідношень, що вносяться в обробку запитів пристроїв інтернету речей особливостями архітектури супутникової системи, необхідно враховувати, як мінімум, два тимчасові показники:

- для пристроїв та послуг, чутливих до затримки (пристроїв та послуги DSS) гранично допустимий час обробки запиту пристрою інтернету речей;
- для пристроїв та послуг, не чутливих до затримки, (пристрою та послуги DTS) – час знаходження пристрою Інтернету речей у зоні обслуговування одного розподіленого супутника.

Всі пристрої Інтернету речей, що формують обчислювальне навантаження, та послуги Інтернету речей діляться на пріоритети. Система реалізує політику

пріоритетного обслуговування з відносним пріоритетом, яка передбачає завершення обслуговування поточної вимоги при вступі на вхід системи вимоги з вищим пріоритетом. Критерієм визначення пріоритету пристрою та послуги інтернету речей є гранично допустимий час обробки запиту  $T_p$ .

$$T_p = \bar{x}_p + W_p + \bar{t}_{T_p} \quad (3.6)$$

тут  $\bar{x}_p$  – середній час обробки одного запиту (вимоги) з рівнем пріоритету  $p$ ,  $W_p$  – середній час очікування запиту (вимоги) з рівнем пріоритету  $p$  у системі,  $\bar{t}_{T_p}$  – середній час передачі посилки (пакета) запиту (вимоги) від влаштування інтернету речей до обчислювального модуля і назад [6].

Середній час обслуговування вимог (запитів) у системі становить

$$\bar{x} = \sum_{p=1}^P \frac{\lambda_p}{\lambda} \bar{x}_p \quad (3.7)$$

тут  $\bar{x}_p$  – середній час обслуговування в одному потоці обчислювального модуля супутника-обчислювача однієї вимоги (запиту) пристрою IoT, що відноситься до класу обслуговування з рівнем пріоритету  $p$ .

Загальна ефективність системи у складі одного розподіленого супутника щодо забезпечення туманних обчислень для обслуговування пристроїв інтернету речей, що знаходяться в його зоні обслуговування, визначається наступним виразом

$$\rho = \frac{\lambda \bar{x}}{m} = \sum_{p=1}^P \rho_p = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^P \lambda_p \bar{x}_p \quad (3.8)$$

тут  $\rho_p$  – парціальна ефективність системи одного розподіленого супутника під час обслуговування запитів (вимог) пристроїв пріоритету  $p$ ;  $m$  – кількість потоків у обчислювальному модулі супутника-обчислювача під час обробки запитів (вимог) пристроїв інтернету речей.

Важливою умовою, що визначає здатність одного розподіленого супутника забезпечити обслуговування запитів (вимог), що надходять від пристроїв Інтернету речей у зоні його обслуговування, є обмеження значення показника ефективності

$$\rho < 1$$



При невиконанні цієї нерівності розподілений супутник не здатний самостійно забезпечити обслуговування всіх запитів (вимог), що надходять від пристроїв інтернету речей у його зоні обслуговування, і виникає навантаження, проблему якого необхідно вирішити.

Як видно з наведеного раніше виразу, вирішити проблему перевантаження можна такими способами:

- Зменшити інтенсивність запитів;
- Зменшити середній час обробки одного запиту;
- Збільшити кількість потоків обробки запитів.

Останні два дефіси пов'язані зі зміною апаратної частини обчислювального ядра супутника-обчислювача: збільшення продуктивності кожного ядра процесора та збільшення кількості обчислень потоків. Додатковим рішенням може бути включення до складу розподіленого супутника додаткового супутника обчислювача.

Зменшити інтенсивність запитів можна шляхом переадресації отриманих запитів пристроїв інтернету речей із низьким пріоритетом обслуговування до сусідніх розподілених супутників з використанням ліній зв'язку між супутниками. У цьому випадку ефективність одного розподіленого супутника становитиме

$$\rho' = \frac{\lambda' \bar{x}'}{m} = \sum_{p=p_{min}}^P \rho_p = \frac{1}{m} \sum_{p=p_{min}}^P \lambda_p \bar{x}_p \quad (3.9)$$

тут  $\lambda'$  – інтенсивність вимог (запитів) з урахуванням обмеження та переадресації частини запитів до інших розподілених супутників,  $\lambda' = \sum_{p=p_{min}}^P \lambda_p$ ;  $\bar{x}'$  - середній час обслуговування однієї вимоги (запиту) після переадресації частини вимог (запитів);  $p_{min}$  – мінімальний рівень пріоритету класу обслуговування пристроїв та послуг інтернету речей.

У структурі показника гранично допустимого часу обробки вимоги (запиту) займає середній час очікування запиту з пріоритетом  $p$ , який становить

$$W_p = W_0 + \sum_{i=p_{min}}^P \bar{x}_i (\bar{N}_{ip} + \bar{M}_{ip}) = \frac{W_0}{(1-\sigma_{p-1}) \cdot (1-\sigma_p)} \quad (3.10)$$

тут  $W_0$  – середня затримка, пов'язана з обслуговуванням вимог, що раніше надійшли.

$$W_0 = \sum_{i=p_{min}}^P \rho_i \frac{\bar{x}_i^2}{2\bar{x}_i} = \sum_{i=p_{min}}^P \frac{\lambda_i \bar{x}_i^2}{2} \quad (3.11)$$

$\bar{x}_i$ - середній час обслуговування вимоги з пріоритетом  $i$ ;

$\bar{x}_i^2$  – другий момент розподілу часу обслуговування вимог класу  $i$ ;

$\bar{N}_{ip}$ - середня кількість вимог класу  $i$ , які перебували у черзі до приходу вимоги класу  $p$ ,  $\bar{N}_{ip} = \lambda_i W_i$ . Враховуються лише вимоги, клас яких дорівнює або вище класу вимоги  $i \geq p$ ;

$\bar{M}_{ip}$ - кількість вимог, що надійшли після приходу вимоги класу  $p$ , у яких клас більший  $p$ ,  $\bar{M}_{ip} = \lambda_i W_p$ ,  $i \geq p + 1$ .

$\sigma_p$ - питоме навантаження для вимог класу  $p$  і вище,

$$\sigma_p = \sum_{i=p}^P \rho_i \quad (3.12)$$

Як було показано в [6], час передачі посилки (пакету) вимоги (запиту) від пристрою інтернету речей до обчислювального модуля і назад  $t_{Tp}$  являє собою суму кількох складових, основними з яких є

$$t_{Tp} = t_{up} + t_{down} + t_{IS\Sigma} \quad (3.13)$$

$t_{up}$ ,  $t_{down}$  – затримка на передачу запиту по супутниковому радіоканалу лінії вгору (up-link) і лінії вниз (down-link);  $t_{IS\Sigma}$  – сумарна затримка на передачу запиту та відповіді пів лініям зв'язку між супутниками, у разі використання обчислювальної потужності супутників-обчислювачів зі складу інших розподілених супутників

$$t_{IS\Sigma} = \sum_{n=1}^N t_{ISn} \quad (3.14)$$

тут  $N$  – кількість ліній зв'язку між супутниками у тракці передачі запиту та відповіді.

