

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

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

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Впровадження архітектури мережі 5G до супутникових
телекомунікаційних систем»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-12

Шепета Іван Олександрович

Керівник:

науковий керівник НН ІТС, професор кафедри ТК НН ІТС,

д.т.н., професор, академік НАН України

Ільченко М.Ю.

Консультант:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н.

Капштик С. В.

Рецензент:

Начальник НЦУВКЗ, к.т.н, с.н.с

Присяжний В.І

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Шепета Іван Олександрович

1. Тема роботи «Впровадження архітектури мережі 5G до супутникових телекомунікаційних систем», керівник роботи Ільченко Михайло Юхимович, д.т.н., професор, академік НАН України, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1755-с.

2. Термін подання студентом роботи 9 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Методичні матеріали з проектування супутникових телекомунікаційних систем на базі архітектури 5G та неназемних мереж (NTN); технічна документація до стандартів 3GPP Release 16–18, зокрема щодо впровадження радіоінтерфейсу 5G-NR, мережевої функціональності SDN/NFV та структури мережі RAN; наукові праці, присвячені оптичним міжсупутниковим каналам зв'язку (OISL) і архітектурі IoT у супутникових мережах; публікації щодо супутникових систем Starlink, OneWeb, O3b/mPOWER, а також проєктні матеріали щодо обчислювального навантаження на базі процесорів Intel Xeon. У роботі також використовувалися аналітичні огляди рішень щодо реалізації туманних і граничних обчислень у супутникових системах, нормативні документи з питань організації логіки міжсупутникових зв'язків (LEO–LEO, LEO–GEO), технічні специфікації лазерних передавачів і приймачів, розрахункові дані щодо характеристик променя в оптичному діапазоні на

довжині хвилі 1550 нм, а також геометричні параметри орбіт супутників. Для виконання технічних розрахунків і побудови графіків використовувалося програмне забезпечення MATLAB, а також інженерний калькулятор для допоміжних обчислень. Для візуалізації супутникового покриття, трас зв'язку й орбітального руху супутників використовувалися ресурси Copernicus Browser та Google Earth.

4. Зміст роботи:

Ознайомитися з архітектурою мобільних мереж п'ятого покоління (5G) та проаналізувати перспективи інтеграції неназемних мереж (NTN) до складу глобальної інфраструктури зв'язку; дослідити структуру сучасних супутникових систем зв'язку на низьких (LEO) та геостаціонарних (GEO) орбітах; обґрунтувати доцільність використання оптичних лазерних міжсупутникових ліній зв'язку (OISL) у рамках супутникової IoT-мережі на основі стандарту 5G-NR. Розробити трирівневу архітектуру супутникової системи, що включає сегмент користувача (UE), супутникову мережу радіодоступу (LEO), транспортну мережу та обчислювальні ресурси на GEO-рівні. Побудувати структурну модель взаємодії між сегментами із застосуванням технологій SDN та NFV. Виконати технічні розрахунки параметрів оптичного каналу зв'язку для різних сценаріїв (LEO–LEO, LEO–GEO) з урахуванням довжини хвилі, потужності передавача, апертури приймача та лінкового запасу. Проаналізувати доцільність розміщення обчислювальних ресурсів на борту супутників із використанням процесорів Intel® Xeon® 6 для підтримки туманних та граничних обчислень. Оцінити ефективність передачі даних, зниження затримок та покриття мережі у разі впровадження запропонованої архітектури.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

- Слайд 1. Назва роботи.
- Слайд 2. Актуальність теми.
- Слайд 3. Мета роботи.
- Слайд 4. Завдання роботи.
- Слайд 5. Завдання роботи.
- Слайд 6. Аналіз сучасного стану розвитку мереж 5G та супутникових телекомунікаційних систем.
- Слайд 7. Технічні особливості архітектури 5G і її реалізації у супутниковому середовищі.
- Слайд 8. Впровадження багаторівневої ієрархії обчислень
- Слайд 9. принципи побудови оптичних (лазерних) ліній зв'язку та їх доцільність у супутникових мережах 5G.
- Слайд 10. Розрахунки основних параметрів оптичного зв'язку для геостаціонарних і низькоорбітальних супутників.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Капштик С.В., доцент кафедри ТК НН ІТС	01.11.2024	01.11.2024
2	Капштик С.В., доцент кафедри ТК НН ІТС	10.02.2025	10.02.2025
3	Капштик С.В., доцент кафедри ТК НН ІТС	01.04.2025	01.04.2025

7. Дата видачі завдання 25.10.2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення мети, завдань та об'єкта дослідження	01.10.2024 – 07.11.2024	виконано
2	Аналіз стану сучасних телекомунікаційних супутникових систем, нормативної бази, рекомендацій 3GPP	08.11.2024 – 20.11.2024	виконано
3	Вивчення архітектури 5G, особливостей NTN та стандартів Release 16–18	21.11.2024 – 05.12.2024	виконано
4	Дослідження можливостей впровадження лазерних міжсупутникових ліній зв'язку (OISL)	06.12.2024 – 19.12.2025	виконано
5	Побудова трирівневої архітектури супутникової IoT-системи з функціональним розподілом	06.01.2025 – 25.01.2025	виконано
6	Розрахунок параметрів оптичних ліній зв'язку (LEO–LEO, LEO–GEO) з урахуванням потужності, втрат, апертури	26.01.2025 – 20.02.2025	виконано
7	Обґрунтування використання onboard-обчислень на базі Intel® Xeon® у супутниках LEO та GEO	21.02.2025 – 04.03.2025	виконано
8	Розробка структурних схем, моделей архітектури, графічних ілюстрацій	05.03.2025 – 19.03.2025	виконано
9	Написання основного тексту дипломної роботи, оформлення списку джерел	20.03.2025 – 25.04.2025	виконано
10	Завершальне редагування, написання анотації, реферату, оформлення до захисту	26.04.2025 – 10.05.2025	виконано

Студент

Іван ШЕПЕТА

Керівник

Михайло ІЛЬЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота викладена на 95 сторінках, містить 43 рисунки, 4 таблиць.

У роботі досліджено архітектуру супутникових телекомунікаційних систем у контексті інтеграції з мобільними мережами 5G, зокрема в частині використання неназемних мереж (NTN). Розглянуто роль лазерних оптичних ліній зв'язку (OISL) між супутниками для підвищення швидкості та надійності передачі даних у мережах LEO, GEO та між ними.

Метою роботи є проєктування супутникової інфраструктури IoT на основі 5G-NR з використанням технологій SDN, NFV та оптичного міжсупутникового зв'язку. У роботі проведено розрахунки параметрів лазерних ліній зв'язку з урахуванням довжини хвилі, потужності передавача, діаметру апертури та втрат на трасі. Запропоновано трирівневу архітектуру з розподілом функцій між UE, LEO- і GEO-сегментами, з розміщенням кореневої мережі на GEO-рівні та впровадженням хмарних дата-центрів на базі процесорів Intel Xeon.

Результати можуть бути використані для розробки супутникових систем IoT з високою пропускнуою здатністю, скороченою затримкою та підвищеною енергоефективністю. Результати дослідження представлені у вигляді розрахункової моделі та можуть бути основою для подальшого впровадження в галузеві рішення. Запропонована методика має потенціал для публікації у фахових виданнях.

Ключові слова: 5G-NR, супутниковий зв'язок, NTN, LEO, GEO, IoT, SDN, NFV, лазерні канали, OISL, архітектура, маршрутизація, коренева мережа, базова станція, хмарні дата-центри, Intel Xeon, оптичний зв'язок, трирівнева модель, міжсупутниковий зв'язок.

ABSTRACT

The thesis is presented on 95 pages and contains 43 figures, 4 tables.

This work investigates the architecture of satellite telecommunication systems in the context of integration with 5G mobile networks, particularly focusing on the role of Non-Terrestrial Networks (NTN). Special attention is given to the use of optical inter-satellite links (OISL) to enhance data transmission speed and reliability across LEO and GEO segments and between them.

The objective of the thesis is to design an IoT satellite infrastructure based on 5G-NR using SDN, NFV, and optical satellite communication technologies. The study includes the calculation of optical link parameters, such as wavelength, laser transmitter power, aperture diameter, and link margin losses. A three-tier network architecture is proposed, distributing functionalities among the UE, LEO, and GEO segments, where the core network and cloud data centers powered by Intel Xeon processors are located at the GEO level.

The proposed architecture and calculations provide a basis for the development of high-capacity, low-latency, and energy-efficient satellite IoT systems. The methodology developed in this work can serve as a foundation for industrial implementations and scientific publications.

Keywords: 5G-NR, satellite communication, NTN, LEO, GEO, IoT, SDN, NFV, laser links, OISL, architecture, routing, core network, base station, cloud data centers, Intel Xeon, optical communication, three-tier model, inter-satellite communication.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	11
АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ 5G-NR ТА ЇЇ ВЗАЄМОДІЯ ІЗ СУПУТНИКОВИМИ СИСТЕМАМИ ЗВ’ЯЗКУ	11
1.1 Архітектура мережі 5G-NR.....	11
1.2 Використання NTN в архітектурі мережі 5G-NR.....	31
1.3 Використання сучасних супутникових телекомунікаційних систем в архітектурі 5G.....	34
1.4 Перспективи використання оптичних каналів в супутникових системах	41
Висновки	46
РОЗДІЛ 2	47
ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО МОДИФІКАЦІЇ СИСТЕМИ NTN В СТАНДАРТІ 5G-NR	47
2.1 Загальна архітектура системи.....	47
2.2 Геостаціонарна складова	52
2.3 Низькоорбітальна складова.....	62
2.4 Послуги інтернету речей за протоколом NB-IoT	66
Висновки	70
РОЗДІЛ 3	72
ОСОБЛИВОСТІ АРХІТЕКТУРИ МОДИФІКОВАННОЇ СИСТЕМИ NTN В СТАНДАРТІ 5G-NR.....	72
3.1 Використання оптичних лазерних ліній зв’язку в супутникових системах	72
3.2 Методика розрахунку лазерних оптичних ліній зв’язку між супутниками.	79
3.3 Використання оптичних ліній для побудови низькоорбітальної мережі передачі даних	85
3.4 Взаємдія гео та лео складових із використанням оптичних лазерних ліній зв’язку	88
Висновки	90
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

5G	П'яте покоління мобільного зв'язку
5G-NR	5G New Radio, новий радіоінтерфейс у мережах п'ятого покоління
API	Application Programming Interface, програмний інтерфейс додатків
ATP	Acquisition, Tracking and Pointing, система захоплення, стеження і наведення
CPU	Central Processing Unit, центральний процесор
DSP	Digital Signal Processor, цифровий сигнальний процесор
GEO	геостаціонарна орбіта (Geostationary Earth Orbit)
gNB	базова станція нового радіоінтерфейсу в 5G (next generation Node B)
IoT	Інтернет речей (Internet of Things)
ISL	Inter-Satellite Link, міжсупутникова лінія зв'язку
LEO	низька навколоземна орбіта (Low Earth Orbit)
LM	Link Margin, запас потужності зв'язку
MAC	Media Access Control, підрівень управління доступом до середовища
NFV	Network Function Virtualization, віртуалізація мережевих функцій
NTN	Non-Terrestrial Network, неназемна мережа
OISL	Optical Inter-Satellite Link, оптична міжсупутникова лінія зв'язку
QoS	Quality of Service, якість обслуговування
SDN	Software Defined Networking, програмно-визначена мережа

ВСТУП

Сучасний розвиток цифрових технологій, зокрема п'ятого покоління мобільного зв'язку (5G), висуває нові вимоги до архітектури телекомунікаційних систем, які повинні забезпечувати високу пропускну здатність, мінімальну затримку, надійність та глобальне покриття. Одним із ключових напрямів розвитку 5G є інтеграція неназемних мереж (NTN) у загальну архітектуру мережі, що дозволяє залучити супутникові системи до обслуговування користувачів у віддалених, важкодоступних та слабо покритих регіонах.

Попри активне розгортання наземної інфраструктури 5G, її можливості залишаються обмеженими через складність реалізації у морських, пустельних, арктичних та гірських зонах. У зв'язку з цим провідні телекомунікаційні компанії, зокрема SpaceX (Starlink), Telesat (Lightspeed), OneWeb, SES (O3b/mPOWER), активно впроваджують супутникові угруповання з підтримкою широкосмугового доступу, що доповнює можливості наземних мереж.

Особливу увагу в сучасних супутникових системах приділяють впровадженню оптичних лазерних ліній зв'язку між супутниками (OISL), які забезпечують високошвидкісну та енергоефективну передачу даних на відстані до кількох тисяч кілометрів без впливу атмосферних умов. Це відкриває перспективи для побудови гнучких, масштабованих та надійних супутникових мереж, інтегрованих у структуру 5G.

У цьому контексті виникає необхідність проектування архітектури супутникової системи для Інтернету речей (IoT) із підтримкою технологій 5G-NR, SDN, NFV та міжсупутникового оптичного зв'язку. Така система повинна поєднувати в собі функціональність радіодоступу на основі LEO-супутників, транспортну інфраструктуру GEO-сегменту та можливість розподіленої обробки даних із залученням хмарних дата-центрів.

У дипломній роботі обґрунтовано доцільність побудови трирівневої супутникової інфраструктури IoT на базі технологій 5G, в якій здійснено

функціональний перерозподіл елементів між LEO та GEO сегментами, реалізовано концепцію туманних і граничних обчислень та розроблено структурну модель лазерних міжсупутникових ліній зв'язку.

Результати цієї роботи можуть бути застосовані при розробці та модернізації супутникових телекомунікаційних систем нового покоління, зокрема в таких галузях як транспорт і логістика, агропромисловий сектор, енергетика, оборона, екологічний моніторинг та розумні міста. Запропонована архітектура також є актуальною для побудови глобальних IoT-систем у поєднанні з хмарними та периферійними обчисленнями.

РОЗДІЛ 1

АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ 5G-NR ТА ЇЇ ВЗАЄМОДІЯ ІЗ СУПУТНИКОВИМИ СИСТЕМАМИ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Архітектура мережі 5G-NR.

Історія 5G

Розвиток п'ятого покоління мобільного зв'язку — 5G — є одним із ключових етапів еволюції телекомунікаційних технологій, що безпосередньо впливає на соціально-економічний прогрес у всьому світі. У порівнянні з попередніми поколіннями, 5G відкриває нові горизонти для цифрової трансформації, забезпечуючи надзвичайно високу швидкість передачі даних, наднизьку затримку та можливість масового підключення пристроїв. Одна з основних причин важливості впровадження 5G — це потреба в задоволенні стрімкого зростання попиту на мобільні дані. Кількість пристроїв, що підключаються до мережі, постійно зростає, зокрема внаслідок розвитку Інтернету речей (IoT), розумних міст, автономного транспорту, телемедицини та інших інноваційних сфер. Технологія 5G здатна забезпечити необхідну пропускну здатність та надійність для підтримки такої кількості з'єднань, навіть у густонаселених міських районах. Крім того, 5G сприяє прискоренню автоматизації та цифровізації промисловості. Завдяки ультранадійному зв'язку з низькою затримкою (URLLC), можливе впровадження віддаленого керування виробничими процесами, використання роботизованих систем, а також створення розумних логістичних мереж. Це, у свою чергу, підвищує продуктивність, знижує витрати та стимулює інноваційний розвиток. Ще один важливий аспект — розвиток 5G сприяє підвищенню національної безпеки та конкурентоспроможності держав. Країни, які активно інвестують у розвиток 5G-інфраструктури, отримують стратегічну перевагу у сфері цифрової економіки, захисту даних, а також у глобальних ланцюгах постачання технологічної продукції.

Для ефективної розробки та гармонізації технічних стандартів мобільного зв'язку третього покоління (3G), а згодом — і наступних поколінь (4G, 5G), у 1998 році була створена міжнародна організація **3GPP (3rd Generation Partnership Project)**. 3GPP об'єднує провідні регуляторні, наукові та галузеві організації у сфері телекомунікацій з усього світу. Її метою є розробка загальних технічних специфікацій та стандартів для мобільних систем, які базуються на мережевій архітектурі GSM та її наступниках. У межах 3GPP формуються так звані **Релізи** — пакети стандартів, які описують технічні вимоги до мереж конкретного покоління (наприклад, Реліз 15 — перший для 5G).

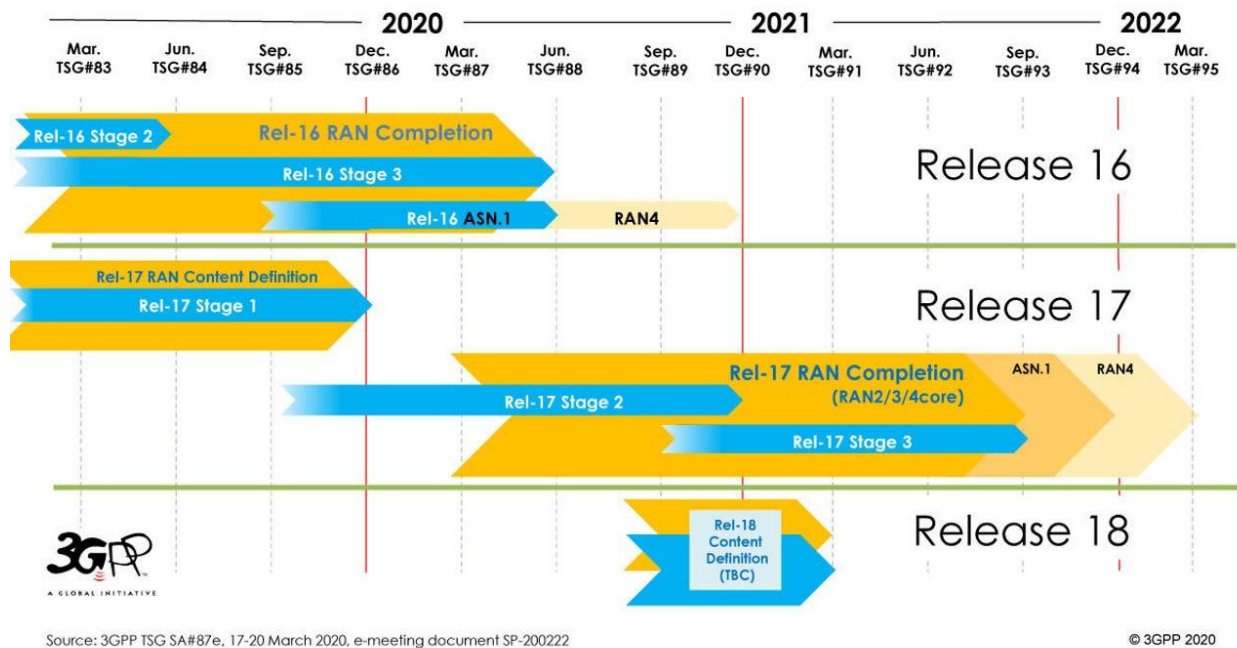


Рис.1.1 Графік розробки та затвердження технічних специфікацій стандартів мобільного зв'язку 5G згідно з релізами 3GPP[5]

Стандартизація мереж п'ятого покоління (5G) є ключовим етапом розвитку телекомунікаційних систем, що забезпечує уніфікацію технічних рішень, сумісність обладнання та глобальне впровадження технологій. У контексті інтеграції 5G із супутниковими телекомунікаційними системами

стандартизація відіграє вирішальну роль у забезпеченні ефективної взаємодії наземних і космічних компонентів мережі[4].