З урахуванням вище наведеного вираз, що визначає час обробки запиту пристрою інтернету речей, набуває вигляду

$$T_p = \bar{x}_p + \frac{w_0}{(1-\sigma_{p-1}) \cdot (1-\sigma_p)} + \bar{t}_{Tp} \quad (3.15)$$

Отже, при перевищенні очікуваної ефективності супутника-обчислювача із складу розподіленого супутника граничного значення, тобто.  $\rho \geq 1$ , ефективним засобом забезпечити працездатність розподіленого супутника в частині обробки вимог (запитів) пристроїв та служб інтернету речей є обмеження інтенсивності вимог  $\lambda$  до величини  $\lambda'$ , за якої виконується умова  $\rho < 1$  шляхом перенаправлення потоку вимог (запитів) з нижчим значенням показника класу вимоги  $p$  до обробки до інших розподілених супутників з використанням ліній зв'язку між супутниками. Обчислення мінімального значення показника класу вимог  $p_{min}$  є ітераційним завданням, що залежить від структури безлічі пристроїв інтернету речей, розташованих в межах поточної зони обслуговування розподіленого супутника і переліку надаються за їх допомогою послуг інтернету речей.

Враховуючи суттєву неоднорідність розподілу пристроїв інтернету речей у смузі обслуговування орбітальної площини або в зоні обслуговування системи в цілому алгоритм перерозподілу вимог (запитів) пристроїв інтернету речей та пов'язаного з цим обчислювального навантаження можна представити за допомогою матриці розподілу задач  $A$  та матриці розподілу обчислювального навантаження у системі  $L$ . У загальному випадку матриці  $A$  та  $L$  є тривимірними матрицями, розмірність яких залежить від кількості орбітальних площин, кількості розподілених супутників у кожній орбітальній площині та кількості завдань послуг інтернету речей, що надаються системою. Для однієї орбітальної площини матриця розподілу завдань має вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} \langle \rho_{P,1}, T_{P,1} \rangle & \langle \rho_{P,2}, T_{P,2} \rangle & \cdots & \langle \rho_{P,m}, T_{P,m} \rangle & \cdots & \langle \rho_{P,M}, T_{P,M} \rangle \\ \langle \rho_{P-1,1}, T_{P-1,1} \rangle & \langle \rho_{P-1,2}, T_{P-1,2} \rangle & \cdots & \langle \rho_{P-1,m}, T_{P-1,m} \rangle & \cdots & \langle \rho_{P-1,M}, T_{P-1,M} \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \rho_{p,1}, T_{p,1} \rangle & \langle \rho_{p,2}, T_{p,2} \rangle & \cdots & \langle \rho_{p,m}, T_{p,m} \rangle & \cdots & \langle \rho_{p,M}, T_{p,M} \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \rho_{0,1}, T_{0,1} \rangle & \langle \rho_{0,2}, T_{0,2} \rangle & \cdots & \langle \rho_{0,m}, T_{0,m} \rangle & \cdots & \langle \rho_{0,M}, T_{0,M} \rangle \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Стовпці матриці розподілу задач відповідають номерам розподілених супутників  $m$  в обраній орбітальній площині і приймають значення від 1 до  $M$ . Рядки матриці відповідають значенню показника класу пріоритету  $p$  і приймають

значення від 0 до  $P$ . Елементами матриці розподілу задач є ефективність обслуговування вимог пріоритету  $p$  у обчислювальному ядрі супутника-обчислювача  $m$  та середній час обслуговування однієї вимоги (запиту)  $T$ , значення якого враховує час передачі вимоги (запиту) лініями зв'язку від пристрою інтернету речей до супутника-обчислювача, що здійснює його обробку, та у зворотному напрямку.

Аналогічно, матриця розподілу обчислювального навантаження має вигляд:

$$L = \begin{bmatrix} \langle u_{p,1}, t_{p,1} \rangle & \langle u_{p,2}, t_{p,2} \rangle & \cdots & \langle u_{p,m}, t_{p,m} \rangle & \cdots & \langle u_{p,M}, t_{p,M} \rangle \\ \langle u_{p-1,1}, t_{p-1,1} \rangle & \langle u_{p-1,2}, t_{p-1,2} \rangle & \cdots & \langle u_{p-1,m}, t_{p-1,m} \rangle & \cdots & \langle u_{p-1,M}, t_{p-1,M} \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle u_{p,1}, t_{p,1} \rangle & \langle u_{p,2}, t_{p,2} \rangle & \cdots & \langle u_{p,m}, t_{p,m} \rangle & \cdots & \langle u_{p,M}, t_{p,M} \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle u_{0,1}, t_{0,1} \rangle & \langle u_{0,2}, t_{0,2} \rangle & \cdots & \langle u_{0,m}, t_{0,m} \rangle & \cdots & \langle u_{0,M}, t_{0,M} \rangle \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Як і у разі матриці розподілу завдань, стовпці матриці розподілу обчислювального навантаження відповідають номерам розподілених супутників у складі обраної орбітальної площини, а рядки матриці відповідають показнику класу пріоритету обслуговування. Елементами матриці розподілу обчислювального навантаження є питома складність обслуговування однієї вимоги (запиту) класу з показником пріоритету  $p$  у обчислювальному модулі супутника-обчислювача  $u_{p,m}$  та питомий час, що виділяється у обчислювальному модулі супутника-обчислювача зі складу  $m$ -го розподіленого супутника із показником пріоритету  $p$ . Питома складність обслуговування однієї вимоги (запиту) визначається так:

$$u_{p,m} = \frac{q_p}{\bar{x}_p c_m} \quad (3.18)$$

тут  $q_p$  – середня обчислювальна складність обслуговування однієї вимоги (запиту) (вимірюється у кількості елементарних операцій) з рівнем пріоритету  $p$ ,  $c_m$  – обчислювальна потужність (або продуктивність) супутника-обчислювача (вимірюється у кількості елементарних операцій, що виконуються за одиницю часу) зі складу  $m$ -го розподіленого супутника. Умовою функціонування обчислювального модуля супутника-обчислювача без колізій є виконання нерівності



В разі, коли очікуване обчислювальне навантаження для одного супутника-обчислювача перевищує його обчислювальну потужність, тобто виникає загроза відмови в обслуговуванні запитів, супутник-обчислювач обмежує кількість запитів, які може обробити за показником очікуваного часу опрацювання. Інші запити передаються по орбітальній обчислювальній мережі на супутники-обчислювачі зі складу сусідніх розподілених супутників. При передачі запиту на обробку до сусіднього супутника-обчислювача його пріоритет зростає на 1 і в переліку завдань обчислювального навантаження формується нова черга обслуговування із врахуванням змінених пріоритетів, що надійшли від сусідніх супутників-обчислювачів (див. рис.3.10б). В разі, коли запит надійшов до супутника-обчислювача, який також має власне обчислювальне навантаження, що перевищує його обчислювальну потужність, запит передається на сусідній (черговий) супутник-обчислювач, а його пріоритет знов зростає на 1. В разі, коли залишок часу на обробку запиту не дозволяє вже передати його до сусіднього супутника-обчислювача, запит отримує найвищий пріоритет і оброблюється. На рис.3.10в показаний підсумковий стан розподілу запитів в чергах на обробку супутників-обчислювачів.

Запропонований алгоритм розподілу обчислювального навантаження дозволяє рівномірно розподілити обчислювальне навантаження між супутниками-обчислювачами і забезпечити дотримання вимог щодо припустимого часу обробки інформації Інтернету речей. Такий підхід дозволяє використовувати у складі обчислювальних модулів супутників-обчислювачів пристрої з відносно невеликою складністю і, відповідно, вартістю.

### **3.3 ГСО складова для забезпечення хмарних обчислень.**

#### *Орбітальна система хмарних сховищ даних.*

Орбітальна мережа хмарних сховищ даних призначена для надання послуг хмарних центрів збирання, обробки, зберігання та поширення даних систем Інтернету речей для користувачів, що знаходяться на поверхні Землі незалежно від їх місця розташування. До хмарних центрів обробки даних надходить інформація

Інтернету речей, опрацьована на рівні туманних обчислень засобами зі складу розподілених супутників НГСО угрупування супутникової інфраструктури. На рис.3.11 представлена схема взаємодії пристроїв Інтернету речей, НГСО та ГСО складових для реалізації туманних і хмарних обчислень.

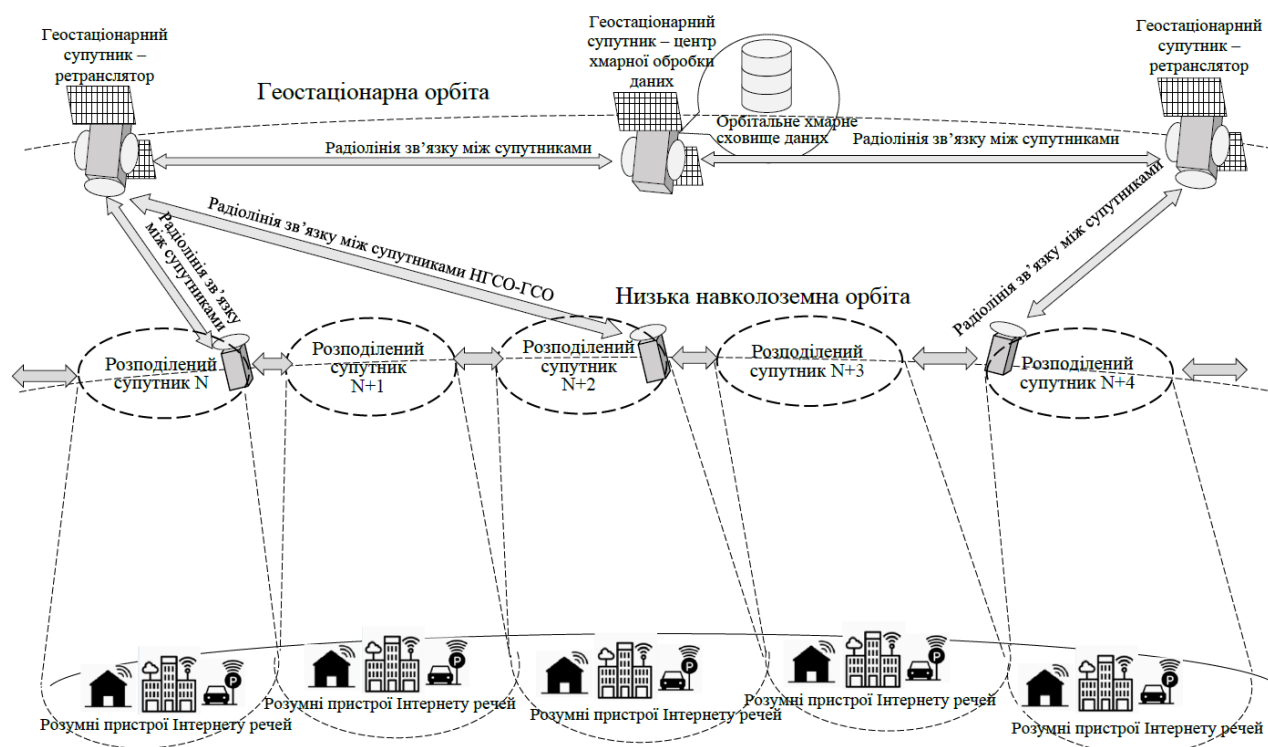


Рис. 3.11. Схема взаємодії пристроїв Інтернету речей із НГСО та ГСО складовими супутникової інфраструктури для реалізації хмарних та туманних обчислень

Реалізація туманних обчислень на рівні НГСО складової розглянута в попередньому параграфі роботи.

ГСО складова супутникової інфраструктури призначена для реалізації хмарних обчислень. З цією метою до складу ГСО сегменту включені ГСО супутники-хмарні центри обробки даних. Завданням ГСО супутника – хмарного центру обробки даних є надання сервісів хмарного центру даних для користувачів системи і послуг Інтернету речей, які реалізуються із залученням супутникової інфраструктури і передбачають безпосередній доступ пристроїв Інтернету речей до НГСО сегменту із використання вузькосмугових протоколів LoRaWAN та NB-IoT.

Зважаючи на особливості розподілу супутників різноманітного призначення по геостационарній орбіті, ГСО супутники – хмарні центри обробки даних можна

розмістити в тих орбітальних позиціях, які не представляють інтересу для інших супутникових служб з точки зору зон покриття. Доступ до ГСО супутників – хмарних центрів обробки даних здійснюється через ГСО супутники-ретранслятори, які на додаток до завдання організації та підтримки лінії зв'язку НГСО-ГСО здійснюють функцію серверу інформаційної безпеки та доступу до обчислювального ресурсу ГСО. На рис. 3.12 представлена схема розташування ГСО супутників зі складу геостаціонарного сегменту супутникової інфраструктури.