Цей графік (рис 1.1) демонструє часову шкалу стандартів мобільного зв'язку 5G, які розробляє організація **3GPP** у вигляді так званих релізів (Release). Кожен реліз — це пакет специфікацій, що містить технічні вимоги до обладнання та функціоналу мережі.

Release 16 — завершення базової архітектури 5G. Release 16, завершений у 2021 році, є другим офіційним релізом для мережі 5G. Він значно розширює функціональність, визначену в попередньому Release 15. Основні доповнення стосуються:

- Підтримки **ультранадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC)**, необхідного для промислових і критичних застосувань;
- Оптимізації енергоефективності мережі;
- Впровадження нових функцій для **автомобільного зв'язку (V2X)**;
- Розвитку концепції **віртуалізації радіодоступу (Virtualized RAN)**;
- Підтримки **приватних мобільних мереж та індустріального Інтернету речей (Industrial IoT)**.

Release 17 — подальше розширення функцій 5G. **Release 17** розпочався з етапу визначення змісту у 2020 році та завершився у 2022 році. Його мета — розширити можливості системи 5G та забезпечити підтримку нових типів застосувань, зокрема:

- Підтримка пристроїв з наднизьким енергоспоживанням;
- Розширення спектральної ефективності;
- Підтримка зв'язку у **неліцензованих діапазонах частот**;
- Покращення можливостей для **масового підключення пристроїв IoT**;
- Розширення стандарту для **супутникових систем зв'язку**, що є особливо актуальним у контексті інтеграції 5G в супутникові телекомунікаційні системи;

- Посилення механізмів **мережевої сегментації (network slicing)** для забезпечення гнучкого обслуговування різних типів трафіку.

Release 18 — перехід до 5G Advanced, що наразі перебуває в процесі розробки, є першим релізом нової фази розвитку стандарту — **5G Advanced**. У межах цього етапу передбачається подальше вдосконалення функціоналу, зокрема:

- Впровадження **інтелектуальних мереж** із підтримкою штучного інтелекту та машинного навчання;
- Підвищення продуктивності мережі;
- Підтримка **додатків розширеної та віртуальної реальності (XR/AR/VR)**;
- Удосконалення управління ресурсами та мережевої оркестрації;
- Поглиблення інтеграції з супутниковими платформами.

Цей реліз матиме вирішальне значення для забезпечення гнучкості та масштабованості 5G-мереж у майбутньому.

Архітектура мереж п'ятого покоління (5G) створена з урахуванням необхідності забезпечення високошвидкісного та надійного з'єднання, а також підтримки широкого спектру додатків і сервісів. У її основу покладено сучасні підходи, зокрема **віртуалізацію мережевих функцій (NFV)**, **програмно-визначені мережі (SDN)** та **сегментацію мережі (network slicing)**, що дозволяє ефективно розгортати та адаптувати мережу під конкретні потреби[2]. Серцем архітектури є **сервіс-орієнтована коренева мережа 5G (5G Core, 5GC)**, яка забезпечує модульність, масштабованість і гнучкість при наданні послуг. Такий підхід дозволяє обслуговувати різноманітні сервіси з різними вимогами до затримки, швидкості та надійності. Завдяки відкритим інтерфейсам і модульній побудові, оператори можуть динамічно керувати функціональністю мережі — виявляти, активувати чи оновлювати окремі сервіси без порушення загальної продуктивності системи. Таким чином,

архітектура 5G надає широкі можливості для створення інтелектуальних, адаптивних і високопродуктивних телекомунікаційних рішень, відповідаючи вимогам сучасного цифрового суспільства.

5G NR (New Radio) — це новий глобальний стандарт для радіоінтерфейсу мобільного зв'язку п'ятого покоління, який розроблено організацією 3GPP. Він є основою технології 5G і забезпечує значно кращі характеристики порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж, такими як 4G LTE. Основна мета 5G NR — підтримка нових сервісів, що вимагають високих швидкостей передачі даних, наднизької затримки, високої надійності зв'язку та масового підключення пристроїв.

Однією з ключових особливостей 5G NR є використання широкого спектру частот. Технологія працює як у діапазоні Sub-6 GHz (FR1), так і в міліметровому діапазоні понад 24 ГГц (FR2). Завдяки цьому поєднується широке географічне покриття з можливістю забезпечення надвисоких швидкостей. Важливою інновацією є гнучка нумерологія — підтримка різних інтервалів символів (15, 30, 60, 120, 240 кГц), що дозволяє оптимізувати роботу мережі для різних сценаріїв — від мобільного інтернету до промислового Інтернету речей.

Ще одна суттєва перевага 5G NR — використання масивних багатоантенних систем (massive MIMO) і технології формування променя (beamforming). Це дозволяє значно збільшити пропускну здатність мережі, підвищити якість сигналу та ефективніше використовувати спектр. Завдяки цьому можна одночасно обслуговувати велику кількість користувачів навіть у щільно населених районах.

5G NR підтримує три основні сценарії використання: покращений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB), наднадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC) і масові комунікації між пристроями (mMTC). eMBB орієнтований на високошвидкісний доступ до Інтернету, включно з потоковим відео у високій якості та віртуальною реальністю. URLLC забезпечує наднадійний і надшвидкий зв'язок, необхідний для таких застосувань, як

дистанційне керування, автономні автомобілі та автоматизоване виробництво. mMTC дозволяє підключати до мережі величезну кількість пристроїв, що є основою для розвитку Інтернету речей.

Архітектура 5G включає базові станції gNodeB і нове ядро мережі 5G Core (5GC), яке забезпечує більшу гнучкість, масштабованість і підтримку новітніх сервісів. Вона може працювати як у автономному режимі (Standalone), коли використовується тільки 5G, так і в неавтономному режимі (Non-Standalone), коли 5G доповнює існуючі мережі LTE. Це спрощує впровадження технології та дозволяє операторам поступово переходити до повноцінного 5G.

Технологія 5G NR відкриває нові можливості для розвитку різноманітних галузей — від телекомунікацій і транспорту до медицини й промисловості. Висока швидкість, низька затримка та підтримка великої кількості пристроїв забезпечують основу для створення нових сервісів і цифрової трансформації економіки.

Структура мережі 5G та її особливості

Коренева мережа

Коренева (базова) мережа є фундаментальним елементом будь-якої сучасної телекомунікаційної системи. Саме вона забезпечує обробку, маршрутизацію та управління трафіком між користувачами і зовнішніми мережами, створюючи основу для надання широкого спектру послуг зв'язку. Без чітко побудованої кореневої мережі неможливо уявити безперебійну роботу мобільного інтернету, голосових викликів, обміну повідомленнями чи взаємодії пристроїв Інтернету речей. У класичних мобільних мережах попередніх поколінь (2G, 3G, 4G) коренева мережа відповідала за аутентифікацію користувачів, встановлення з'єднань, облік використаних послуг та передачу даних. Однак з появою технології 5G її роль значно розширилася та ускладнилася. Новітня архітектура 5G Core (5GC) запровадила сервіс-орієнтований підхід, що дозволяє забезпечувати гнучкість,

масштабованість та ефективність у керуванні ресурсами мережі. Відмінною рисою кореневої мережі п'ятого покоління є використання принципів віртуалізації мережевих функцій (NFV) та програмно-визначених мереж (SDN). Це дозволяє операторам адаптувати мережу під конкретні потреби, створювати окремі віртуальні підмережі для різних застосувань (Network Slicing), а також швидко впроваджувати нові сервіси без необхідності суттєвих змін у фізичній інфраструктурі. Крім того, мережа 5G Core підтримує роботу з наземними і супутниковими каналами зв'язку, що відкриває нові можливості для глобального покриття навіть у важкодоступних регіонах. Таким чином, коренева мережа є не просто сукупністю технічних засобів для передачі даних. Це складна система, що інтегрує різноманітні сервіси, забезпечує безпеку, стабільність і якість з'єднання, адаптується до мінливих умов ринку і технологічного розвитку. У мережах 5G її значення стає ще вагомішим, адже саме від гнучкості та інтелектуальності кореневої інфраструктури залежить ефективність надання інноваційних послуг наступних поколінь.

До складу кореневої мережі 5G-NR (5G New Radio) входять такі програмні модулі(рис 1.2):

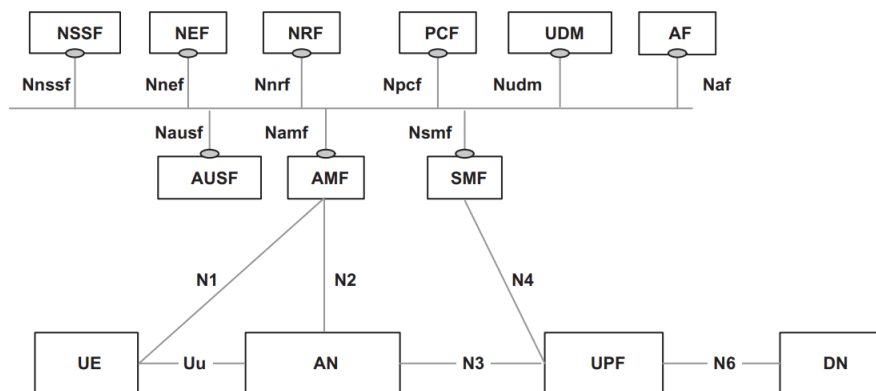


Рис.1.2 Архітектура ядра мережі 5G (5G Core Network Architecture)

- NSSF - Network slice selection function - Функція вибору мережевого сегмента.

- NEF - Network exposure function - Функція відкритості мережі або Функція експозиції мережі.
- NRF NF - repository function - функція сховища
- PCF - Policy control function - Функція управління політикою
- UDM - Unified data management - уніфіковане управління даними
- AF - application functions - функції додатків
- AUSF - Authentication server function - функція сервера аутентифікації
- AMF - The access and mobility management function - функція управління доступом і мобільністю
- SMF - session management function - функція управління сесією
- UE - user equipment - обладнання користувача
- AN - access network - мережа доступу
- UPF - User-plane function - функція користувацької площини
- DN - Data network - мережа даних

У мережі 5G взаємодія між мережевими функціями реалізується двома основними способами:

1. **Сервісно-орієнтована взаємодія**, коли певні функції, наприклад AMF, надають свої сервіси іншим авторизованим мережевим функціям.
2. **Інтерфейсна взаємодія**, яка передбачає зв'язок типу точка-точка між функціями через конкретні інтерфейси, наприклад N11 між AMF і SMF.

Ці підходи базуються на можливостях SDN (програмно-визначених мереж), які дозволяють ефективно керувати мережею. Додатково використовується модульний підхід, який сприяє створенню окремих віртуальних сегментів (network slices) для різних типів послуг.

Концепція архітектури 5G ґрунтується на ключових можливостях, які надає впровадження програмно-визначених мереж (SDN). Важливою її складовою є застосування модульного підходу до побудови функціональних компонентів, що дає змогу гнучко створювати окремі сегменти мережі, відомі

як Network Slicing. З урахуванням цих вимог, у межах проєкту 3GPP була розроблена так звана плоска архітектура, в якій функції керування (control plane) відокремлені від функцій передачі даних (user plane). Такий підхід дозволяє масштабувати обидві площини незалежно одна від одної.

Ще одним концептуальним рішенням стало мінімізація залежності між мережею доступу (AN) та ядром мережі, що досягається шляхом створення незалежної базової мережі з уніфікованим інтерфейсом між мережею доступу та ядром. Об'єднання можливостей SDN і віртуалізації мережевих функцій (NFV) забезпечує динамічне масштабування та впровадження мережевих функцій (NF) відповідно до поточних потреб. Це критично важливо для побудови ефективного ядра 5G Core (5GC).

Коренева мережа 5GC повинна підтримувати інтеграцію з різними типами мереж доступу, наприклад, фіксованими та мобільними, у межах одного сегмента. Кожен сегмент може містити функції керування, що взаємодіють з одним або кількома елементами UPF (User Plane Function), а також пари функцій площини керування та користувача, які відповідають за певні категорії послуг — зокрема мультимедійні сервіси. Кінцевий пристрій (UE) може бути підключений до кількох сегментів одночасно, максимум — до восьми. При цьому функції керування, що забезпечують координацію таких підключень, повинні бути спільними для всіх активних сегментів. З метою підтримки різних вимог до сервісів і передачі даних, мережеві функції 5GC (NF) були максимально спрощені та переведені на програмно-орієнтовану модель, що дозволяє їх легко адаптувати. Сервісно-орієнтована архітектура 5G розроблена для того, щоб гнучко та ефективно задовольняти потреби нових додатків і послуг. Завдяки SDN і NFV, які функціонують поверх фізичної інфраструктури, стає можливим централізоване управління мережею при одночасній децентралізації надання сервісів. Це формує основу для переходу до хмарної архітектури базової мережі (Cloud-native 5GC) та віртуалізованих мереж доступу (vRAN).

Базова станція (мережа радіодоступу)

В системі 5G ведений термін віртуальна базова станція gNB (gNodeB). gNB є ключовим елементом радіодоступу в мережах п'ятого покоління. Вона забезпечує безпосереднє з'єднання з кінцевими користувачами, такими як смартфони, IoT-пристрої та інші пристрої, що підтримують 5G. В основному, gNB відповідає за управління радіоінтерфейсом та передачу даних між користувачами і ядром мережі.

Архітектура базової станції 5G є більш модульною та розподіленою в порівнянні з попередніми поколіннями, що дозволяє забезпечити більшу гнучкість і масштабованість. Вона складається з двох основних компонентів: **gNB-CU** (Central Unit — центральний блок) і **gNB-DU** (Distributed Unit — розподілений блок). **gNB-CU** відповідає за управлінські функції, такі як управління мобільністю, сесіями та ресурсами, а **gNB-DU** займається обробкою сигналів на радіоінтерфейсі, таким як модуляція, демодуляція та інші функції фізичного рівня.

У розподіленій архітектурі базової станції гнучко використовуються зв'язки через інтерфейс **F1** між gNB-CU і gNB-DU, що дозволяє здійснювати дистрибуцію функцій для більш ефективного використання ресурсів. Це дозволяє розміщувати ці компоненти в різних географічних точках, зокрема в хмарних сервісах або на периферії мережі для зменшення затримок і покращення якості обслуговування користувачів.

Базові станції 5G мають значні вдосконалення в порівнянні з попередніми поколіннями, особливо в підтримці **широких частотних діапазонів** та **великої кількості підключених пристроїв**. Вони підтримують технології, як **MIMO (Multiple Input Multiple Output)**, що дозволяє передавати дані паралельно через кілька антен, забезпечуючи більш високу пропускну здатність і покриття.

Основною перевагою базових станцій 5G є здатність забезпечувати **низькі затримки, високу швидкість передачі даних і масштабованість для нових сервісів**, таких як Інтернет речей (IoT), автономні транспортні засоби,

розширена реальність (AR) та інші додатки, що потребують високої пропускної здатності та миттєвої реакції мережі.

Мережа радіодоступу

Загальна архітектура нового стандарту 5G-NR включає елементи радіомережі нового покоління (NG-RAN) і ядра 5GC, а також відповідні інтерфейси для взаємодії між ними. Складовими частинами NG-RAN є базові станції gNB, які підключаються до ядра через інтерфейс NG. У свою чергу, цей інтерфейс розподіляється на N2 (керування) та N3 (передача даних). Крім того, базові станції можуть взаємодіяти між собою за допомогою інтерфейсу Xn. Функціональність gNB включає виконання операцій шифрування та захисту заголовків IP, вибір відповідного AMF під час приєднання терміналу UE, маршрутизацію як даних користувача до UPF, так і сигналів керування до AMF. Також gNB відповідає за налаштування з'єднань, передачу службових повідомлень, управління сесіями, контроль якості обслуговування (QoS), підтримку мережевого розділення (slicing), спільний доступ до мережі та подвійне з'єднання (Dual Connectivity, DC).

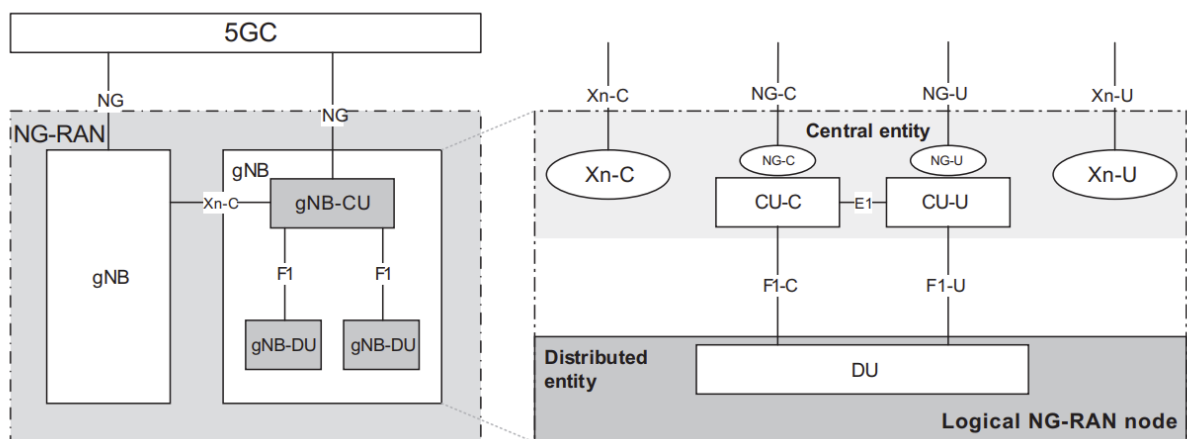


Рис.1.3 архітектура вузла радіодоступу NG-RAN у мережі 5G

Однією з ключових особливостей архітектури мережі доступу NG-RAN є поділ функціональності базової станції gNB на два основних модулі — централізований блок управління (gNB-CU) та розподілений блок (gNB-DU) (див. рис. 1.3) . Зв'язок між цими модулями здійснюється через логічний

інтерфейс F1. Варто зазначити, що за типовим сценарієм один gNB-DU взаємодіє лише з одним gNB-CU, хоча у деяких варіантах впровадження можливе підключення одного gNB-DU до кількох gNB-CU.

У межах архітектури радіодоступу нового покоління логічні інтерфейси NG, Xn та F1 відіграють важливу роль у структурній взаємодії між компонентами мережі. Як показано на рисунку 1.3, кожен вузол NG-RAN реалізується у вигляді gNB, тобто базової станції стандарту NR (New Radio), яка забезпечує завершення протоколів як площини керування, так і площини користувача для з'єднання з кінцевим пристроєм (UE).

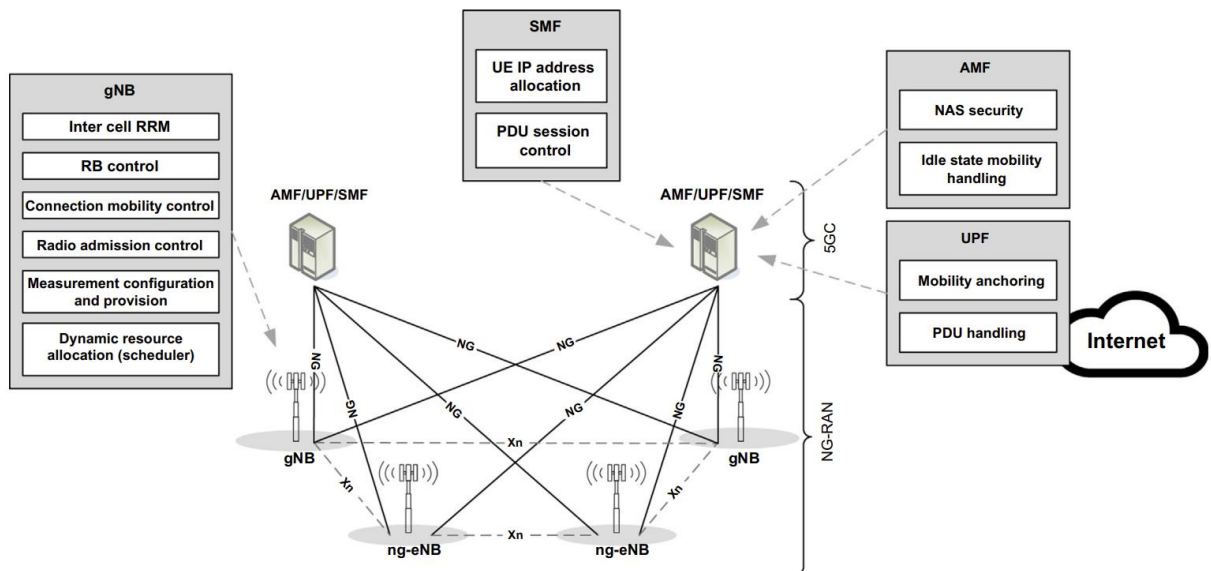


Рис. 1.4. Взаємодія базових станцій gNB із складу NG-RAN із двома AMF

В архітектурі 5G-NR забезпечується можливість взаємодії вузлів NG-RAN із кількома вузлами AMF (див. рис. 1.4). Для цього у складі NG-RAN реалізується функція вибору вузла NAS, яка визначає відповідність AMF та користувацького пристрою (UE) на основі тимчасового ідентифікатора, наданого AMF. У разі, якщо цей ідентифікатор відсутній або втратив чинність, NG-RAN використовує інформацію про мережеву сегментацію для вибору AMF. Завдяки цьому забезпечується коректна маршрутизація трафіку через інтерфейс NG. На відміну від LTE, де сесії PDU синхронізуються між RAN та

ядром мережі, архітектура 5GC відокремлює ці стани, дозволяючи створювати PDU-сесії ще до того, як UE їх запитує. Такий підхід забезпечує гнучке, динамічне й політично контрольоване підключення користувачів до певних сегментів мережі. SMF (Session Management Function) відповідає за вибір IP-якорної точки, управління адресацією, моніторинг станів користувацького плану в UPF, а також за керування створенням, зміною та завершенням PDU-сесій. SMF також взаємодіє з RAN для передачі інформації про сесії до відповідних мереж передачі даних. У площині користувача трафік PDU від UE інкапсулюється у тунелі, що передаються до RAN за допомогою протоколів 5G. Для RAN, заголовкова інформація п'ятирівневої структури PDU (джерело/призначення IP, порти, протокол тощо) використовується для маршрутизації потоку через відповідний тунель до UPF. У системі NG-RAN, вузол AMF виконує функції, аналогічні до MME в EPC: він управляє сигналізацією NAS, відповідає за безпеку як на рівні NAS, так і на рівні AS, а також виконує міжмережеву сигналізацію для підтримки мобільності між мережами доступу стандарту 3GPP.

Віртуалізація мережі

Концепція NFV (Network Functions Virtualization) є альтернативним підходом до розгортання, управління та масштабування мережевих сервісів. Вона доповнює SDN, хоча обидві технології можуть працювати незалежно. SDN забезпечує централізоване управління, розділяючи площини керування і пересилання даних, тоді як NFV орієнтується на віртуалізацію мережевих функцій з використанням стандартного серверного обладнання. NFV змінює спосіб розгортання мережевої інфраструктури, дозволяючи замість спеціалізованих пристроїв використовувати програмно-визначені мережеві функції на базі стандартних серверів, комутаторів і систем зберігання, розміщених у центрах обробки даних. Завдяки цьому мережеві функції можна легко переміщати або дублювати по мережі без фізичного втручання.

Технологія NFV побудована на принципах хмарних обчислень, використовуючи віртуалізацію апаратного забезпечення через гіпервізори, а

також віртуальні комутатори (напр., vSwitch) для обробки трафіку між віртуальними машинами та фізичними інтерфейсами. Застосування багатоядерних процесорів і спеціалізованих мережевих карт дозволяє забезпечити високу пропускну здатність і ефективну обробку пакетів. Архітектура NFV включає основні компоненти: віртуалізовані мережеві функції (VNF), інфраструктуру NFV (NFVI) та систему управління та оркестрації NFV-MANO. Інфраструктура NFVI об'єднує обчислювальні ресурси, засоби зберігання та мережеві компоненти в окремих точках присутності (NFVI-PoP), де розгортаються VNF. З'єднання між цими ресурсами забезпечується спеціалізованими мережами комутації та маршрутизації, що дозволяє зовнішній доступ до віртуалізованих функцій. NFVI утворює віртуалізований шар між фізичною інфраструктурою та програмним забезпеченням, абстрагуючи апаратні ресурси для подальшого розподілу між VNF. Це дозволяє створювати розподілені, масштабовані та географічно незалежні мережеві системи, які є важливими для реалізації сучасних телекомунікаційних сервісів.

NFV складається з кількох ключових компонентів: VNF (віртуалізовані мережеві функції), NFVI (інфраструктура віртуалізації мережевих функцій) і NFV-MANO (система управління та оркестрації). VNF — це програмні аналоги традиційних апаратних функцій, які запускаються в середовищі, створеному NFVI. Саме NFVI забезпечує ресурси обчислення, зберігання та мережеві можливості, надаючи віртуальні машини (VM) або контейнери для запуску VNF. У структурі NFVI виділяють фізичну інфраструктуру, віртуалізаційний шар і віртуальну інфраструктуру. VIM (Virtual Infrastructure Manager) є ключовим елементом, що керує ресурсами NFVI. Він слідкує за розподілом і моніторингом ресурсів, обробляє логування, оповіщення, політики безпеки та підтримує роботу віртуалізованої інфраструктури. OpenStack є типовим прикладом VIM, який широко використовується у впровадженні NFV.

NFV-MANO — це архітектура, запропонована ETSI, що включає три основні функціональні блоки: VIM, VNF Manager (керує життєвим циклом VNF) і NFVO (Network Function Virtualization Orchestrator — відповідає за створення, управління і масштабування сервісів). Ця система дозволяє стандартизувати керування віртуальними мережами, забезпечуючи взаємодію між різними виробниками (multivendor environment). Особливу увагу приділено логічним зв'язкам між компонентами — ці зв'язки утворюють так званий "граф пересилання" (forwarding graph), що описує, як мережеві функції взаємодіють одна з одною. Вони можуть бути односторонніми, двосторонніми або груповими (multicast/broadcast), що дозволяє будувати гнучкі, масштабовані мережі без прив'язки до географії. Важливим аспектом є те, що NFV дозволяє розгортати мережеві сервіси швидко, ефективно та з меншими витратами, використовуючи звичайне, комерційне обладнання замість спеціалізованих апаратних рішень. Це дозволяє постачальникам телеком-послуг швидше реагувати на потреби ринку та забезпечувати нові сервіси. Отже, архітектура NFV пропонує перехід від традиційних жорстко заданих мереж до програмно-керованих, адаптивних рішень, де віртуалізація, стандартизація і автоматизація стають основою ефективного управління сучасними телекомунікаційними інфраструктурами. Один із фундаментальних принципів NFV — відокремлення програмного забезпечення від апаратного забезпечення. Це означає, що традиційні функції, які раніше потребували спеціалізованих пристроїв (наприклад, маршрутизаторів, брандмауерів, DPI-систем), тепер можуть бути реалізовані як програмні модулі, що працюють у віртуальному середовищі. Такий підхід не тільки знижує витрати на обладнання, а й значно пришвидшує впровадження нових послуг, оскільки більше немає необхідності в заміні чи оновленні фізичного устаткування.

NFVI, як база для виконання VNF, забезпечує всю інфраструктуру, необхідну для запуску віртуалізованих функцій. Вона охоплює фізичні сервери, системи зберігання даних, мережеві комутатори і маршрутизатори, а

також програмні засоби віртуалізації — гіпервізори, контейнерні платформи тощо. Це дозволяє створити незалежне середовище, де VNFs можна масштабувати відповідно до навантаження або автоматично переміщати між вузлами для забезпечення надійності та гнучкості. NFVO (Network Function Virtualization Orchestrator) виступає як "мозок" системи. Він керує всім життєвим циклом мережевих сервісів — від розгортання до видалення, слідкує за ресурсами, оркеструє взаємодію між компонентами і оптимізує використання інфраструктури. NFVO забезпечує централізовану логіку для обслуговування складних сервісів, включаючи балансування навантаження, масштабування функцій, резервування та відновлення після збоїв. Не менш важливою частиною архітектури є VNF Manager. Він відповідає за окремі віртуальні функції — їх створення, оновлення, моніторинг, масштабування й завершення роботи. Це дозволяє управляти VNF гнучко і адаптивно до змін у навантаженні мережі або умовах експлуатації. Крім технічної сторони, NFV має велике значення для бізнесу. Вона дозволяє телеком-операторам швидко реагувати на потреби ринку, скорочувати час виходу на ринок нових послуг, знижувати витрати на підтримку інфраструктури та забезпечувати високу якість сервісів. Завдяки відкритим стандартам ETSI NFV, зростає сумісність компонентів, що відкриває можливість роботи в мультивендорному середовищі та знижує залежність від одного постачальника. На завершення, можна сказати, що NFV — це не просто технологія, а стратегічний підхід до побудови гнучкої, керованої, масштабованої і відкритої мережевої інфраструктури, що відповідає викликам цифрової епохи. Її впровадження є ключовим кроком у трансформації традиційних мереж у сучасні, програмно-керовані платформи майбутнього.

На рис.1.5 представлено архітектуру NFV (Network Functions Virtualization), яка ілюструє основні функціональні блоки та взаємозв'язки між ними. Нижче — опис кожного модуля на схемі:

OSS/BSS (Operations/Business Support Systems)

Це традиційні системи управління операційною діяльністю оператора зв'язку. Вони взаємодіють з NFV через інтерфейс Os-Ma-Nfvo, надаючи інформацію про бізнес-логіку, білінг, управління послугами, замовлення тощо.

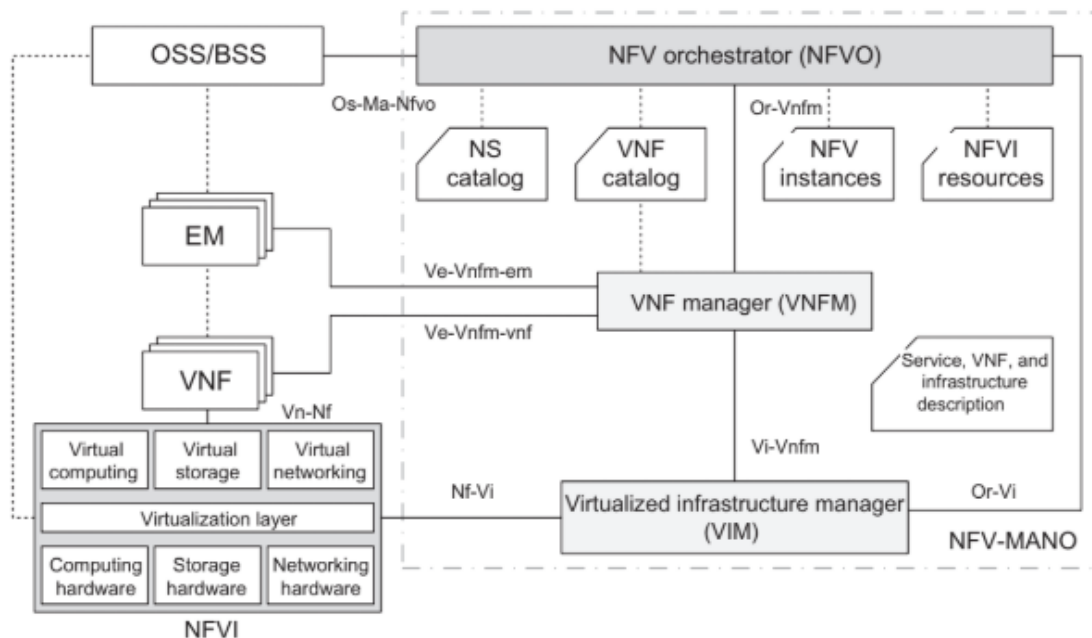


Рис.1.5. архітектура NFV (Network Functions Virtualization)[3]

NFV Orchestrator (NFVO) - Це головний координатор у рамках NFV-MANO. Його завдання: Оркестрація мережевих сервісів (NS), Управління ресурсами NFVI, Робота з каталогами сервісів та VNF (NS catalog, VNF catalog), Керування життєвим циклом сервісів через взаємодію з VNFM (через інтерфейс Or-Vnfm), Взаємодія з VIM безпосередньо через Or-Vi, якщо потрібно

Ці чотири компоненти — це логічні частини NFVO: NS Catalog — каталог шаблонів мережевих сервісів, VNF Catalog — шаблони VNF, що можуть бути інстанційовані, NFV Instances — поточні інстанції активних сервісів/VNF, NFVI Resources — фізичні або віртуальні ресурси (обчислення, зберігання, мережі), якими керує VIM

VNF Manager (VNFM)

Цей блок відповідає за життєвий цикл VNF: Інсталяція, оновлення, масштабування, видалення, Взаємодія з VIM для запиту ресурсів (Vi-Vnfm), Взаємодія з NFVO (Or-Vnfm) для отримання інструкцій, Зв'язок з ЕМ та VNF через Ve-Vnfm-em і Ve-Vnfm-vnf

ЕМ (Element Management) Управляє окремими елементами (VNF) з точки зору моніторингу, конфігурації, збору логів тощо. Має інтерфейс Ve-Vnfm-em для взаємодії з VNFM і безпосередньо підключений до VNF.

VNF (Virtual Network Function) Віртуалізовані мережеві функції, які замінюють традиційні апаратні елементи (наприклад, маршрутизатори, фаєрволи). Працюють у середовищі NFVI. Взаємодіють із VNFM через Ve-Vnfm-vnf та з інфраструктурою через Vn-Nf.

NFVI (Network Functions Virtualization Infrastructure) Інфраструктура для розгортання VNF. Складається з трьох основних частин: Фізичний рівень: апаратні ресурси — обчислювальні, зберігаючі, мережеві, Віртуалізаційний шар: гіпервізори, контейнерні системи, які абстрагують ресурси, Віртуальна інфраструктура: віртуальні обчислювальні, зберігаючі та мережеві ресурси, які використовуються VNF

VIM (Virtualized Infrastructure Manager) Це модуль, який керує ресурсами NFVI: Розподіл віртуальних ресурсів (обчислення, мережа, сховище), Моніторинг продуктивності, безпека, інвентаризація, Комунікація з VNFM через інтерфейс Vi-Vnfm, Взаємодія з NFVO через інтерфейс Or-Vi, Інтерфейс Nf-Vi для керування фізичними і віртуальними ресурсами

Фізичний рівень (нижній блок) Computing hardware — фізичні сервери, процесори та оперативна пам'ять, які виконують обчислення. Storage hardware — фізичні пристрої зберігання (жорсткі диски, SSD, масиви зберігання). Networking hardware — комутатори, маршрутизатори, адаптери мережевого інтерфейсу, що забезпечують з'єднання.

Шар віртуалізації (Virtualization layer) - Цей шар відповідає за абстрагування фізичних ресурсів: Створює віртуальні версії апаратних компонентів. Використовує гіпервізори або контейнерні системи, щоб

забезпечити незалежність між апаратним забезпеченням і програмним забезпеченням (VNF). Дає змогу кільком віртуальним машинам (або контейнерам) працювати на одному фізичному сервері.

Віртуалізовані ресурси (верхній блок). Virtual computing — віртуальні машини чи контейнери, які виконують обчислювальні завдання. Virtual storage — віртуальні накопичувачі, які емулюють жорсткі диски чи SSD. Virtual networking — віртуальні комутатори, маршрутизатори та інші мережеві компоненти, які створюють програмно керовану мережу.

Програмно визначена мережа

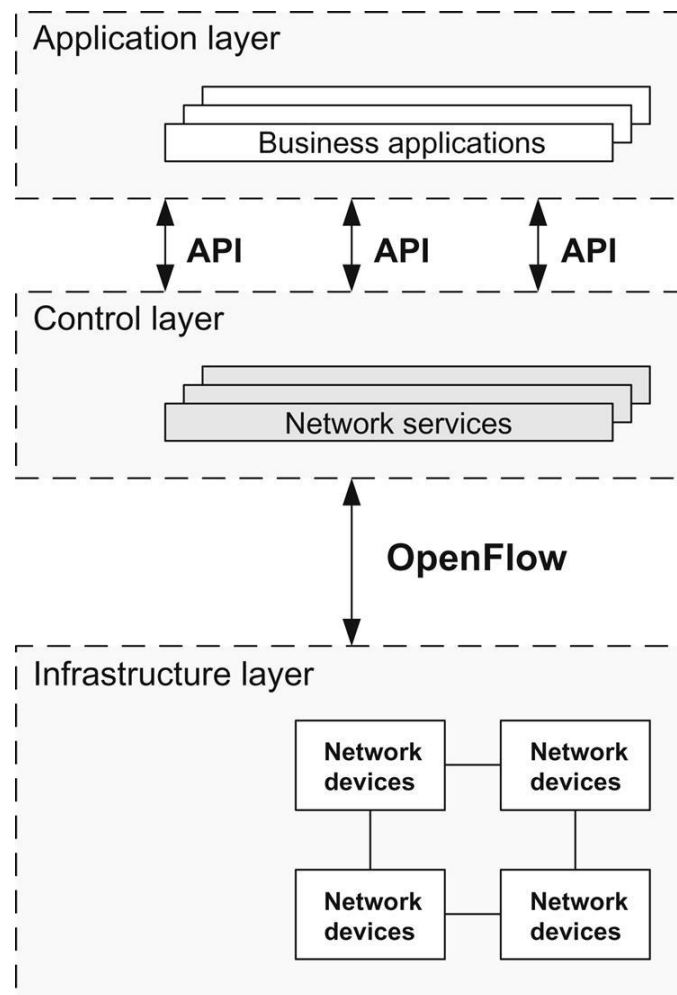


Рис.1.6. Ілюстрація концепції SDN[3]

SDN (Software-Defined Networking) є передовою архітектурою, яка вирізняється гнучкістю, високим рівнем керованості, економічною

ефективністю та адаптивністю, що робить її ідеальним рішенням для сучасних додатків із високими вимогами до пропускну здатності та динаміки. Основна ідея SDN полягає в поділі функцій управління та передачі даних у мережі, що дозволяє централізовано керувати мережею, абстрагуючи базову інфраструктуру для програм та сервісів. Однією з ключових технологій SDN є протокол OpenFlow — перше стандартне рішення, яке забезпечує взаємодію між елементами управління та пересилання даних. Його розробка була розпочата у 2008 році, і він став основою для побудови SDN-систем. Open Networking Foundation (ONF) відповідає за підтримку відкритих специфікацій OpenFlow. Водночас існують й інші відкриті стандарти та ініціативи, що беруть участь у розвитку SDN, тож OpenFlow не є єдиним можливим протоколом у цій сфері. SDN доповнює концепцію NFV (Network Functions Virtualization) у сфері мережевого управління. Хоча обидві технології мають спільну мету — ефективніше керування мережею — вони використовують різні підходи. SDN базується на централізованому принципі управління, де SDN-контролер виконує роль "мозку" мережі. Як показано на рис. 1.6, контролер зв'язується з комутаторами та маршрутизаторами через південний API, а з прикладними програмами — через північний API.