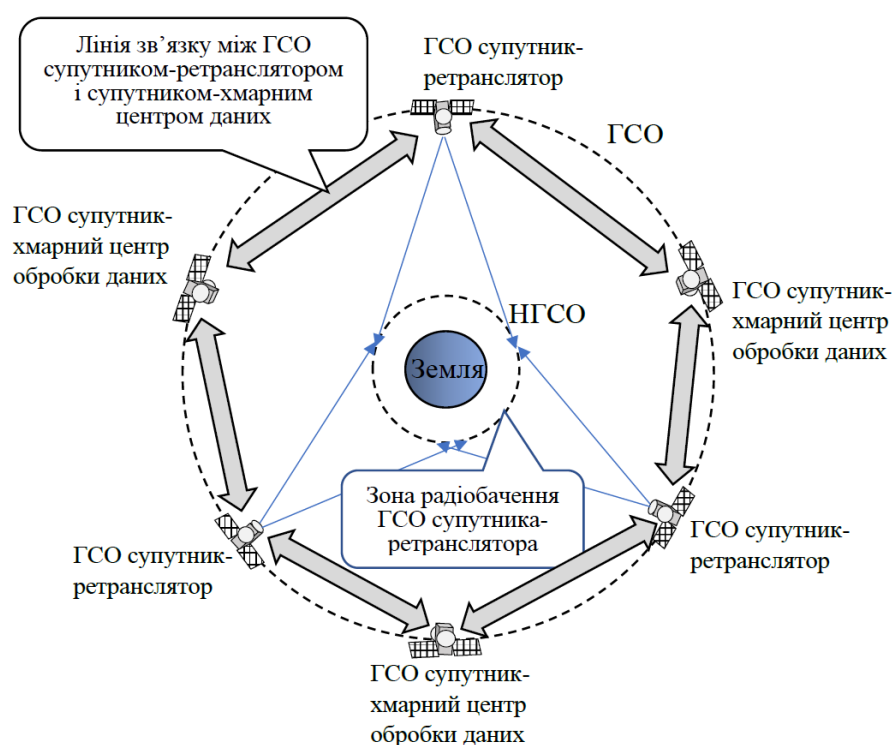


Рис. 3.12 Схема розташування ГСО супутників зі складу геостаціонарного сегменту супутникової інфраструктури

Як видно із рис.3.12 ГСО супутники об'єднані лініями зв'язку між супутниками. ГСО супутник-ретранслятор забезпечує двосторонній інформаційний обмін ГСО супутника – хмарного центру обробки даних для реалізації хмарних обчислень для послуг і систем Інтернету речей.

Для реалізації функціональних завдань за призначенням ГСО супутник – хмарний центр обробки даних має бути обладнаний засобами підтримки лінії зв'язку між супутниками та засобами, які формують обчислювальну потужність та



масив пам'яті для накопичення і збереження інформації. На рис. 3.13 представлена структурна схема корисного навантаження ГСО супутника – хмарного центру обробки даних. Умовно корисне навантаження цього супутника можна розділити на чотири частини, які відображають окремі функціональні завдання:

- модуль радіоканалу лінії зв'язку між супутниками;
- внутрішня мережа передачі даних;
- процесорний модуль серверів та обчислювальних модулів;
- модуль пам'яті.

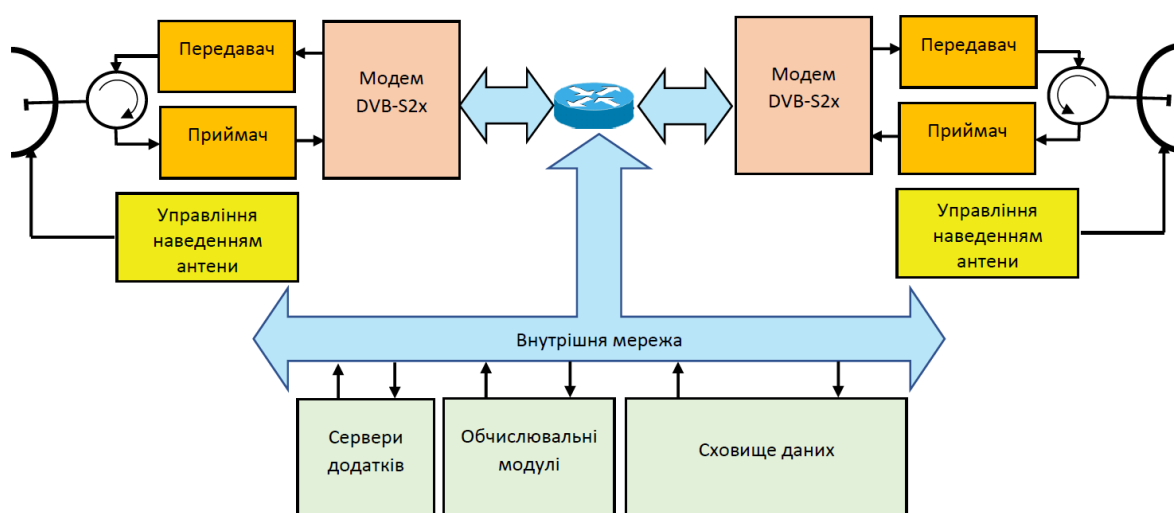


Рис. 3.13 Структурна схема корисного навантаження ГСО супутника – хмарного центру обробки даних

Модуль радіоканалу лінії зв'язку між супутниками включає:

- антена із механізмом наведення та системою управління наведенням;
- ВЧ приймач та передавач. ВЧ інтерфейс цих пристроїв підключений до рециркулятора антенного тракту, а низькочастотний інтерфейс забезпечує інформаційний обмін на проміжній частоті в L-діапазоні із модемом;
- модем DVB-S2x призначений для обробки вхідного потоку, який надходить від ВЧ приймача на проміжній частоті в L-діапазоні, демодуляції та декодування прийнятого потоку, передачі інформації до

маршрутизатора, що входить до бортової локальної мережі передачі даних, та виконання аналогічних функцій щодо передачі інформації до ВЧ передавача.

Вхід/вихід модема DVB-S2x є інтерфейсом модуля радіоканалу лінії зв'язку між супутниками до іншого функціонального обладнання корисного навантаження ГСО супутника – хмарного центру обробки даних.

Внутрішня мережа передачі даних забезпечує інформаційний обмін між усіма елементами корисного навантаження ГСО супутника – хмарного центру обробки даних. До складу бортової локальної мережі включений маршрутизатор, який забезпечує розподіл інформаційних потоків, що циркулюють в мережі, і формування інформаційних потоків для передачі до інших елементів і складових частин усієї супутникової інфраструктури. Внутрішня локальна мережа використовує в якості серди передачі оптоволоконний кабель.

Процесорний модуль серверів додатків та обчислювальних модулів призначений для реалізації завдань серверів додатків, доступу, безпеки, управління базами даних, тощо. Перелік функціональних завдань серверів додатків аналогічний завданням серверів додатків наземних дата-центрів. Зважаючи на обмежені масово-габаритні характеристики процесорного модуля, які визначені можливостями модуля корисного навантаження геостационарного супутника, обчислювальна потужність процесорного модуля менша в порівнянні із показниками аналогічного за призначенням обладнання наземних дата-центрів. Використанні у складі ГСО сегменту супутникової інфраструктури ліній зв'язку між ГСО супутниками дозволяє створити орбітальну високошвидкісну мережу передачі даних, що об'єднує ГСО супутники – хмарні центри обробки даних та ГСО супутники-ретранслятори (див. рис. 3.12).

Модуль пам'яті призначений для зберігання баз даних, що пов'язані із системами та службами Інтернету речей.

## ВИСНОВКИ

Сучасні супутникові телекомунікаційні системи забезпечують трафік інформації систем Інтернету речей, побудованих завдяки хмарній архітектурі. Недоліком хмарної архітектури систем Інтернету речей є необхідність передачі всього трафіку інформації пристроїв Інтернет речей до хмарних центрів обробки даних і в зворотному напрямку, що приводить до неефективного завантаження супутникових телекомунікаційних систем.