У типовій SDN-архітектурі, що використовується для мереж 5G, виділяють три основні рівні: інфраструктурний рівень (площина користувача), рівень управління (площина контролю) та рівень додатків (площина сервісів).

- **Інфраструктурний рівень** охоплює фізичні й віртуальні комутатори, маршрутизатори, бездротові точки доступу, які формують площину пересилання даних. Ці пристрої збирають інформацію про стан мережі, тимчасово зберігають її, передають контролерам і керують пересиланням трафіку відповідно до встановлених правил.
- **Рівень керування** забезпечує комунікацію між рівнем додатків і інфраструктурою. Контролер SDN використовує три основні типи інтерфейсів: південний — для управління пристроями пересилання,

північний — для інтеграції з додатками, та східно-західний — для взаємодії між кількома контролерами. Його функції охоплюють аналіз стану мережі, імпорт правил пересилання та управління доступом до сервісів.

- **Рівень додатків** зосереджений на задоволенні потреб користувачів. Він містить різноманітні бізнес-додатки, які використовують ресурси мережі, зокрема для візуалізації мережевої інфраструктури, забезпечення безпеки, динамічного управління доступом, підтримки мобільності, хмарних обчислень та балансування навантаження. Програми SDN можуть взаємодіяти з рівнем передачі даних через контролер, отримуючи доступ до пристроїв комутації.

Таким чином, SDN забезпечує централізовану та адаптивну модель управління мережею, що ідеально поєднується з вимогами сучасних телекомунікаційних систем, особливо в умовах розгортання мереж 5G.

1.2 Використання NTN в архітектурі мережі 5G-NR.

Останніми роками у сфері комунікацій активно розвивається тенденція до об'єднання різних технологій, які раніше вважалися окремими. Одним із ключових напрямів стала інтеграція супутникового та наземного зв'язку, ініційована у межах 17-го випуску специфікацій 3GPP, що стартував у середині 2022 року. Цей стандарт передбачає використання мобільного супутникового зв'язку (MSS) для безпосереднього з'єднання користувацького обладнання (UE), сумісного з 3GPP, із супутниками.

Основна мета — забезпечити конвергенцію між наземними й супутниковими мережами, що дозволяє повторно використовувати існуючі сигнальні протоколи, архітектуру 5G Core (CN) та звичайні форм-фактори смартфонів. У таких об'єднаних мережах супутники можуть передавати сигнал через наземні базові станції (gNodeB), використовуючи прозоре або регенеративне корисне навантаження — коли частина або вся

функціональність базової станції реалізується безпосередньо на борту супутника. Це відкриває нові горизонти співпраці між супутниковими та телеком-операторами, дозволяючи розширити зони покриття та підвищити рівень доступності послуг у віддалених регіонах. Галузь швидко оцінила потенціал використання супутників для надання послуг 5G в рамках небазових мереж (NTN). Зокрема, NB-NTN (вузькосмугові) рішення створюють можливості для підключення нових типів пристроїв, включно з мобільними гаджетами та об'єктами Інтернету речей (IoT). Попри те, що NTN реалізується здебільшого як програмне забезпечення для UE, базових станцій та супутників, постачальники вже розробили спеціалізовані чипсети, які підтримують цей тип зв'язку. Завдяки такому підходу відкривається шлях до численних галузевих партнерств, що формують багатий спектр рішень NTN — від мобільного зв'язку до IoT та автомобільних технологій. Наприклад, дослідження ABI Research показує потенціал обслуговування понад 330 мільйонів непридатних для підключення об'єктів, 500 мільйонів працівників критичних галузей, понад 200 мільйонів осіб, які щороку страждають від природних катастроф, а також мільярди людино-годин втрат через відключення електроенергії[1].

Супутниковий зв'язок відіграє особливо важливу роль у доповненні екосистеми IoT, зокрема для нішевих IoT-провайдерів і віртуальних операторів мобільних мереж (MVNO). Стандарти 3GPP разом із ініціативами LoRa Alliance, що адаптують NB-IoT і LoRa для супутникового використання, сприяють розвитку цілісних, надійних та безперебійних послуг. Саме тому багато мобільних операторів налагоджують співпрацю з лідерами супутникової галузі, такими як Sateliot, Intelsat і Skylo, щоб інтегрувати супутникові технології у свої IoT-стратегії. Крім того, супутники можуть значно розширити охоплення NB-IoT і LoRa, забезпечуючи глобальне 100% покриття — це особливо важливо для мобільності, автоматизації та підтримки надійного зв'язку. Зрештою, інтеграція супутникових і наземних мереж

змінює саму сутність телеком-інфраструктури, надаючи унікальні можливості для подолання проблем із покриттям і підвищення якості сервісів[6].

Термін "неземні мережі" (NTN) охоплює різноманітні сценарії — від супутникового зв'язку до зв'язку між літаками й землею (ATG), а також управління польотами безпілотників. Залежно від висоти та типу супутників (GEO, MEO, LEO), а також пристроїв користувачів (портативні або VSAT-термінали), можливості підключення варіюються.

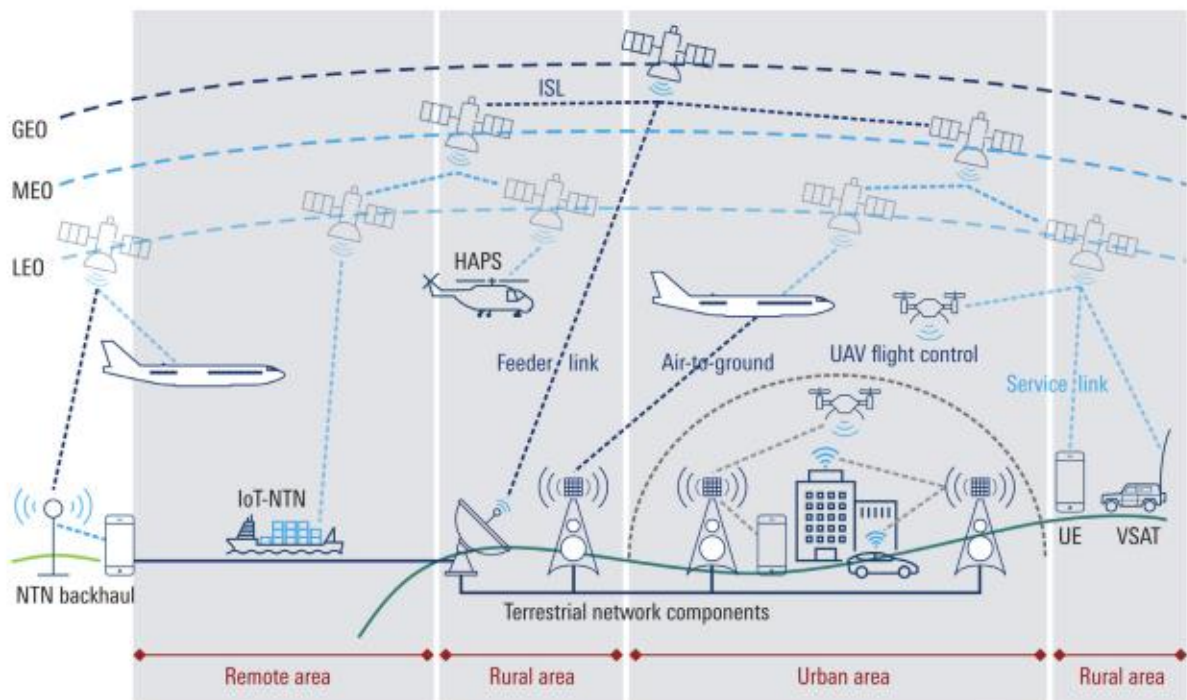


Рис.1.7 Використання сучасних супутникових телекомунікаційних систем в архітектурі 5G[6]

Окрім супутників, у рамках 3GPP допускається використання систем висотних платформ (HAPS) — повітряних куль, дронів чи літаків — для забезпечення зв'язку. При цьому 5G NTN може забезпечити як безпосередній доступ до UE, так і з'єднання між бортовими станціями та базовою мережею, що є ключовим для зворотного зв'язку. Нарешті, керування безпілотними літальними апаратами також розглядається як частина NTN-сценаріїв, з можливістю використання різних способів взаємодії — від мережевих протоколів до автономного управління. У порівнянні з класичним наземним

5G, NTN має нижчу пропускну здатність, проте є незамінним доповненням для підключення в ізольованих і складнодоступних регіонах.

1.3 Використання сучасних супутникових телекомунікаційних систем в архітектурі 5G

Система O3b/mPOWER компанії SES – надвисокопродуктивна мережа на середній навколоземній орбіті

Компанія SES із Люксембургу, один із провідних операторів супутникових систем на геостаціонарній (GEO) та середній навколоземній орбіті (MEO), завершує модернізацію свого супутникового угруповання O3b завдяки запуску нових супутників серії O3b/mPOWER. Система O3b/mPOWER використовує орбітальне угруповання із 12 MEO супутників. Ці супутники працюють на орбіті заввишки 8200 км над екватором. На сьогодні запущено 6 супутників. Зона обслуговування системи представляє собою пояс, який охоплює поверхню землі від 53 градуси південної широти до 51 північної широти. Орбітальне угруповання складатиметься з 11 апаратів, що дозволить забезпечити безперервне покриття всієї території України. Супутники системи O3b/mPOWER відносяться до класу супутників надвеликої пропускну здатності VHTS і побудовані на основі платформи Boeing-702. Супутники формують дві групи променів: група променів до станцій спряження та група променів до користувачів. Супутники обладнані цифровим корисним навантаженням регенеративного типу, що здійснює маршрутизацію потоків на борту, та фазованими антенними решітками. Кожен супутник може одночасно створювати до 5000 незалежних керованих променів у Ka-діапазоні з пропускну здатністю від 40 Мбіт/с до 10 Гбіт/с на промінь. Станції спряження розташовані на території телепортів компанії SES, які об'єднані власними оптоволоконними лініями і підключені до найближчих дата центрів провідних світових операторів хмарних дата центрів як то Amazon, Google, Microsoft. SES заявляє про можливість встановлення станції спряження безпосередньо на території замовника в Україні, що дозволить

інтегрувати супутникову мережу із національною магістральною системою зв'язку. Система орієнтована на надання послуг урядовим структурам, оборонним силам, а також корпоративним і приватним користувачам. Зважаючи на те, що компанія SES володіє найпотужнішим в світі угрупованням геостаціонарних супутників SES, Intelsat, для користувачів може бути запропонована комбінована послуга зв'язку із використанням супутників на геостаціонарній та середній навколоземній орбіті. Для користувачів доступна сертифікована лінійка терміналів, зокрема мобільні рішення Hydra-2 та Hydra-4 від компанії AllSpace. Ці термінали підтримують роботу із супутниками на GEO та MEO у діапазонах Ku та Ka, використовуючи технологію формування керованих променів на основі дійсної затримки.

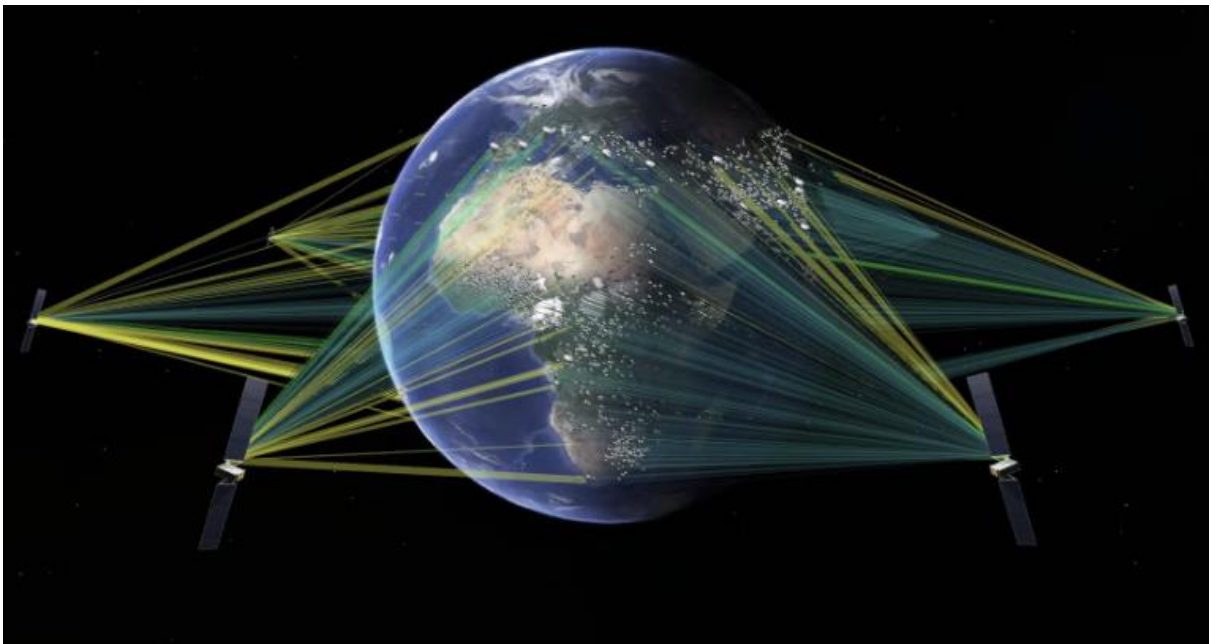


Рис.1.8 Система O3b/mPOWER

Система Starlink – впровадження оптичних каналів зв'язку та розвиток послуг Direct-to-Cell

Система Starlink залишається лідерами у впровадженні інновацій у сфері супутникових систем надвисокої пропускної здатності (ССШД). Система Starlink заявляє про здатність інтегруватися із мережами 5G.

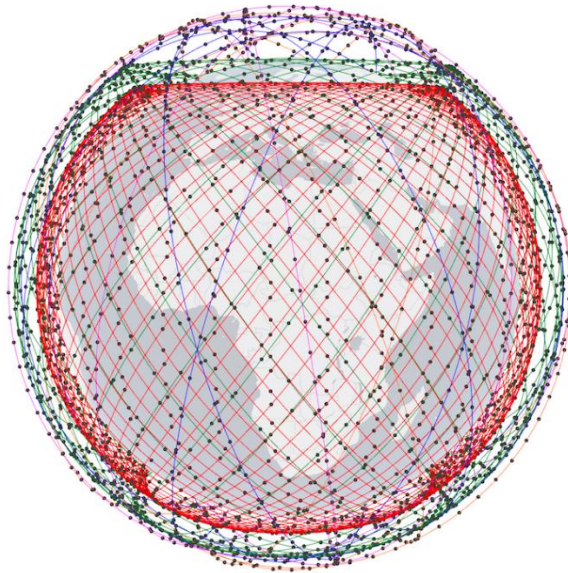


Рис.1.9 Архітектура орбітального угруповання системи Starlink

Компанія активно розширює орбітальне угруповання Starlink, збільшивши кількість працюючих супутників до 7105 (загалом на орбіті — 7135). Наразі запускаються супутники Starlink V2-mini масою близько 560–700 кг, які працюють у Ku та Ka-діапазонах. Кожен супутник створює 16 керованих променів Ku-діапазону (вдвічі більше порівняно з попереднім поколінням V0.9) і має на борту системи маршрутизації. На сьогодні система Starlink використовує три рівні орбіт із різним нахиленням включаючи приполярні орбіти.

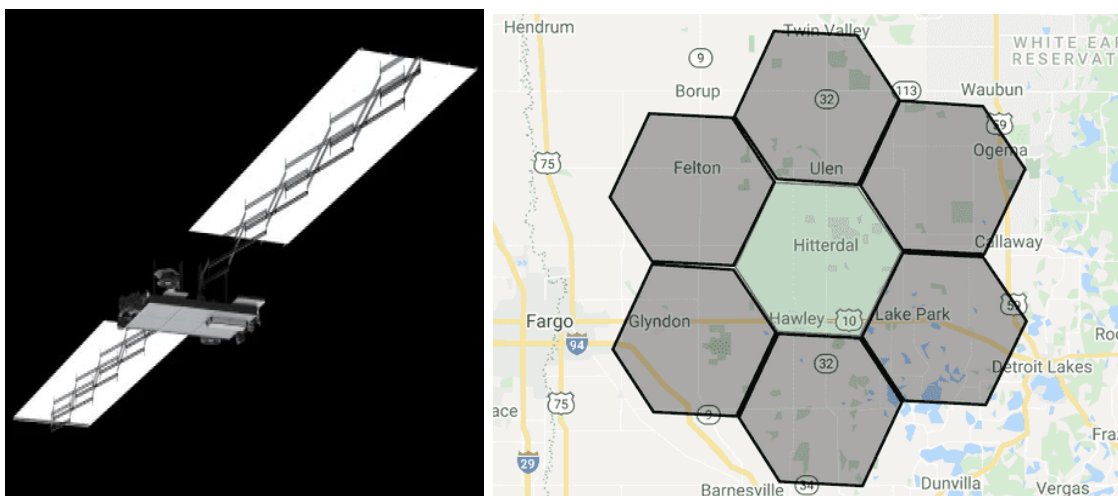


Рис.1.10 Супутник Starlink v2-Mini Маса ~560-700 кг. Супутник використовує Ku та Ka діапазони та формує 16 променів користувачів

Крім того, Starlink інтегрувала лазерні лінії зв'язку між супутниками. Кожен апарат оснащено трьома оптичними трансіверами, які забезпечують швидкість передавання даних до 200 Гбіт/с, утворюючи глобальну mesh-мережу, що дозволяє надавати послуги в будь-якій точці світу. Лазерні канали забезпечують зв'язок між супутниками в одній орбітальній площині та із сусідніми площинами для інтеграції мережі. На рисунку 1.11 представлення схема надання послуг користувачам із використанням оптичних ліній міжсупутникового зв'язку.