Супутникові телекомунікаційні системи можливо адаптувати до особливостей інформаційних потоків систем Інтернет речей, які використовують технології туманних та граничних обчислень для підвищення власної ефективності. Розглянуто варіанти впровадження туманних обчислень в низькоорбітальних системах: орбітальне угруповання розподілених супутників, що використовує модифікований протокол LoRaWAN та NB-IoT – доповнення корисного навантаження кубсатів та їх заміну в перебігу планового оновлення орбітального угруповання.

ГСО складова великої пропускної здатності супутникової інфраструктури призначена для реалізації хмарних обчислень. До хмарних центрів обробки даних надходить інформація Інтернету речей, опрацьована на рівні туманних обчислень засобами зі складу розподілених супутників НГСО угруповання супутникової інфраструктури. Завдяки хмарного центру обробки даних є надання сервісів хмарного центру даних для користувачів системі і послуг Інтернету речей, які реалізуються із залученням супутникової інфраструктури і передбачають безпосередній доступ пристроїв Інтернету речей до НГСО сегменту із використання вузькосмугових протоколів LoRaWAN та NB-IoT.

Космічний сегмент хмарних серверів є позитивним фактором підвищення оперативності обробки, зберігання та забезпечення доступу систем IoT до хмарних сервісів. Доступ до орбітального хмарного сховища даних може здійснюватися

через модернізовані геостаціонарні супутники високої пропускної здатності та через НГСО угруповання супутникової інфраструктури.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

#### 4.1 Опис ідеї проекту

Розроблено макетний зразок телекомунікаційної супутникової ГСО-НГСО системи, що надає послуги Інтернету речей, та концепції хмарних, туманних та граничних обчислень в системах Інтернету речей, що оптимізовані до вимог мереж і використовує в якості базового протокол LoRaWAN та NB-IoT.

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартап-проекту

| Зміст ідеї                                                                                             | Напрямки застосування                                                             | Вигоди для користувача                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Розробка супутникової ГСО-НГСО системи, що надає послуги Інтернету речей з вузькосмуговими протоколами | Сферою застосування є безпроводові телекомунікаційні системи різного призначення. | Використання супутникової ГСО-НГСО системи, що надає послуги Інтернету речей з вузькосмуговими протоколами допоможе користувачам Інтернету речей мати доступ та зв'язок у будь-якій ділянці Землі, завдяки щільному покриттю та адаптованих протоколів LoRaWAN та NB-IoT. З використанням концепції хмарних, туманних та граничних обчислень в системах Інтернету речей. |

При порівнянні з конкурентами в першу чергу увага надається можливості високошвидкісної передачі інформації, що визначає загальний підхід до рішення проблеми. Порівняння з конкурентами, а також визначення переваг і недоліків наведено у наступній таблиці.

Розробка відповідає світовому рівню. Виконана робота є оригінальною і базується на використанні запропонованих авторами нових апаратно-програмних рішень і неенергетичного методу прийому, що не відноситься до класичного методу. Соціальний ефект від впровадження проекту полягає в забезпеченні надвисокошвидкісної комунікації людини із людиною та із зовнішнім світом як необхідного елементу забезпечення базових потреб суспільства щодо охорони здоров'я, безпеки, добробуту населення для сталого зростання економіки держави. Робота не має прямих аналогів у світовій науці і техніці.

## 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.2

Технологічна здійсненність ідеї проекту

| No п/п                                                                                | Ідея проекту                                                    | Технології реалізації                | Наявність технологій | Доступність технологій                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------|
| 1                                                                                     | Супутникова ГСО-НГСО системи , що надає послуги Інтернету речей | Реалізація на базі протоколу LoRaWAN | Протокол LoRaWAN     | Є доступними та безкоштовними для використання |
| 2                                                                                     |                                                                 | Реалізація на базі протоколу NB-IoT  | Протокол NB-IoT      | Є доступними та безкоштовними для використання |
| Обрана технологія реалізації проекту: Реалізація на базі протоколу LoRaWAN та NB-IoT. |                                                                 |                                      |                      |                                                |

Для реалізації проекту доступні два варіанти вузькосмугових протоколів: LoRaWAN та NB-IoT.

В ряді досліджень запропоновано формувати вузькі зони обслуговування супутників на базі протоколу NB-IoT, в межах яких здійснюється компенсація середнього значення доплерівського зсуву. Тому для реалізації протоколів до складу кожного розподіленого супутника включені по супутнику-ретранслятору

LoRaWAN із широкою зоною обслуговування та чотири-вісім супутників-ретрансляторів NB-IoT із вузькою зоною обслуговування, які покривають одну ділянку.

### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

При дослідженні ринкових можливостей, в першу чергу проведений аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку. Дані наведені у таблиці нижче (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| Но п/п | Показники стану ринку<br>(найменування)            | Характеристика |
|--------|----------------------------------------------------|----------------|
| 1      | Кількість головних гравців, од                     | 3              |
| 2      | Загальний обсяг продаж                             | ?              |
| 3      | Динаміка ринку (якісна оцінка)                     | Зростає        |
| 4      | Наявність обмежень для входу                       | Немає          |
| 5      | Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації | Немає          |

Враховуючи загальну динаміку інтеграції нових стандартів зв'язку, щорічна кількість базових станцій та щільність мережі – зростає. Чим щільніше спроектована мобільна мережа, тим більш вона чутлива то точності проєктування. Підвищити точність проєктування допоможуть відкалібровані моделі радіопокриття. За попереднім оцінюванням ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.4

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| Но п/п | Потреба, що формує ринок | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку) | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару |
|--------|--------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
|        |                          |                                            |                                                                   |                             |

Продовження таблиці 4.4:

|   |                                     |                                          |                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---|-------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Велика зона покриття технологій IoT | Провайдери та оператори, користувачі IoT | Оператори IoT технологій можуть покривати віддалені куточки Землі | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Здійснюється компенсація середнього значення доплерівського зсуву в межах протоколу NB-IoT.□</li> <li>- Можливість отримати перелік факторів які негативно впливають на мережу.</li> <li>- Використання методів обробки даних для оперативної реакції на проблеми в мережі / аварії</li> </ul> |
|---|-------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Таблиця 4.5

## Фактори загроз

| №<br>п/п | Фактор                                | Зміст загрози                                                                                                                                                             | Можлива реакція компанії                                      |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1        | Відсутність зацікавленості у продукті | Успіх системи залежить від підтримки великого бізнесу, адже з великою імовірністю всеукраїнські оператори зв'язку не будуть звертати на нову технологію супутникового IoT | Робота з великим бізнесом над підвищенням лояльності клієнта. |



Продовження таблиці 4.5:

|   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                   |
|---|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | Складність даних | Великою проблемою при роботі в великих масивах даних є велика залежність до часового періоду часу. В різні періоди доби та в різні дні навантаження на мережу може відрізнятися, тому буде складно відслідковувати позитивний вплив на систему у кількох кластерах. Такий вплив може коливатися в межах похибки або впливу публічного івенту (ярмарки, концерти, виступи) | Використання нових методів математичного аналізу даних та порівняння динаміки статистики за різний часовий період |
|---|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Таблиця 4.6

#### Фактори можливостей

| №<br>п/п | Фактор                                                                                                     | Зміст можливості                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Можлива реакція компанії     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1        | Можливість реалізувати один супутник-ретранслятор LoRaWAN та чотири-вісім супутників-ретрансляторів NB-IoT | В ряді досліджень запропоновано формувати вузькі зони обслуговування супутників на базі протоколу NB-IoT, в межах яких здійснюється компенсація середнього значення доплерівського зсуву. Тому для реалізації протоколів до складу кожного розподіленого супутника включені по супутнику-ретранслятору LoRaWAN із широкою зоною обслуговування та чотири-вісім супутників-ретрансляторів NB-IoT із вузькою зоною обслуговування, які покривають одну ділянку. | Реалізація даної можливості. |

Одночасно і можливістю і загрозою даних які збираються операторами зв'язку, це дає можливість використовувати передачі даних та створювати систему оперативного реагування, але одночасно зростає можливість зробити помилку при виявленні параметрів котрі негативно впливають на роботу мережі.

Таблиця 4.7

## Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| Особливості конкурентного середовища                            | В чому проявляється дана характеристика                                                                                                                       | Вплив на діяльність підприємства                                                                |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Тип конкуренції: олігополія                                  | На ринку представлені декілька компаній, що поставляють подібні послуги рішення проблеми відтоку                                                              | Акцентування переваг продукту, що забезпечує використання комбінованих методів оптимізації      |
| 2. Рівень конкурентної боротьби: національний/інтернаціональний | Першим етапом є боротьба за ринок України з подальшим виходом на ринки інших країн                                                                            | Маркетингова компанія в першу чергу орієнтована на захоплення місцевого ринку                   |
| 3. Галузева ознака: внутрішньогалузева                          | Економічна боротьба з конкурентами відбувається в одній галузі економіки, пропонуються аналогічні послуги, що мають архітектурні відмінності у функціонуванні | Пропозиція суттєвих переваг у порівнянні з продуктами конкурентів у визначеній галузі економіки |
| 4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова                | Конкуренція відбувається між послугами одного виду. За такої конкуренції значення набуває марка товару                                                        | Постійна робота над забезпеченням високого рівня іміджу компанії                                |

Продовження таблиці 4.7:

|                                                 |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                          |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5. За характером конкурентних переваг: нецінова | Передбачається ведення конкурентної боротьби не за рахунок зниження ціни на аналогічні послуги, а за рахунок новизни та унікальних характеристик технології, на якій базується функціонування системи | Акцент на унікальних характеристиках пропонованого товару та більш низькій ціні ліцензії |
| 6. За інтенсивністю: марочна                    | Виведення товару на ринок передбачається під власною маркою, а також створення асоціації між назвою фірми і назвою мережевої архітектури радіомережі                                                  | Просування продукту компанії під визначеним брендом                                      |

Таблиця 4.8

#### Аналіз конкуренції в галузі за м. Київ

| Складові і аналізу | Прямі конкуренти в галузі                                                     | Потенційні конкуренти                                           | Постачальники                                      | Мережа оператора                                                                                                                                               | Товари-замінники                                                                |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                    | StarLink<br>OneWeb<br>AWS                                                     | Патент на продукт, гнучкі ціни                                  | Змінні витрати постачальників в                    | Рівень чутливості до зміни цін на ліцензії                                                                                                                     | Ціна, лояльність споживачів                                                     |
| Висновки           | Конкуренція не інтенсивна, кожен працює в окремому напрямі оптимізації мережі | Можливість входу в ринок висока. Потенційні конкуренти присутні | Постачальник може диктувати умови: ціни на послуги | Мобільні та супутникові мережі висувають досить жорсткі вимоги до проектування. Оскільки вони швидко зростають, необхідно забезпечити точне планування мережі. | Обмежень для роботи на ринку з боку товарів замінників на даний момент не існує |

В результаті проведення аналізу таблиці 4.8, можна зробити висновок, що можливість виходу на ринок з огляду на конкурентну ситуацію є високою. Для виходу на ринок товар в першу чергу повинен пропонувати унікальні характеристики, які відсутні у продуктах конкурентів.

Таблиця 4.9

## Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| №<br>п/п | Фактори<br>конкурентоспроможності | Обґрунтування                                                                                                                                            |
|----------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Динаміка галузі                   | Проблема зони покриття далеко віддалених територій є дуже важливою для операторів IoT технологій, оскільки надає можливість розширювати свої технології. |
| 2        | Концепція товару і послуги        | Реалізація хмарних обчислень надасть можливість суттєво полегшити роботу супутникових IoT                                                                |
| 3        | Після продажне обслуговування     | Підтримка щодо використання системи після її продажу                                                                                                     |

Таблиця 5.10

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін системи підвищення якості мережів операторів мобільного зв'язку

| №<br>п/п | Фактори<br>конкурентоспроможності | Бали<br>1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з власною системою |    |    |   |   |   |   |
|----------|-----------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------|----|----|---|---|---|---|
|          |                                   |              | -3                                                          | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 1        | Динаміка галузі                   | 3            |                                                             |    |    |   |   | ✓ |   |
| 2        | Концепція товару і послуги        | 1            |                                                             |    |    |   | ✓ |   |   |
| 3        | Після продажне обслуговування     | 2            |                                                             |    |    |   |   |   | ✓ |

Таблиця 4.11

## SWOT-аналіз стартап проекту

|                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Інноваційні технології</li> <li>• Висока якість</li> </ul>                       | <p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Слабкий імідж компанії</li> <li>• Слабкий маркетинг</li> <li>• Мало оборотних коштів</li> <li>• Невідома торгівельна марка</li> </ul> |
| <p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Нові технології</li> <li>• Потреби операторів</li> <li>• Тенденції попиту</li> </ul> | <p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Продукти-замінники</li> </ul>                                                                                                                |

Таблиця 5.12

## Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

| №<br>п/п | Опис профілю<br>цільової групи<br>потенційних<br>клієнтів | Готовність<br>споживачів<br>сприйняти<br>продукт | Орієнтовний<br>попит в<br>межах<br>цільової<br>групи | Інтенсивність<br>конкуренції в<br>сегменті | Простота<br>входу у<br>сегмент |
|----------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|
| 1        | Малий бізнес                                              | Переважно<br>готові                              | Дуже<br>високий                                      | Низька                                     | Легко                          |
| 2        | Всеукраїнські<br>оператори<br>мобільного<br>зв'язку       | Не готові                                        | Дуже<br>високий                                      | Висока                                     | Важко                          |

Базові стратегії в обраних сегментах ринку представлені у таблиці 4.13.