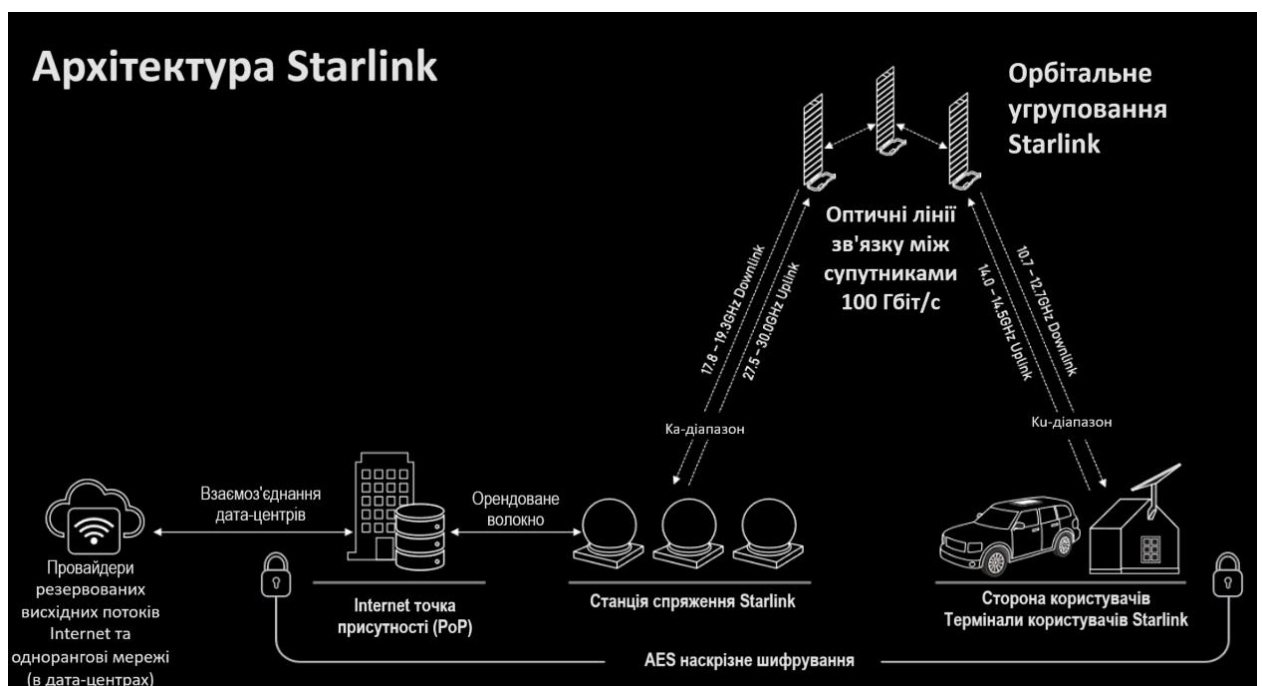


Рис.1.11 Архітектура Starlink

Запровадження лазерних ліній дало змогу оновити архітектуру мережі надання послуг. Точка присутності (Point-of-Presence, PoP) забезпечує доступ до інтернет-провайдерів і підключається до станції спряження (Gateway) за допомогою оптоволоконної лінії. Gateway здійснює підключення супутників Starlink до наземної мережі через окремий промінь у Ка-діапазоні. Залежно від розташування абонента, супутник спрямовує трафік або безпосередньо до користувача, або через лазерний канал до інших супутників. Увесь трафік між PoP та терміналом користувача шифрується за стандартом AES.

Ще одним напрямом розвитку системи Starlink в напрямку мереж 5G є впровадження режиму Direct-to-Cell (D2C). В режимі D2C (див рис. 1.12) забезпечується яка забезпечує прямий супутниковий доступ для смартфонів і планшетів у частотному діапазоні 1800 МГц. З 2024 року доступні текстові повідомлення, а у 2025 році — голосовий зв'язок, передавання даних і послуги Інтернету речей (IoT). Для цього супутники Starlink V2-mini-D2C обладнано фазованою антенною решіткою розміром $2,7 \times 2,3$ м. Компанія вже звернулася до Федеральної комісії зі зв'язку США (FCC) для отримання дозволів на використання орбіт висотою 340 км (нахил 53°) і 360 км (нахил $96,9^\circ$), які класифікуються як наднизькі орбіти (Very Low Earth Orbit, VLEO), а також подано заявки на смуги частот у Q/V-діапазонах.

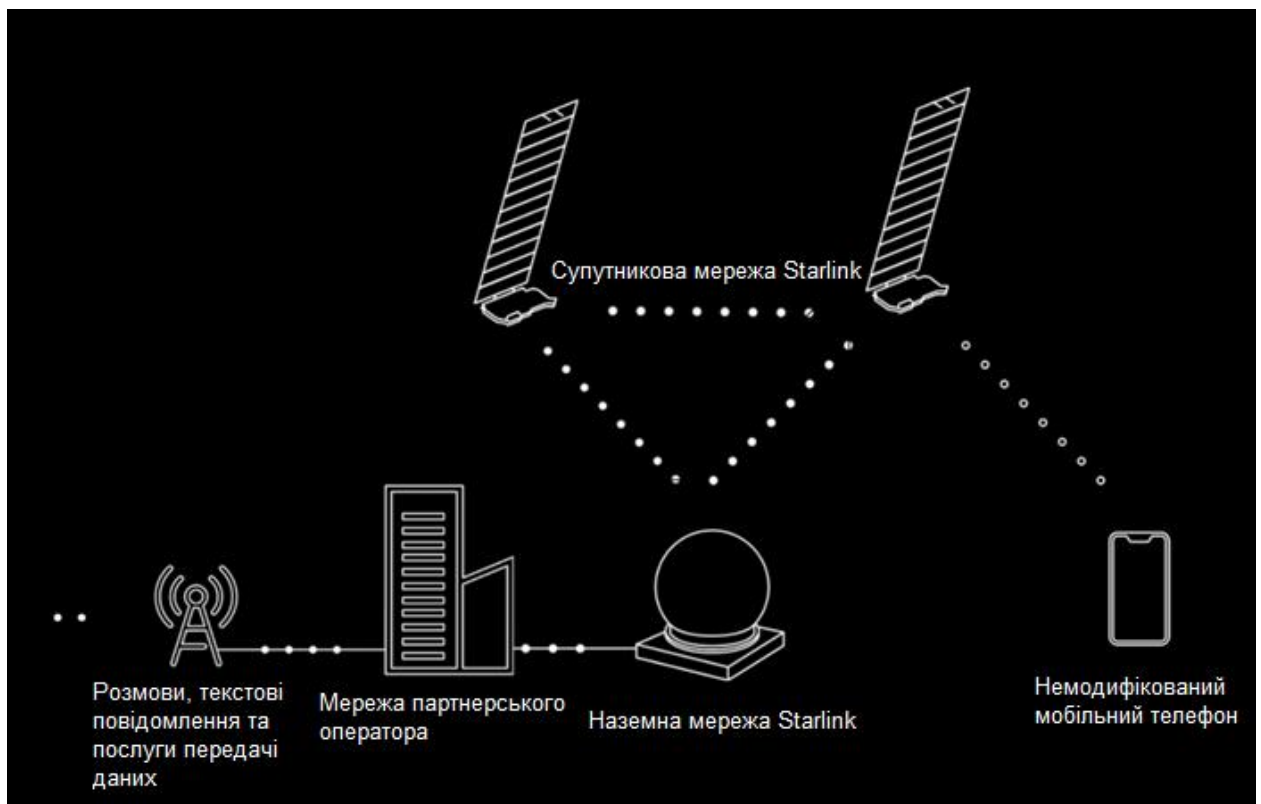


Рис.1.12 Архітектура Starlink

На жаль, наразі якість послуг Starlink в Україні залишається нижчою від встановлених вимог і корпоративних стандартів. Основна причина — відсутність станції спряження на території країни. Українські користувачі

обслуговуються через станції спряження в Польщі (Воля Кробовська) і Литві (Каунас).

Система Eutelsat OneWeb – інтеграція низькоорбітальної та геостаціонарної мереж

Для розширення спектра супутникових послуг в Україні перспективним є використання мережі Eutelsat OneWeb. У 2023 році OneWeb завершила розгортання повного угруповання з 648 супутників, розміщених у 18 орбітальних площинах на висоті 1200 км з нахилом 87,9°. Архітектура OneWeb представлена на рисунку 1.13 простіша, ніж у Starlink. В тракті надання послуги системи OneWeb використовуються підходи, перевірені в архітектурі LTE/4G, що забезпечує здатність системи взаємодіяти з мережами 5G. Кожен супутник формує 16 некерованих променів Ku-діапазону (див рис. 1.14), які покривають площу 1100×1100 км. Трафік для кожного променя створюється станцією спряження на основі координат користувачів. Передавання між супутником і Gateway здійснюється в Ka-діапазоні через вісім смуг у двох поляризаціях, які обслуговують 16 променів до користувачів. На борту супутника здійснюється перенесення частот між Ka- та Ku-діапазонами. Користувацький термінал змінює промінь кожні 18 секунд і супутник — кожні 2 хвилини 40 секунд. Регіональний трафік формується в точці присутності. Система OneWeb забезпечує повне покриття України.

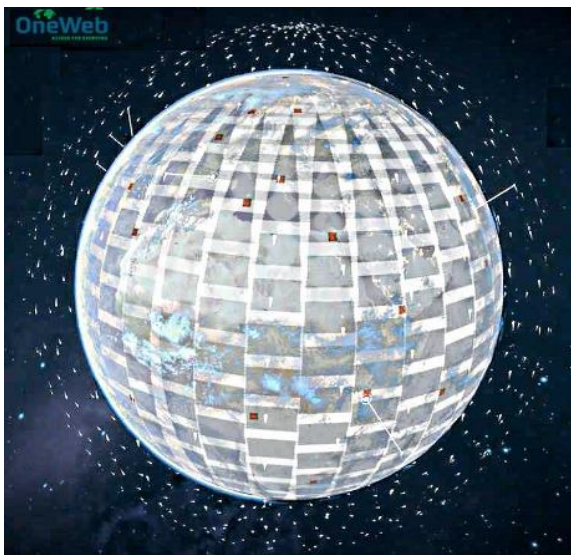


Рис.1.13 Архітектура орбітального угруповання системи OneWeb

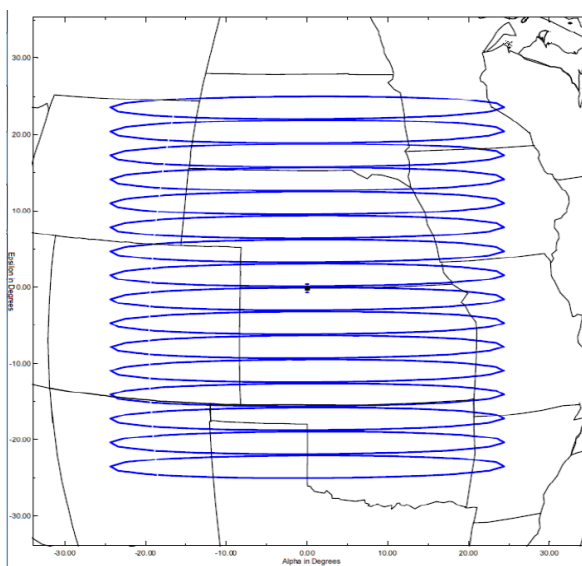


Рис.1.14 Кожен супутник OneWeb формує 16 некерованих променів до користувачів.

Після придбання компанією Eutelsat (оператора GEO супутників) OneWeb, відкрилися можливості для надання інтегрованих послуг на базі LEO-GEO мереж. Для цього пропонуються термінали Kymeta Hawk u8. Ці низькопрофільні антени з електронним керуванням працюють у всьому Ku-діапазоні. На відміну від Starlink, антени Kymeta U8 використовують голографічну технологію формування променя на основі рідкокристалічних LED та метаматеріалів. Вони оснащені модемною платою iQ 200 від ST

Engineering iDirect, яка підтримує високопродуктивний прийом сигналів DVB-S2/DVB-S2X, адаптивний зворотний канал TDMA і забезпечує захист даних за допомогою 256-бітного AES-шифрування[14].

1.4 Перспективи використання оптичних каналів в супутникових системах

Однією з найбільш перспективних архітектур для низькоорбітальних супутникових сузір'їв (LEO) є поєднання радіочастотних каналів у Ku- та Ka-діапазонах для користувацького сегмента з оптичними міжсупутниковими лініями зв'язку (OISL) для організації сітчастої мережі між супутниками. Використання оптичних каналів замість традиційних радіочастотних обґрунтовується низкою переваг: значно вищою пропускну здатністю, компактністю й енергоефективністю терміналів (менші маса, габарити і споживання енергії — SWaP), відсутністю необхідності ліцензування спектру, а також зниженням рівня взаємних перешкод, що особливо актуально при високій щільності супутників у сузір'ї.

Компанії-лідери галузі, зокрема **SpaceX** і **Telesat**, уже інтегрували OISL у свої проєкти, що дозволяє не лише оптимізувати кількість наземних шлюзових станцій, а й суттєво збільшити сумарну пропускну здатність мережі. Так, проєкт Starlink компанії SpaceX орієнтується на максимальну пропускну здатність системи близько **23,7 Тбіт/с**, тоді як у сузір'ї Telesat — до **2,66 Тбіт/с**.

Впровадження OISL у супутникових сузір'ях підвищує ефективність системи завдяки двом основним чинникам: зростанню пропускну здатності та зменшенню залежності від наземної інфраструктури. Для реалізації повноцінної оптичної сітки зазвичай кожен супутник оснащується чотирма лазерними терміналами, що дозволяє встановлювати різні типи зв'язків:

- **Внутрішньоплощинні зв'язки (intra-plane links)** — між супутниками, які розташовані попереду та позаду в межах однієї орбітальної площини.

- **Міжплощинні зв'язки (inter-plane co-directional links)** — між супутниками, які рухаються в одному напрямку на сусідніх орбітальних площинах.
- **Міжплощинні зв'язки протилежного напрямку (inter-plane counter-directional links)** — між супутниками на паралельних площинах, які рухаються назустріч один одному.

Ці типи зв'язків добре ілюструє приклад сузір'я Вокера (Walker T/P/ δ /F). Для конфігурації **T = 192** супутники, **P = 12** орбітальних площин, нахил орбіти **$\delta = 45^\circ$** і параметр **F = 2** (відносна відстань між супутниками в сусідніх площинах) забезпечується ефективна побудова оптичної мережі.

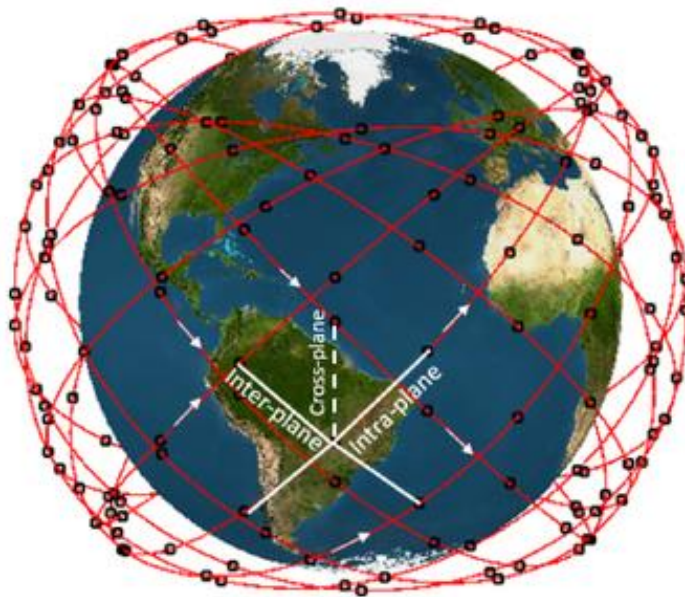


Рис.1.15 сузір'я Вокера (Walker T/P/ δ /F).[9]

Окрім цього, впровадження OISL може значно покращити затримки передачі (latency) у глобальних мережах передачі даних, оскільки інформація передається між супутниками практично на швидкості світла, без необхідності кожного разу «спускати» її на Землю.

Впровадження оптичних міжсупутникових ліній зв'язку (OISL) є ключовим технологічним кроком у розвитку супутникових сузір'їв нового покоління. Оптичні канали забезпечують значно вищу пропускну здатність

порівняно з традиційними радіочастотними каналами — сучасні термінали здатні передавати дані на швидкостях від 10 до 100 Гбіт/с і більше. Наприклад, лазерні термінали компанії Tesat-Spacecom, які використовуються у супутникових системах Starlink та Telesat Lightspeed, мають заявлену пропускну здатність до 20–40 Гбіт/с на канал. Завдяки цьому значно поліпшується не лише швидкість передачі даних, а й знижуються затримки під час глобальних з'єднань, що дозволяє, наприклад, для трансатлантичного з'єднання отримувати затримки менші, ніж у сучасних оптоволоконних кабелях.

Ще однією важливою перевагою є те, що оптичний спектр не потребує ліцензування на міжнародному рівні, на відміну від радіочастотних каналів. Це істотно спрощує регуляторні процедури під час розгортання глобальних супутникових мереж. Крім того, завдяки можливості передавати трафік між супутниками на великі відстані без постійного залучення наземних станцій, кількість таких станцій можна суттєво зменшити. Це дозволяє скоротити витрати на інфраструктуру і забезпечити покриття навіть у важкодоступних регіонах, де наземна мережа недостатньо розвинена.

Разом із цими перевагами існують і значні технологічні виклики. Основною складністю є необхідність високоточного наведення та стабілізації лазерного променя між супутниками, які рухаються на орбіті зі швидкістю до 7,5 км/с. Для цього використовуються складні системи наведення, відстеження та стабілізації (АТР), які дозволяють підтримувати точне спрямування лазера на відстані до кількох тисяч кілометрів. Крім того, лазерні термінали мають витримувати суворі умови космічного середовища, включаючи радіаційне навантаження, екстремальні температури, вакуум і механічні навантаження під час запуску. Високотехнологічність обладнання поки що робить його дорожчим за традиційні радіочастотні системи, однак із розвитком технологій і нарощуванням виробництва очікується поступове зниження вартості.

Щодо наземного сегмента, хоча OISL працюють між супутниками у вакуумі без втрат через атмосферу, передача сигналу на Землю через лазер

(laser downlink) може бути обмежена атмосферними явищами, такими як хмари, дощ або пил, що впливають на якість сигналу. Тому для наземних ланок часто використовуються комбіновані системи, які поєднують оптичні та радіочастотні канали.

На сьогодні впровадження OISL активно здійснюється кількома провідними компаніями. Компанія SpaceX почала оснащувати свої супутники лазерними терміналами з 2021 року, і у версіях другого покоління Starlink ця технологія використовується масово. Проєкт Telesat Lightspeed також передбачає обладнання кожного супутника чотирма лазерними терміналами, що забезпечить повноцінну оптичну сітку. Компанія OneWeb заявила про інтеграцію OISL у другому поколінні своїх супутників, а європейська програма IRIS також планує використовувати цю технологію у своїй інфраструктурі безпечного супутникового зв'язку.

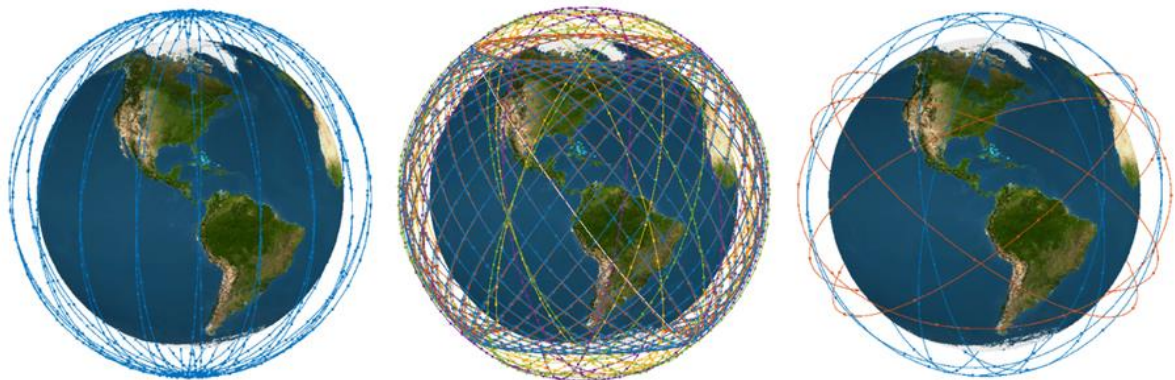


Рис.1.16 Супутникове угруповання OneWeb , SpaceX i Telesat[9]

На цьому рисунку 1.16 показано орбітальні конфігурації трьох основних супутникових сузір'їв низької навколоземної орбіти (LEO): **OneWeb** (ліворуч), **SpaceX Starlink** (у центрі) і **Telesat Lightspeed** (праворуч). Візуалізація дає змогу порівняти, як саме організовані орбіти супутників кожної з систем.

Ліворуч — сузір'я **OneWeb**. Воно побудоване за класичною архітектурою Walker Delta. Супутники розташовані на 12 орбітальних площинах з нахилом $87,9^\circ$, що забезпечує покриття майже всієї поверхні Землі, окрім крайніх полярних регіонів. Кожна орбіта заповнена рівномірно, і

траєкторії супутників мають чітку організованість без надлишкових перетинів. Це дозволяє OneWeb оптимізувати надання послуг широкосмугового доступу на широтах від 55° північної до 55° південної паралелі.

У центрі — сузір'я **SpaceX Starlink**. Це найбільш щільна та складна мережа серед представлених. Тут видно значно більшу кількість орбітальних площин і супутників, які перехрещуються під різними кутами, утворюючи густу «павутину». Starlink використовує багато орбіт з різними висотами (340 км — 570 км) та нахилами (53°, 70° та ін.), що забезпечує глобальне покриття, включно з полярними регіонами. Висока щільність супутників дозволяє забезпечувати низькі затримки і високу пропускну здатність, зокрема завдяки активному впровадженню оптичних міжсупутникових зв'язків (OISL).

Праворуч — сузір'я **Telesat Lightspeed**. Це менш щільне, але стратегічно організоване сузір'я з супутниками, розташованими на середньонахильних орбітах (~98°). Конфігурація має схожість з OneWeb, однак у Telesat орбіти побудовані для оптимізації передачі даних між супутниками із застосуванням OISL. Завдяки цьому мережа Lightspeed орієнтована на надання високошвидкісних послуг підприємствам, урядовим організаціям і операторам у віддалених регіонах.

Загалом ці три архітектури демонструють різні підходи до побудови глобальних мереж: OneWeb прагне простоти та широкого покриття, SpaceX робить ставку на надвисоку щільність і низькі затримки, а Telesat фокусується на високу продуктивність і надійність у комерційному сегменті. Це наочно ілюструє, як вибір орбітальних параметрів і топології впливає на можливості системи з точки зору покриття, пропускну здатності і архітектури мережі.

Висновки

1. Розвиток архітектури систем 5G є головним напрямком розвитку архітектури мобільних мереж широкосмугового доступу. Важливе місце в архітектурі мереж 5G займають супутникові складові, які формалізовані у вигляді неназемних мереж – NTN. Реліз 17 затвердив основні підходи до розвитку NTN в архітектурі 5G-NR.

2. Відмінними особливостями архітектури 5G-NR є використання технологій програмно-визначених мереж SDN та віртуалізації функцій мережі NFV. Реалізація цих функцій здійснюється окремими програмними та апаратними засобами на рівні базової/кореневої мережі та мережі радіодоступу в площині управління мережею та в площині надання послуг.

3. Технологія неназемних мереж NTN дозволяє суттєво розширити зону надання послуг мобільної мережі широкосмугового доступу. Існують два варіанти доступу терміналу користувача UE до супутника: безпосередній доступ та доступ з використанням спеціалізованого терміналу. Супутник може використовуватися як подовжувач лінії термінал UE – базова станція gNB, так і в режимі супутникових базових станцій. Мережі NTN передбачають можливість організації ліній зв'язку між супутниками.

4. Сучасні супутникові системи передбачають взаємодію з мережами 5G. Прикладами таких систем є Starlink, O3b/mPOWER, Eutelsat OneWeb та інші.

5. З метою підвищення надійності функціонування супутникових систем широкосмугового доступу, скорочення затримки на передачі інформації та підвищення гнучкості до архітектури орбітального угруповання таких систем вводяться лазерні оптичні лінії зв'язку між супутниками, що забезпечують передачу інформації на швидкості до 200 Гбіт/с на відстань більше 3,5 тис. км.

РОЗДІЛ 2

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО МОДИФІКАЦІЇ СИСТЕМИ NTN В СТАНДАРТІ 5G-NR

2.1 Загальна архітектура системи

Як перспективну супутникову телекомунікаційну систему, орієнтовану на надання IoT-послуг із використанням власних обчислювальних ресурсів для реалізації концепцій граничних, туманних та хмарних обчислень, пропонується розробка трирівневої супутникової системи Інтернету речей. Ця трирівнева супутникова система IoT здатна забезпечити глобальне покриття, що дає змогу підключати IoT-пристрої в будь-якій точці земної поверхні. Це особливо актуально для об'єктів, розташованих у важкодоступних або віддалених районах, де традиційні мережі зв'язку є малодоступними або недоступними.

Така система складається з трьох ключових сегментів (див. рис.2.1):

- геостационарний сегмент (GEO);
- низькоорбітальний сегмент (LEO);
- наземний сегмент.

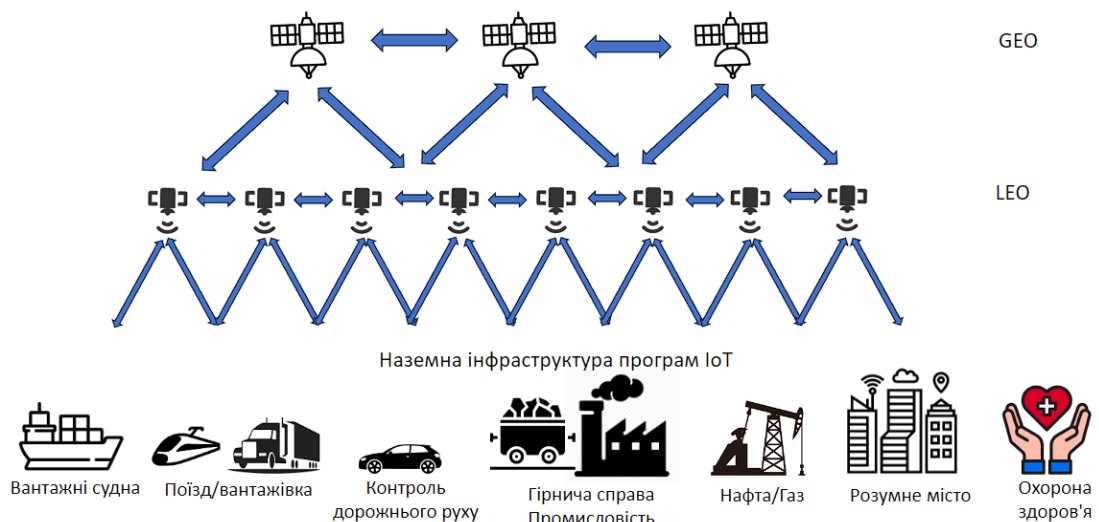


Рис.2.1. Багаторівнева архітектура супутникової системи IoT

Основні завдання геостаціонарного сегмента (рис. 2.2):

1. Управління мережею;
2. Надання хмарних дата-центрів;
3. Забезпечення зв'язку GEO–LEO.

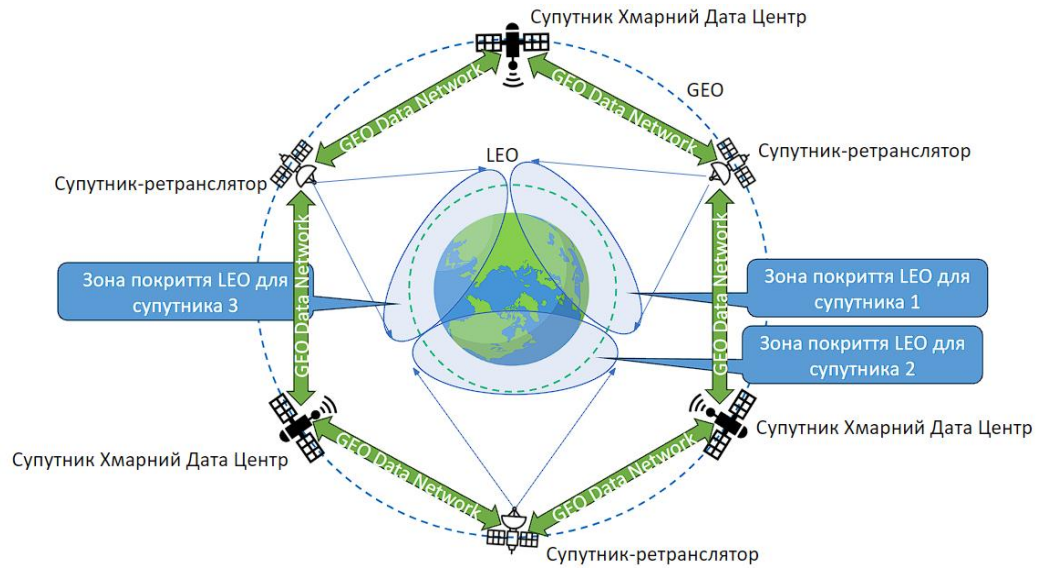


Рис.2.2. Геостаціонарний сегмент

Геостаціонарний сегмент включає супутники-ретранслятори GEO та супутники-хмарні дата-центри.

Низькоорбітальний сегмент призначений для прямої взаємодії із кінцевими IoT-пристроями в режимі Direct-to-Satellite, а також через термінали кінцевих користувачів. Наземний сегмент складається з IoT-пристроїв користувачів, які реалізують відповідні сервіси і згруповані за галузями: вантажоперевезення морем і наземним транспортом, промисловість, видобуток корисних копалин, енергетика, нафтогазова галузь, «розумні» міста, екологічний моніторинг і охорона здоров'я. До цього сегменту також належить обладнання сервіс-провайдерів, які орендують ресурси системи для надання своїх послуг.

Впровадження архітектури 5G-NR до багаторівневої супутникової системи.

Сучасний розвиток телекомунікацій рухається в напрямі впровадження технологій 5G до наземних мереж для надання послуг як для мобільних користувачів, так і для IoT-послуг.

Трирівнева супутникова система, що включає геостаціонарну низькоорбітальну та наземну складові дозволяє впровадити архітектуру 5G-NR із врахуванням особливостей супутникових систем. Схему такої інтеграції представлено на рис. 2.3.

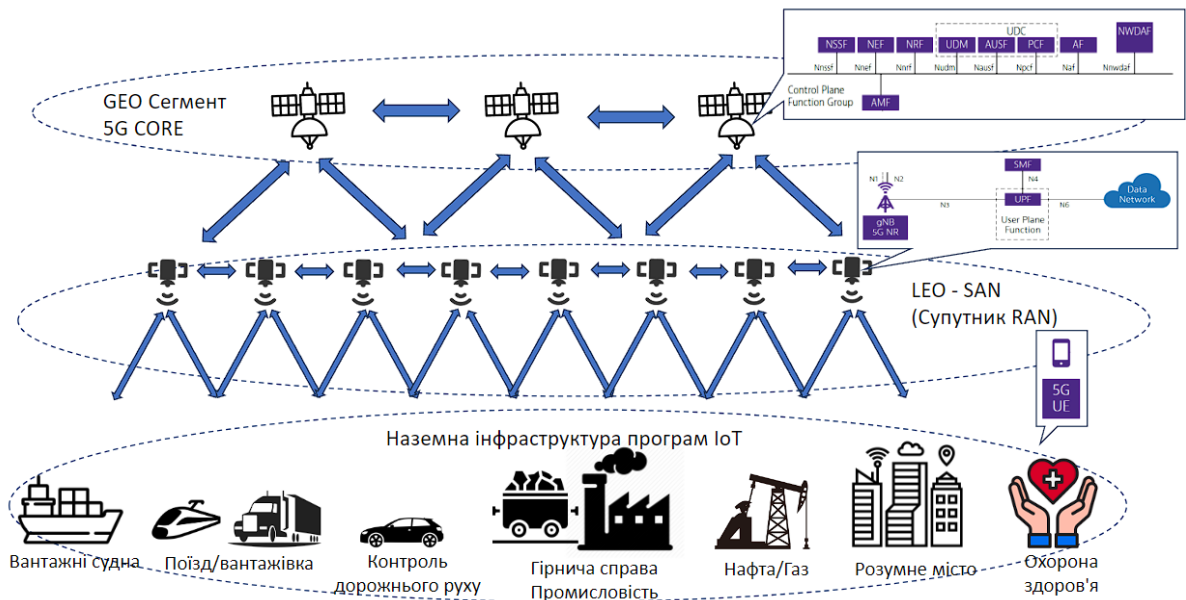


Рис.2.3. Впровадження архітектури 5G-NR у багаторівневу супутникову систему IoT

На рівень GEO сегменту винесена коренева мережа 5GC. Мережа складається з таких програмних функціональних блоків:

- управління доступом і мобільністю (AMF);
- функція вибору сегмента мережі (NSSF);
- функція взаємодії із зовнішніми додатками (NEF);
- функція мережевого сховища (NRF);
- єдине управління даними (UDM);

- сервер автентифікації (AUSF);
- функція політик (PCF);
- функція застосунків (AF);
- аналіз мережевих даних (NwDAF).

Апаратною основою кореневої мережі 5GС є хмарні обчислювані центри - GEO супутники-хмарні дата центри. GEO супутники — хмарні дата-центри — відповідають за обробку, зберігання і розповсюдження даних, а також надають обчислювальні ресурси для підтримки IoT-сервісів на основі хмарних технологій.

Усі GEO-супутники з'єднані між собою міжсупутниковими лініями зв'язку (див. рис. 2.2). Лінії зв'язку між супутниками реалізовані на базі оптичних лазерних ліній зв'язку. На базі мережі оптичних лазерних ліній зв'язку утворено GEO мережа передачі даних.

Для забезпечення зв'язності між GEO та LEO сегментами системи до складу GEO сегменту включені GEO супутники-ретранслятори. Ці супутники виконують функції формування та підтримки міжсупутникових ліній зв'язку із LEO супутниками. Кожен ретранслятор GEO охоплює приблизно третину земної поверхні і забезпечує взаємодію із супутниками-ретрансляторами LEO, які пролітають у межах цієї зони покриття. GEO супутники-ретранслятори організовують канали передачі між геостаціонарним і низькоорбітальним сегментами, формують міжсупутникові оптичні лазерні лінії і супроводжують LEO супутники в межах зони обслуговування. Крім того, GEO супутники-ретранслятори взаємодіють із наземними станціями, мережами операторів та сервіс-провайдерів, а також із наземними мережами передачі даних. GEO супутники-ретранслятори оснащені цифровими корисними навантаженням регенеративного типу, що працює на основі технологій SDN і SDR. В корисному навантаженні GEO супутників- ретрансляторів передбачені заходи для розділення GEO орбітальної мережі передачі даних та каналів передачі даних між GEO та LEO сегментами. Для цього до складу корисного

навантаження включені спеціальні механізми безпеки із використанням Fire Wall.

Низькоорбітальний сегмент

Низькоорбітальний сегмент включає супутникові базові станції (Satellite NB, sNB), що формують супутникову радіомережу доступу (SAN). На відміну від класичних наземних 5G-RAN мереж, SAN включає додаткові модулі — функцію керування сеансами (SMF) і функцію площини користувача (UPF). UPF здійснює маршрутизацію IoT-трафіку в межах низькоорбітальної мережі (рис 2.4). Для підтримки туманних/граничних обчислень у LEO сегменті передбачені власні обчислювальні потужності, а функції хмарних обчислень зосереджені на рівні GEO сегмента.

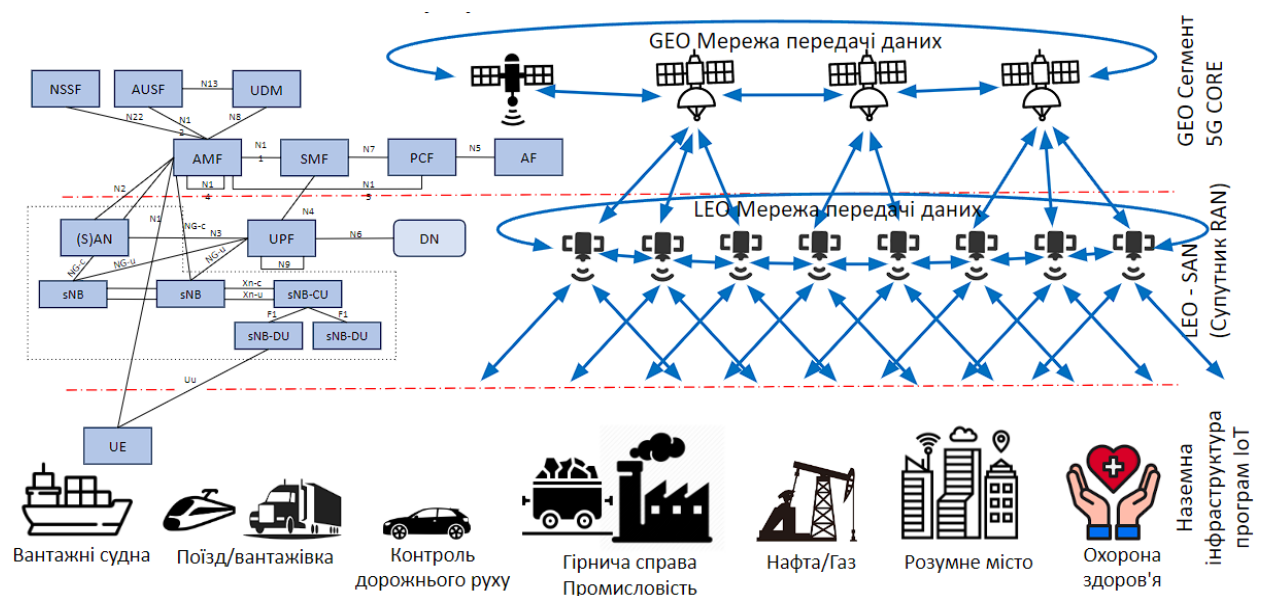


Рис.2.4. Схема розташування інтерфейсів 5G-NR у багаторівневій супутниковій системі IoT

На рис. 2.4 показано розміщення мережеских інтерфейсів 5G-NR у супутниковій інфраструктурі. Основні інтерфейси взаємодії між GEO і LEO сегментами включають: N1, N2, N4 і NG-c (площина управління):

- N1 — прозорий інтерфейс між користувацьким обладнанням (UE) і AMF, що передає інформацію про підключення, мобільність і сеанси;
- NG-c — інтерфейс площини управління між вузлом NG-SAN і AMF;

- N2 — канал зв'язку між SAN і кореневою мережею 5GC для управління мобільністю, QoS і синхронізації;
- N4 — підключає UPF до SMF і відповідає за обробку даних сеансів і маршрутизацію трафіку на рівні користувача.

2.2 Геоестаціонарна складова

Геоестаціонарний сегмент складається із GEO-супутників, що виконують функції хмарних обчислювальних центрів та GEO супутників-ретрансляторів.

2.2.1 Супутник – хмарний дата-центр

GEO-супутник - хмарний дата центр призначений для створення на геоестаціонарній орбіті потужностей для проведення хмарних обчислень та збереження даних. Хмарний дата центр надає послуги користувачам системи незалежно від можливості організації доступу до наземних дата-центрів. GEO хмарний дата-центр взаємодіє із мережею наземних дата центрів. В разі виникнення великого навантаження, яке перевищує потужність орбітального дата центру, до надання послуг споживачам залучаються потужності наземних дата-центрів. Для цього GEO хмарний дата-центр з'єднаний окремими фідерними лініями із наземними телепортами, де розташовані наземні дата центри.