Таблиця 4.13

## Визначення базової стратегії розвитку

| №<br>п/п | Обрана<br>альтернатива<br>розвитку                                                     | Стратегія охоплення<br>ринку                                                        | Ключові<br>конкурентоспромо<br>жні позиції                       | Базова<br>стратегія<br>розвитку |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1        | Динамічний розвиток з використанням маркетингу та встановлення бізнес-контактів        | Підняття рейтингу компанії шляхом маркетингу, встановлення конкурентоспроможних цін | Незалежність від посередника, який утримує кошти за свої послуги | Стратегія лідерства по витратах |
| 2        | Динамічний розвиток завдяки висвітленню унікальних характеристик запропонованих послуг | Унікальність послуг, для збільшення залежності оператора                            | Використання комбінованого підходу до завдань оптимізації        | Стратегія диференціації         |

Залежно від міри сформованості галузевого ринку ,  
характеру конкурентної боротьби ,  
необхідно обрати одну з трьох стратегій конкурентної поведінки: розширення первинного попиту, оборонну або наступальну стратегію або ж застосувати демаркетинг або диверсифікацію(таблиця 4.14).

Таблиця 4.14

## Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| №<br>п/п | Чи є проект<br>першопрохідцем<br>на ринку | Чи буде<br>компанія шукати<br>нових<br>споживачів, або<br>забирати<br>існуючих у<br>конкурентів | Чи буде компанія<br>копіювати основні<br>характеристики | Стратегія<br>конкурентної<br>поведінки |
|----------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|----------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|

Продовження таблиці 4.14:

|   |                                                                   |                                         |                                                              |                                                                   |
|---|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1 | Проект не є першопрохідцем, але не має подібних аналогів на ринку | Компанія буде шукати нових користувачів | Компанія буде копіювати найкращі з характеристик конкурентів | Стратегія наслідування лідеру за для економії фінансових ресурсів |
|---|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (таблиця 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки буларозроблена стратегія позиціонування (таблиця 4.14).

#### 4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Маркетингова програма - це намічений для планомірного здійснення, об'єднаний єдиною метою та залежний від певних строків комплекс взаємопов'язаних завдань і адресних заходів соціального, економічного, науково-технічного, виробничого, організаційного характеру з визначенням ресурсів, що використовуються, а також джерел одержання цих ресурсів.

Основну увагу слід приділяти вибору, значенню та формі інструментів маркетингу, їх об'єднанню в найбільш оптимальний з погляду визначеної мети комплекс, а також розподілу фінансових ресурсів у межах бюджетування маркетингу.

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару , який отримає споживач. Для цього потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (таблиця 4.12).

Таблиця 4.15

## Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| №<br>п/п | Потреба                                                                                                                            | Вигода, яку пропонує товар                                                                                              | Ключові<br>переваги перед<br>конкурентом                     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1        | Створення супутникових IoT для надання послуг                                                                                      | Можливість, надання послуг IoT майже по всій території Землі                                                            | Комбінований підхід до рішення цієї задачі                   |
| 2        | Отримання переліку параметрів які впливають на зниження якості мережі                                                              | Дозволяє розглядати показники мережі окремо від загальної статистики                                                    | Наочне подання інформації для більшої зручності користування |
| 3        | Можливість обробки та аналізу великих об'ємів даних за короткий час для підтримання актуалізації знань про ситуацію на момент часу | Можливість, що забезпечується новітніми алгоритмами, системами супутникових інфраструктур з вузькосмуговими протоколами | Наочне подання інформації для більшої зручності користування |

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточняється ідея продукту та послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання.



Таблиця 4.16

## Опис трьох рівнів моделі товару

| Рівні товару                                                                                                             | Сутність та складові                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Товар за задумом                                                                                                      | Товар забезпечує широку зону покриття IoT технологій.                                                                                                                                                                                      |
| 2. Товар у реальному виконанні                                                                                           | Властивості: доступність, цілісність, зручність, прозорість.<br>Кінцеві пристрої IoT; VSAT-термінали, які забезпечують доступ з ГСО-НГСО супутниковою мережею; додатки IoT, які дозволять спостерігати і керувати кінцевими пристроями IoT |
| 3. Товар із підкріпленням                                                                                                | До продажу: відбувається інсталяція та конфігурування системи, проводяться тренінги для клієнта<br>Після продажу: відбувається підтримка програмного забезпечення та його доопрацювання під потреби клієнта                                |
| Системний комплекс, що забезпечує вирішення проблеми якості та низької оптимізації, розповсюджується на основі ліцензії. |                                                                                                                                                                                                                                            |

Таблиця 4.17

## Концепція маркетингових комунікацій

| № п/п | Специфіка поведінки цільових клієнтів             | Канали комунікацій                                     | Ключові позиції, обрані для позиціонування            | Завдання рекламного повідомлення             |
|-------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1     | Консервативна поведінка, але евідкриті до нового, | Соцмережі професійного спрямування, корпоративна пошта | Можливості отримання переліку параметрів та абонентів | Висвітлити унікальні характеристики продукту |

У якості концепції маркетингових комунікацій були обрані інтегровані маркетингові комунікації, де компанія ретельно обмірковує і координує роботу своїх численних каналів комунікації, особистий продаж, стимулювання збуту, пропаганду, прямий маркетинг

## **Висновки**

В даному розділі був проведений маркетинговий аналіз перспектив реалізації супутникової ГСО-НГСО системи , що надає послуги Інтернету речей з вузькосмуговими протоколами.

В результаті дослідження визначено, що існує можливість ринкової комерціалізації проекту в першу чергу завдяки найновішим стандартам та конфігураціям як супутникового, так і стільникового зв'язку дозволяють формувати комбіновані гібридні мережі, щоб скористатися перевагами найкращих характеристик обох типів мереж і максимально збільшити глобальне підключення. Зараз він використовується там, де наземні мережі недоступні або не можуть бути налаштовані.

Конкурентна ситуація надає перспективи впровадження продукту, так як дана система максимально забезпечує глобальне підключення.

Проведений аналіз підтверджує, що подальша імплементація проекту є доцільною.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Супутниковий IoT розробляється, щоб доповнити стільниковий IoT, а не повністю замінити наземні мережі IoT. Найновіші стандарти та конфігурації як супутникового, так і стільникового зв'язку дозволяють формувати комбіновані гібридні мережі, щоб скористатися перевагами найкращих характеристик обох типів мереж і максимально збільшити глобальне підключення. Зараз він використовується там, де наземні мережі недоступні або не можуть бути налаштовані.

Таким чином, впровадження супутникових систем IoT в поєднанні із стільниковими IoT є перспективним напрямком досліджень для широкомасштабного багатоцільового розгортання IoT.

Ефективним методом побудови телекомунікаційної системи, яка здатна забезпечити глобальне покриття для надання послуг IoT, є створення системи супутникового зв'язку, а саме реалізація супутникової ГСО-НГСО системи. Рішенням є впровадження низькоорбітальних супутникових систем для послуг Інтернету речей на базі протоколів LoRaWAN та NB-IoT, які добре адаптовані до реалізації супутникових IoT.