GEO хмарний дата-центр побудований на базі платформи потужного геоестаціонарного супутника. Корисним навантаженням цього супутника є обладнання дата-центру, включаючи сервери, сховища даних, мережеве обладнання, модеми орбітальної мережі передачі даних на інше. На рис. 2.5 представлено структурна схема корисного навантаження GEO супутника хмарного дата-центру.

сервери для надання універсальних обчислюваних послуг, які вимагають виконання великого обсягу обчислювань, і побудовані на базі CPU процесорів за архітектурою x86 та AMD. Окремо до складу хмарного-дата центру включені модулі – точки доведення послуги POD, що орієнтовані на проведення обчислень в інтересах завдань штучного інтелекту і реалізовані на базі GPU процесорів NVIDIA

- Сховище даних, що побудовано на базі масивів даних і функціонують під управлінням серверів масивів даних. Взаємодія сховища даних із серверами у складі модулів POD здійснюється по окремій шині даних.

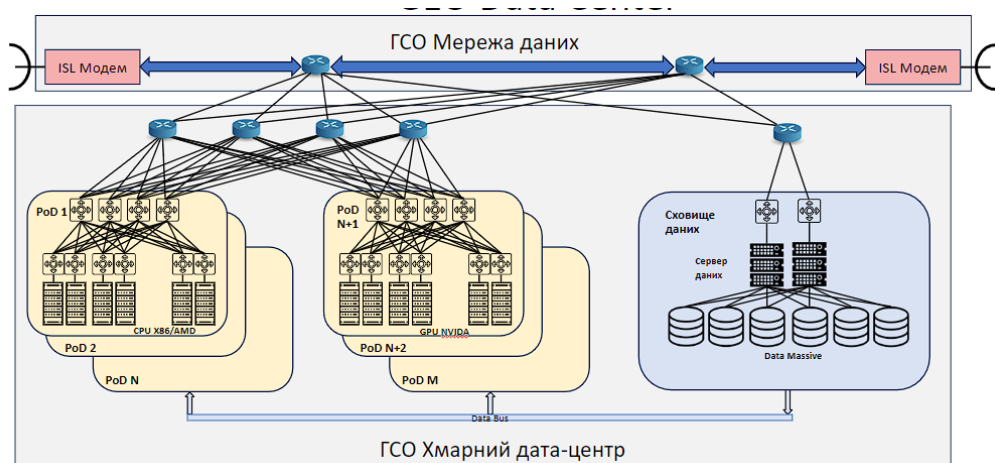


Рис.2.6. ГСО хмарний дата-центр

- Внутрішня мережа побудована на основі трирівневої архітектури spine-leaf компанії Cisco. Кожен сервер підключений до свого leaf-комутатора. Модуль із 16 серверів має відповідно 16 leaf-комутаторів, які з'єднані із чотирма spine-комутаторами. Spine-комутатори пов'язані з core-комутаторами, що забезпечують зв'язок між серверними модулями.

Хмарний дата-центр містить серверний модуль. Серверні модулі на базі CPU архітектури Intel x86 або AMD призначені для виконання великомасштабних обчислень, а також забезпечує високопродуктивні обчислення, зокрема для задач штучного інтелекту. Серверні модулі на базі GPU архітектури NVIDIA призначені для забезпечення обчислень в застосунках штучного інтелекту.



Рис. 2.7 Процесори серії Intel® Xeon® 6[10]

Процесорні модулі POD мають забезпечувати два основні показники: висока продуктивність та продуктивність на ват. Висока продуктивність зосереджена на досягненні максимальної обчислювальної потужності, що є важливим для вимогливих робочих навантажень, що потребують швидкої обробки. Продуктивність на ват визначає енергоефективність, яка має вирішальне значення для зниження експлуатаційних витрат або дотримання екологічних обмежень. З іншого боку побудова обчислюваних модулів на базі CPU та GPU ускладнює процес забезпечення їх взаємодії та розподілу обчислювальних завдань. Ефективним рішенням може бути використання універсальних обчислюваних модулів, до складу яких входять сервери на базі процесорів Intel® Xeon® 6. До особливості архітектури Intel® Xeon® 6 відноситься комбінація в одному процесорі ядер різної продуктивності. В

цілому процесор типу Intel® Xeon® 6 може містити до 140 ядер. До складу процесору включаються високопродуктивні Р-ядра та енергоефективні Е-ядра.

Р-ядра, або продуктивні ядра, — це більші ядра, оптимізовані для продуктивності, що характеризуються високими тактовими частотами, збільшеною кількістю інструкцій на такт (IPC instructions per clock) та можливостями гіперпоточної обробки (hyper-threading). Р-ядра ідеально підходять для вимогливих процесів та програм, які отримують вигоду від обробки інструкцій на такт, таких як рендеринг, навчання штучного інтелекту, моделювання тощо.

Е-ядра, або ефективні ядра, оптимізовані для енергоефективності та краще підходять для виконання завдань, що потребують менше енергії. Ці ядра менші, споживають значно менше енергії порівняно з Р-ядрами та не підтримують Hyper-Threading. Основною перевагою Е-ядер є їхня здатність підвищувати загальну енергоефективність процесора, обробляти фонові завдання та легкі служби додатків, водночас залишаючи потужніші Р-ядра для виконання важкої роботи

Таким чином використання серверів на базі універсальних процесорів Intel® Xeon® 6 є альтернативним рішенням що до побудови орбітального хмарного дата-центру.

Окремо до складу орбітального хмарного дата-центру включений обчислюваний модуль, який призначений для виконання функцій базової мережі 5GC. Це модуль містить сервери для реалізації програмно-функціональних блоків кореневої мережі та сховище даних для зберігання відповідної інформації. Зважаючи на універсальність процесорів серії Intel® Xeon® 6.

Модуль мережі передачі даних забезпечує підключення хмарного дата-центру до орбітальної мережі передачі даних. Він оснащений маршрутизаторами для обміну даними із сусідніми супутниками, модемами для формування та обробки потоків DVB-S2x, або також оптичним обладнанням. Для міжсупутникового зв'язку використовуються антени 80-

150мм з системами наведення. В разі використання обладнання оптичних каналів для підтримання міжсупутникового зв'язку використовуються оптичні головки[11].

2.2.2 ГСО супутник-ретранслятор

GEO супутник-ретранслятор призначений для забезпечення зв'язності між GEO та LEO сегментами системи. Корисне навантаження супутника побудоване за архітектурними рішеннями супутників високої пропускної здатності (High Throughput Satellite, HTS). До особливостей супутників-ретрансляторів відносяться здатність формувати фіксовані або керовані надвузькі промені. Зважаючи, що зв'язок між супутниками GEO та LEO сегментів відноситься до міжсупутникової служби згідно термінології ITU, для роботи цих супутників обраний частотний діапазон К (23 ГГц). Супутник формує незалежні вузьконаправлені промені із шириною смуги частот до 150–250 МГц.

GEO супутник ретранслятор

Основні характеристики ГСО супутників-ретрансляторів:

1. Надвузькі промені з фіксованою орієнтацією.
2. Можливість формування керованих променів, які відстежують рух наземних або низькоорбітальних об'єктів.
3. Передача даних до супутників-дата-центрів.
4. Контроль доступу до системних ресурсів і забезпечення інформаційного захисту.

Орбітальна мережа передачі даних складається з оптичних ліній зв'язку між супутниками, комутаційного обладнання і маршрутизаторів, встановлених у супутниках-шлюзах.

До складу обладнання супутника-ретранслятора входять (рис. 2.8):

- Обладнання мережі передачі даних ГСО;
- Модеми для вузьких променів;
- Сервери FireWall.

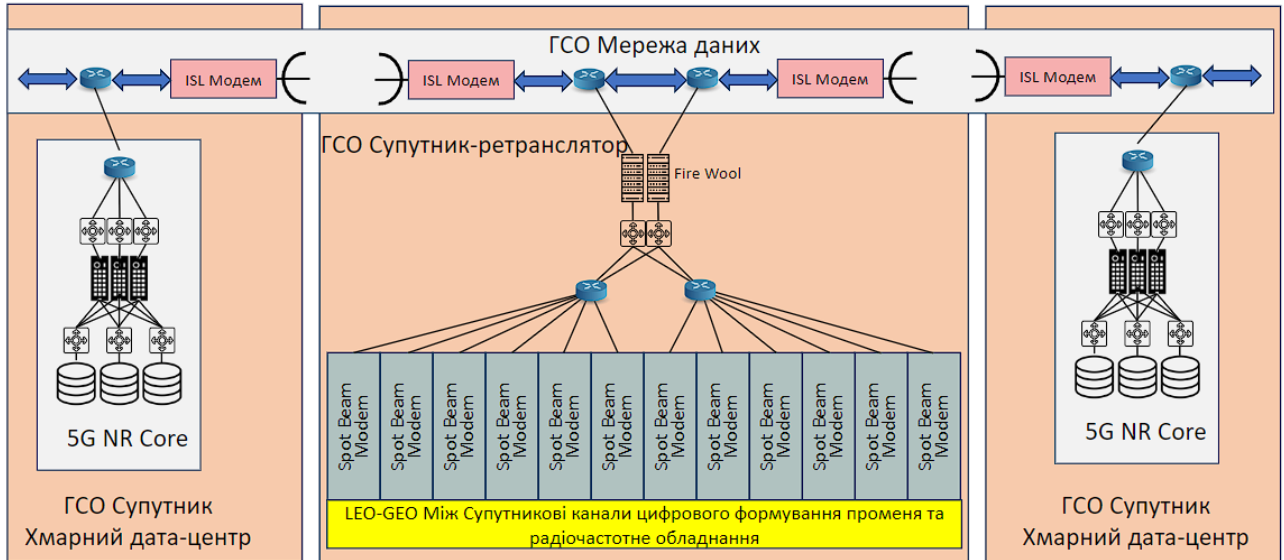
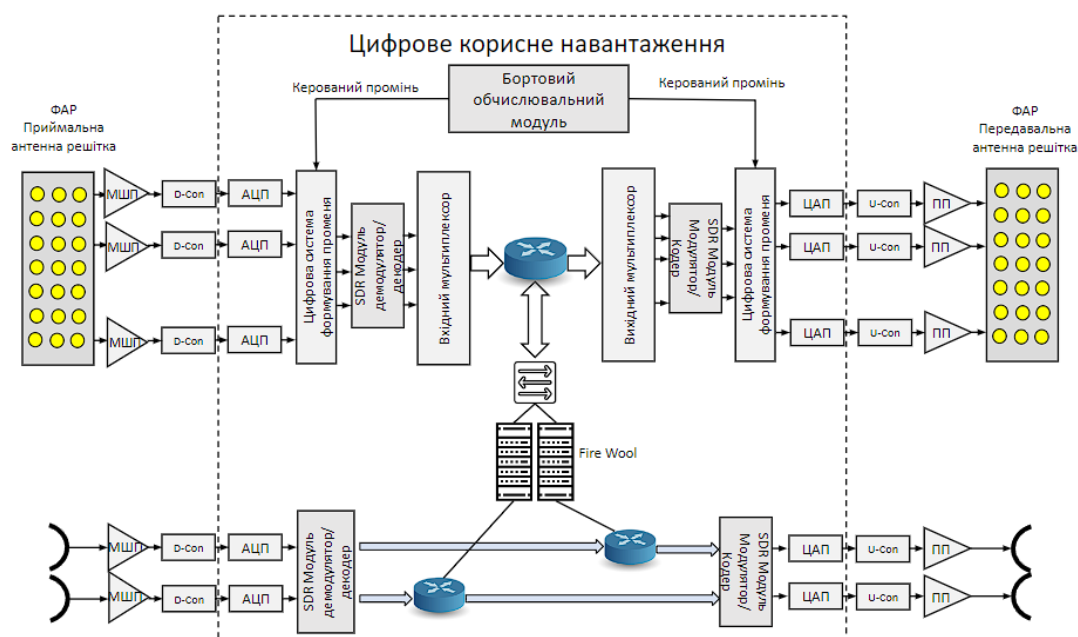


Рис.2.8. ГСО Супутник-ретранслятор

Існують три варіанти організації зв'язку між низькоорбітальними і геостаціонарними супутниками:

Перший варіант — використання керованих променів (рис. 2.10). Корисне навантаження оснащене фазованими антенними решітками для прийому і передачі. Бортовий обчислювальний модуль здійснює управління маршрутизацією, орієнтацією променів і контролем доступу до хмарного сховища. Цифрова система виконує модуляцію/демодуляцію, кодування/декодування, мультиплексування потоків і формування каналів.



На рис. 2.9 Цифрове корисне навантаження ГСО Супутника-ретранслятора з керованими променями

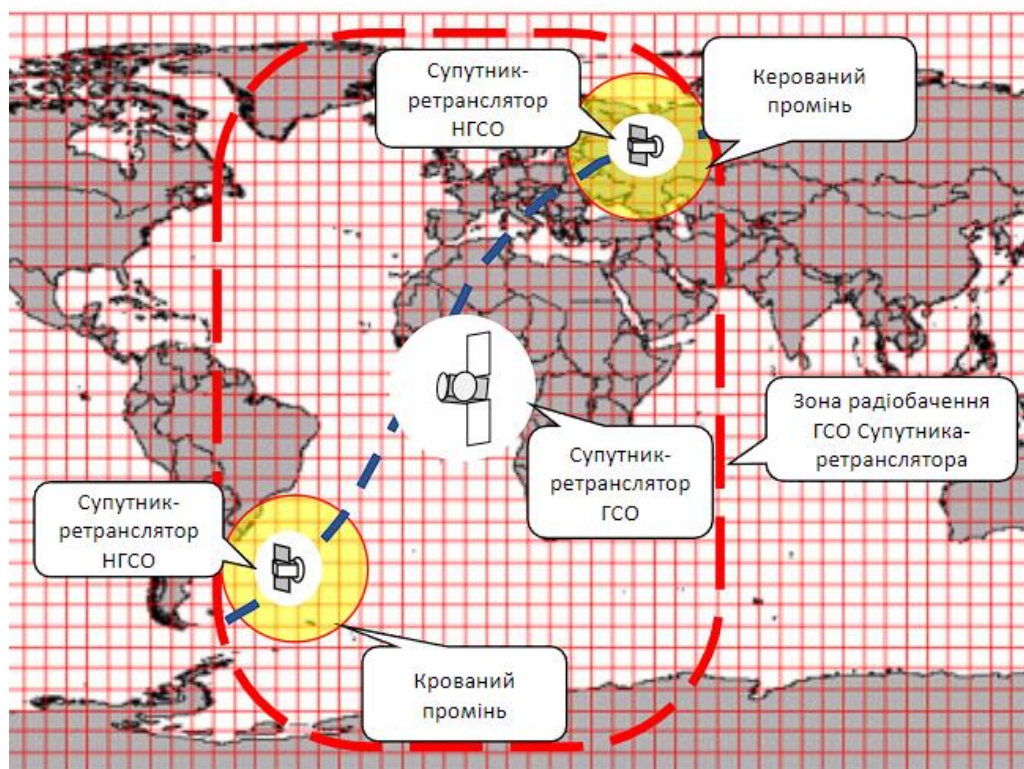


Рис.2.10. Організація лінії зв'язку між супутниками низької навколоземної орбіти та геостаціонарної орбіти за допомогою керованих променів

Другий варіант — використання фіксованих променів (рис. 2.11). У цьому випадку застосовується багатопроменева антенна система для прийому і передачі, а перемикання між променями здійснюється в міру руху супутника.

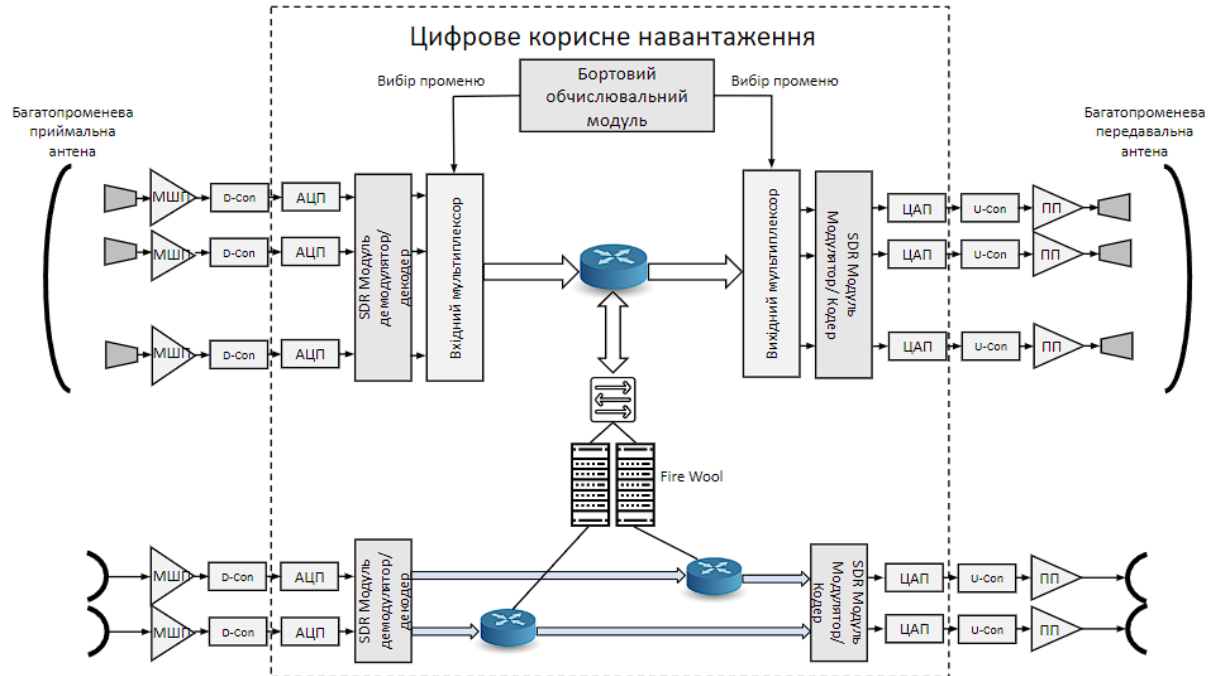


Рис.2.11. Цифрове корисне навантаження ГЕО Супутника-ретранслятора з фіксованими променями

На рисунку 2.12 представлена схема організації лінії зв'язку з використанням фіксованих променів. У цьому режимі геостационарний супутник-ретранслятор встановлює з'єднання з супутником-ретранслятором на низькій орбіті (LEO) за допомогою точкового (фіксованого) променя, який спрямовується в область появи LEO-супутника в полі видимості GEO-супутника. У межах цієї зони GEO-супутник здійснює супровід LEO-супутника, перемикаючи вузькі промені вздовж його траєкторії до моменту виходу з видимого сектора.