В ряді досліджень запропоновано формувати вузькі зони обслуговування супутників на базі протоколу NB-IoT, в межах яких здійснюється компенсація середнього значення доплерівського зсуву. Тому для реалізації протоколів до складу кожного розподіленого супутника включені по супутнику-ретранслятору LoRaWAN із широкою зоною обслуговування та чотири-вісім супутників-ретрансляторів NB-IoT із вузькою зоною обслуговування, які покривають одну ділянку.

Низькоорбітальна складова супутникової інфраструктури Інтернету речей призначена для забезпечення взаємодії із пристроями користувачів Інтернету речей безпосередньо, або із використанням універсальних VSAT-терміналів, та реалізації туманних обчислень. Низькоорбітальна складова побудована на базі централізованої архітектури розподіленого супутника. Особливу увагу приділено питанню концепції

«розподіленого супутника» у централізованій архітектурі, яка дозволяє побудувати низькоорбітальну систему зв'язку Інтернету Речей з реалізації концепцію «туманних» та «граничних» обчислень. Архітектура «розподіленого супутника» дозволяє оперативно нарощувати обчислювальні можливості космічного сегмента системи та забезпечувати перерозподіл обчислювального навантаження, що дозволяє використовувати обчислювальні засоби з обмеженою обчислювальною продуктивністю, тим самим знизити вартість таких пристроїв.

Реалізація супутникової ГСО-НГСО системи, де одна складова доповнює іншу, забезпечує зручну ієрархічну супутникову систему, яка є економічно вигідною в експлуатації.

Сучасні супутникові телекомунікаційні системи забезпечують передачу інформації систем IoT, побудованих переважно за хмарною архітектурою. Супутникові телекомунікаційні системи можливо адаптувати до особливостей інформаційних потоків систем IoT, які використовують технології туманних та граничних обчислень для підвищення власної ефективності. Адаптація здійснюється методом додавання обчислювальної потужності в термінали користувачів, в корисне навантаження супутників-ретрансляторів і станції спряження або центральні станції VSAT-мереж.

Космічний сегмент хмарних серверів є позитивним фактором підвищення оперативності обробки, зберігання та забезпечення доступу систем IoT до хмарних сервісів. Доступ до орбітального хмарного сховища даних може здійснюватися через модернізовані геостационарні супутники високої пропускну здатності та через НГСО угруповання супутникової інфраструктури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Інтернет речей. Матеріал з Вікіпедії — вільної енциклопедії. / Електронний ресурс.  
 Режим доступу:  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B%D0%B5%D1%82\\_%D1%80%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%B9](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B%D0%B5%D1%82_%D1%80%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%B9)
- 2) Стандарт NB-IoT Low-Power and Wide-Area, LPWA. Энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия / Електронний ресурс. Режим доступу:  
[https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82\\_NB-IoT\\_Low-Power\\_and\\_Wide-Area,\\_LPWAN\\_\(%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D1%81%D0%B5%D1%82%D1%8C\\_%D0%B4%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5%D0%B3%D0%BE\\_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D1%83%D1%81%D0%B0\\_%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D1%8F\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82_NB-IoT_Low-Power_and_Wide-Area,_LPWAN_(%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B5%D1%82%D1%8C_%D0%B4%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5%D0%B3%D0%BE_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D1%83%D1%81%D0%B0_%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D1%8F))
- 3) [https://www-avsystem-com.translate.goog/blog/iot-technology/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=uk&\\_x\\_tr\\_hl=uk&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://www-avsystem-com.translate.goog/blog/iot-technology/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=uk&_x_tr_hl=uk&_x_tr_pto=sc)
- 4) Сети LPWAN: история и перспективы. / Електронний документ. Режим доступу:  
<https://iot.ru/promyshlennost/seti-lpwan-istoriya-i-perspektivy>
- 5) Кто же такая эта LoRa? Или краткий обзор протокола LoRaWAN. / Електронний документ. Режим доступу: <https://r-iot.org/2016/06/11/%D0%BA%D1%82%D0%BE-%D0%B6%D0%B5-%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D1%8F-%D1%8D%D1%82%D0%B0-lora-%D0%B8%D0%BB%D0%B8-%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BA%D0%B8%D0%B9-%D0%BE%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80-%D0%BF%D1%80/>
- 6) <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
- 7) <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>

- 8) A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies / Future Internet 2019, 11, 216; doi:10.3390/fi11100216
- 9) Обзор технологии LoRa. / Электронный документ. Режим доступа: <https://itechinfo.ru/content/%D0%BE%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8-lora>
- 10) LoRaWAN™ 1.1 Specification. Copyright © 2017 LoRa Alliance, Inc. All rights reserved.
- 11) LoRaWAN™ 1.1 Specification. Copyright © 2017 LoRa Alliance, Inc. All rights reserved.
- 12) <http://space-scitechjournal.org.ua/uk/archive/2020/4/06>
- 13) ІЛЬЧЕНКО М.Ю., НАРИТНИК Т.М., ПРИСЯЖНИЙ В.І., КАПШТИК С.В., МАТВИЄНКО С.А. Космічна інфраструктура Інтернету речей. Стан та перспективи розвитку.
- 14) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36146446/> Аналіз продуктивності висхідного зв'язку NB-IoT у неземних мережах на низькій орбіті. Мін-Гю Кім, Хан-Шин Джо
- 15) <https://www.everythingrf.com/News/details/3224-NASA-Develops-Umbrella-Shaped-Antenna-for-CubeSats>
- 16) [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%BD%D1%96\\_%D0%BE%D0%B1%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%BD%D1%96_%D0%BE%D0%B1%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F)
- 17) <https://kitrum-com.translate.goog/blog/how-does-iot-fit-in-with-the-concept-of-cloud-computing/? x tr sl=en& x tr tl=uk& x tr hl=uk& x tr pto=sc>
- 18) [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%96\\_%D0%BE%D0%B1%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%96_%D0%BE%D0%B1%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F)

- 19) [https://www-spiceworks-com.translate.goog/it-security/application-security/articles/is-application-performance-monitoring-key-to-protecting-critical-infrastructure-against-cyberattacks/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=uk&\\_x\\_tr\\_hl=uk&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://www-spiceworks-com.translate.goog/it-security/application-security/articles/is-application-performance-monitoring-key-to-protecting-critical-infrastructure-against-cyberattacks/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=uk&_x_tr_hl=uk&_x_tr_pto=sc)
- 20) Туманные вычисления (Fog Computing), как составная часть 5G. URL: <https://shalaginov.com/2018/07/24/4510/> (дата звернения: 10.10.2019).
- 21) <https://developer.ibm.com/articles/iot-vs-edge-computing/>
- 22) <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2021-27/knit-2021-27-6-05-ilchenko.pdf>
- 23) [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/49805/1/Shytova\\_magistr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/49805/1/Shytova_magistr.pdf)
- 24) Туманные вычисления. Fog Computing. Опубликовано 06.03.2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные\\_вычисления\\_%28Fog\\_computing%29](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные_вычисления_%28Fog_computing%29). – 15.05.2019.