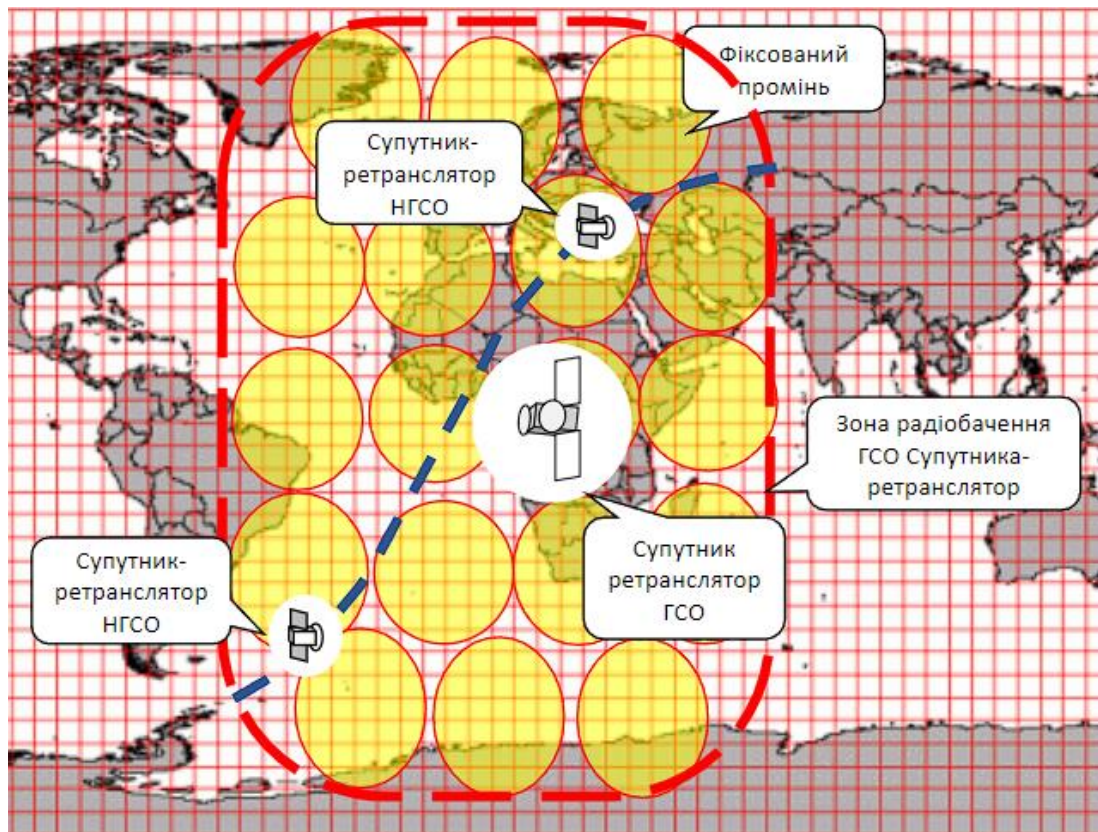


Рис.2.12. Організація лінії зв'язку між супутниками низької навколоземної орбіти та геостаціонарної орбіти за допомогою фіксованих променів

Третій варіант — використання оптичних ліній зв'язку. У цьому випадку зв'язок між супутниками здійснюється за допомогою лазерних (оптичних) терміналів, які забезпечують високошвидкісну передачу даних з вузькою діаграмою направлення, низьким рівнем електромагнітних завад і високою захищеністю. Оптичні канали забезпечують вищу пропускну здатність порівняно з радіоканалами, а також дозволяють зменшити масу й енергоспоживання антенних систем. Супутники в такій системі оснащуються точними механізмами наведення або системами автоматичного відстеження для утримання стабільного лазерного з'єднання під час руху.

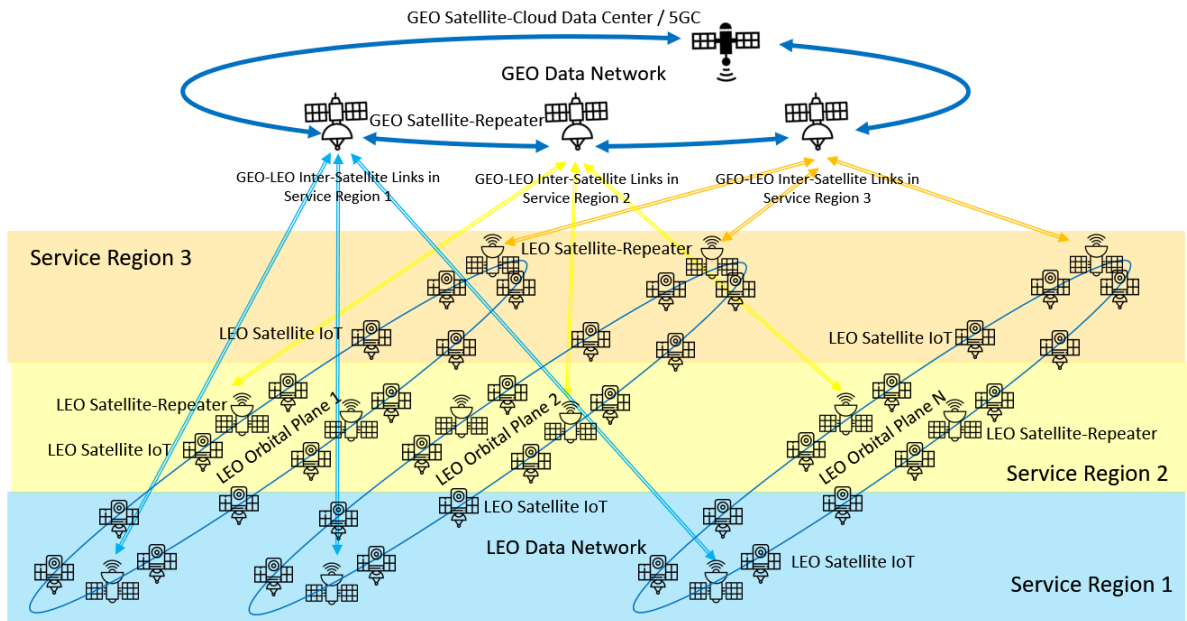


Рис. 2.14. Структурована мережа передачу даних супутникової інфраструктури

Оскільки LEO-сегмент потенційно охоплює всю земну кулю, кожен супутник проходить послідовно через кілька сервісних регіонів (Service Regions) — зон надання послуг, які можуть суттєво відрізнятись за структурою IoT-сервісів, кількістю й розташуванням сервіс-провайдерів, щільністю терміналів користувача (UE) тощо. Відповідно, у кожному регіоні змінюється архітектура інформаційних потоків та їх функціональна спрямованість.

Для зниження затримок і спрощення архітектури обміну, до кожної орбітальної площини включається кілька LEO супутників-ретрансляторів, які забезпечують зв'язок між собою за допомогою міжсупутникових каналів. Таким чином формується кільцева архітектура в межах LEO-мережі, яка підключається до GEO-мережі через LEO супутники-ретранслятори.

На рисунку 2.15 показано схему організації структурованої мережі передачі даних на основі технології SDN, реалізованої в рамках супутникової інфраструктури 5G. Верхній рівень SDN-архітектури представлений рівнем додатків (Service Application Layer), який формує вимоги користувачів щодо IoT-сервісів. На основі цих вимог встановлюються специфікації для елементів

GEO-, GEO-LEO- та LEO-сегментів, які подаються у вигляді адаптивних програмних інтерфейсів (API).

Передача API відбувається через захищені канали площини управління до контролерів керування пристроями у відповідних сегментах. Контролери, обробивши отримані API, формують таблиці маршрутизації потоків і, за допомогою протоколу OpenFlow, передають їх до комутаторів і маршрутизаторів рівня передачі даних.

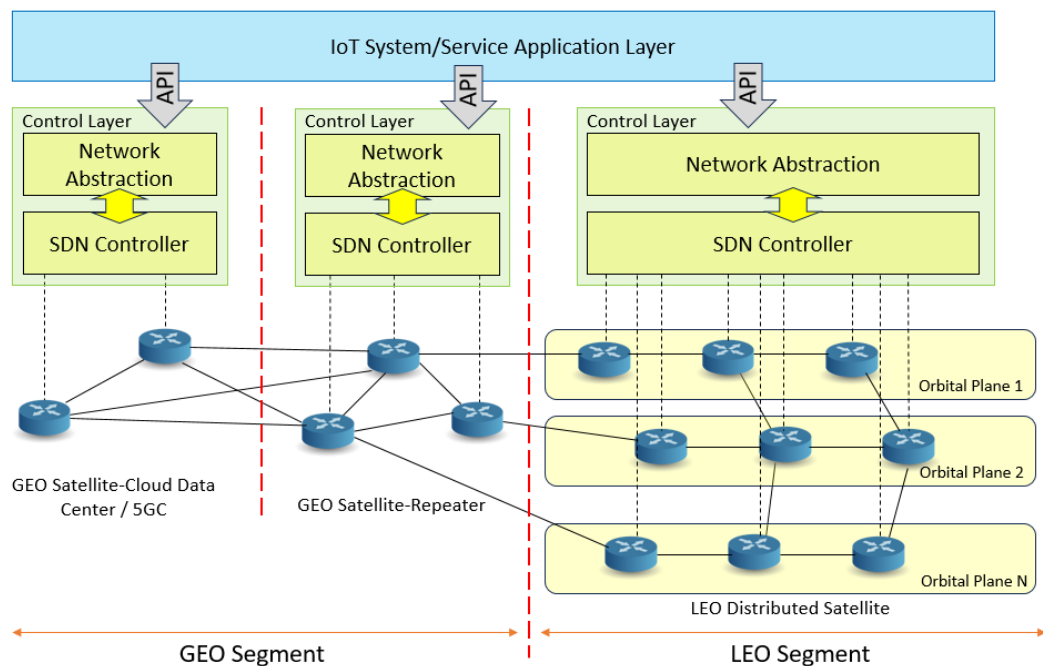


Рис.2.15. Схема організації структурованої мережі передачі даних за технологією SDN

Як видно з рис. 2.15, SDN-орієнтована мережа передачі даних має однорівневу архітектуру, де на рівні LEO-сегменту структура розподіляється на декілька взаємопов'язаних гілок. Кожна з таких гілок включає комутатори/роутери, кількість яких відповідає числу супутників в орбітальній площині.

IoT-системах спостерігається чітка тенденція до впровадження багаторівневої ієрархічної архітектури. На її найнижчому рівні розташовані безпосередньо IoT-пристрої (див. рис. 2.16.), а на найвищому — дата-центри, які здійснюють обробку даних за допомогою хмарних технологій (Cloud Data

Center). Сучасні «розумні» IoT-пристрої, як правило, оснащені власними обчислювальними модулями, які виконують попередню обробку даних, що надходять із сенсорів, перетворюючи їх у формат, придатний для передачі через комунікаційні канали. Ці пристрої реалізують базовий рівень обчислень — так звані граничні (EDGE) обчислення.

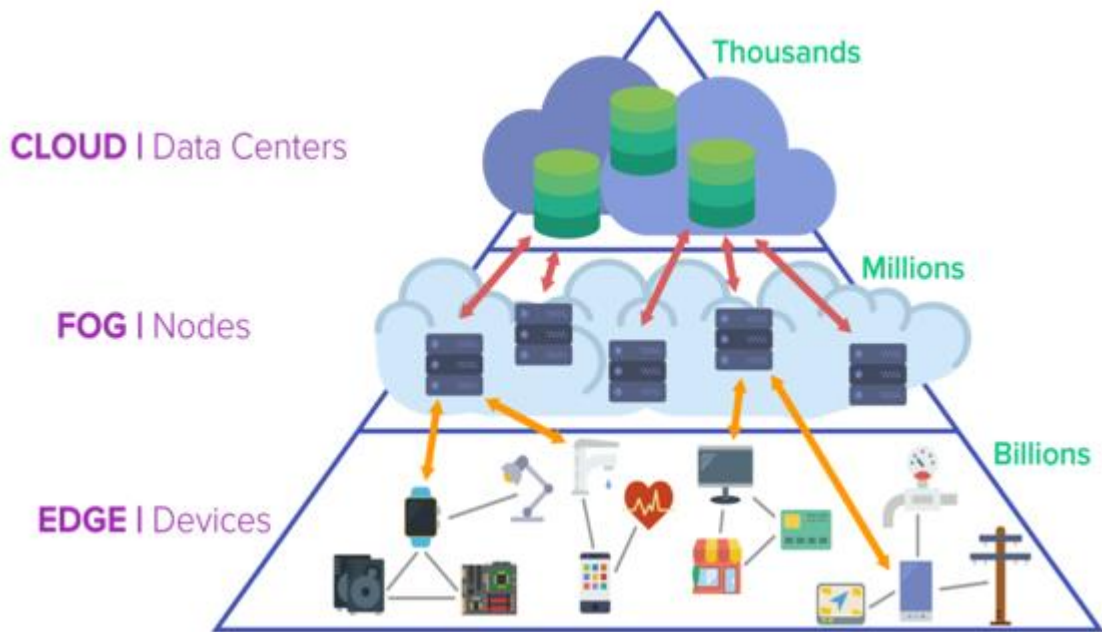


Рис.2.16. Багаторівнева ієрархічна структура

Перспективним напрямком є впровадження багаторівневої ієрархії обчислень, суть якої полягає в розподілі обчислювальних задач між трьома рівнями:

- **Граничні обчислення (EDGE Computing)** — обробка даних виконується максимально близько до IoT-пристрою, враховуючи лише зміни фізичних параметрів у зоні, що відповідає чутливості конкретного сенсора;
- **Туманні обчислення (FOG Computing)** — проміжний рівень, де здійснюється більш швидка обробка інформації від групи датчиків, що дозволяє оперативно формувати реакцію системи на зміни та прогнозувати вплив актуаторів на контрольований процес;
- **Хмарні обчислення (CLOUD Computing)** — на цей рівень надходять вже попередньо оброблені дані. Обсяг переданої інформації

зменшується, проте її цінність зростає. Хмарні обчислення забезпечують аналіз стану контрольованого процесу в межах усієї системи IoT і дають змогу приймати рішення про втручання в процес на глобальному рівні.

2.4 Послуги інтернету речей за протоколом NB-IoT

Інтеграція вузькосмугових IoT-протоколів для прямого підключення пристроїв до супутникової інфраструктури є важливим кроком у розвитку екосистеми Інтернету речей. Це рішення відкриває нові можливості для досягнення глобального покриття, підвищує гнучкість впровадження IoT-технологій і відповідає сучасним напрямкам розвитку не-наземних мереж (NTN) у рамках архітектури 5G-NR.

Основною перевагою вузькосмугових протоколів є їх здатність ефективно працювати в умовах обмежених частотних ресурсів, забезпечуючи при цьому великі дистанції зв'язку та низьке енергоспоживання. Протоколи на кшталт NB-IoT стали потужними засобом для організації взаємодії IoT-пристроїв із супутниковими сегментами. NB-IoT вирізняється стабільністю роботи за мінімального споживання енергії, що робить його особливо ефективним у супутникових застосуваннях.

Важливу роль у забезпеченні надійної передачі даних між різними протоколами відіграють спеціальні шлюзи, які виконують функції перетворення сигналів і підтримують високий рівень взаємодії між пристроями та супутниковим сегментом.

Стандартизація вузькосмугових протоколів є ключовою умовою формування єдиної екосистеми, де пристрої різних виробників можуть легко взаємодіяти між собою. Це сприяє ефективній інтеграції різноманітних пристроїв і їх універсальності для застосування в різних супутникових мережах.

Крім того, заходи з шифрування і автентифікації є критично важливими для захисту переданої інформації, збереження її конфіденційності та цілісності. Це підвищує рівень безпеки і довіри до супутникових IoT-зв'язків.

Загалом, використання вузькосмугових IoT-протоколів для прямого доступу до супутникових мереж виступає рушієм розвитку глобальних IoT-комунікацій. Цей підхід створює нові умови для розгортання IoT-рішень у важкодоступних районах, де традиційні мережі є недоступними, і забезпечує стабільний та ефективний зв'язок для пристроїв, що потребують всесвітнього покриття.

NB-IoT є прикладом такого протоколу, стандартизованого у версії 13 3GPP і вдосконаленого у версіях 15 і 16 для повноцінної роботи в середовищі 5G. Низьке енергоспоживання цієї технології досягається завдяки вузькій смузі пропускання, що одночасно сприяє зменшенню радіочастотних перешкод. Ця вимога добре узгоджується із невисокими швидкостями передачі даних, що є прийнятними для цього типу зв'язку.

NB-IoT базується на стандарті RAN мережі 5G-NR, використовуючи смугу шириною до 200 кГц. Передача даних здійснюється або у виділених підсмугах всередині несучих частот 5G-NR, або в межах їх захисних інтервалів. Максимальна швидкість передачі даних у прямому і зворотному напрямках при повному використанні смуги становить 250 кбіт/с.

NB-IoT

Одним із ключових напрямів застосування протоколів NB-IoT є надання можливості пристроям IoT напряду підключатися до супутникових мереж. Це дозволяє пристроям встановлювати з'єднання з бездротовою мережею, яка використовує супутники для передачі даних, що особливо актуально для регіонів із недостатньо розвиненою або відсутньою мобільною інфраструктурою.

Завдяки NB-IoT пристрої можуть здійснювати обмін даними із серверами та іншими пристроями через супутниковий канал і мати доступ до

Інтернету. Це відкриває широкі перспективи для застосування таких пристроїв у різних сферах — від сільського господарства й енергетики до моніторингу навколишнього середовища та інших галузей.

Окрім прямого підключення до супутників, NB-IoT забезпечує тривалий час автономної роботи пристроїв завдяки низькому енергоспоживанню. Це дозволяє IoT-пристроєм функціонувати на одному джерелі живлення протягом довгого періоду, що особливо важливо для енергоефективних IoT-рішень.

Для обміну даними між NB-IoT-пристроєм і сервером додатків через мережу доступу, 3GPP визначило два підходи оптимізації для стільникових IoT (Cellular IoT, CIoT): оптимізацію на рівні користувача (User Plane) та на рівні управління (Control Plane). Ці механізми застосовні не лише до NB-IoT. Оптимізація на рівні управління дозволяє передавати дані у вигляді IP-пакетів або SMS без потреби встановлювати повноцінний радіоканал, що знижує затримки. Пристрої NB-IoT, які підтримують лише оптимізацію Control Plane, не використовують оптимізацію на рівні користувача, однак можуть працювати з іншими варіантами CIoT.

У варіанті оптимізації Control Plane дані передаються від базової станції sNB (CIoT SAN) до елемента управління мобільністю (Mobility Management Entity, MME). Далі інформація може бути спрямована або через шлюз обслуговування (S-GW) до шлюзу пакетів (P-GW), або до функції відкриття сервісних можливостей (SCEF). Останнє актуально лише для не-IP пакетів. Від цих вузлів дані зрештою надходять до серверів додатків CIoT, а вихідний трафік рухається у зворотному напрямку. SCEF — це новий мережевий вузол, призначений для підтримки машинного зв'язку, який забезпечує передачу не-IP даних через керуючу площину та надає інтерфейси для сервісів, як-от автентифікація, авторизація та доступ до мережевих функцій.

Архітектура мережі доступу NB-IoT загалом відповідає LTE: базові станції eNB підключені до MME і S-GW через інтерфейс S1, хоча структура передавання NB-IoT-повідомлень і пакетів має свої особливості.

Протокольний стек NB-IoT є спрощеною версією LTE-стеку. Окрім цього, NB-IoT використовує змінену структуру носійних частот. Деякі елементи радіоінтерфейсу, зокрема канали управління (SRB), запозичені з LTE: SRB0 використовується для передачі повідомлень управління радіоресурсами (RRC) через спільний керуючий канал, а SRB1 — для перенесення повідомлень RRC і NAS через виділений канал управління. Протокольні стеки для площини користувача і площини управління у NB-IoT аналогічні LTE, проте оптимізовані для стабільної роботи NB-IoT у супутникових мережах (див. рис. 2.17).

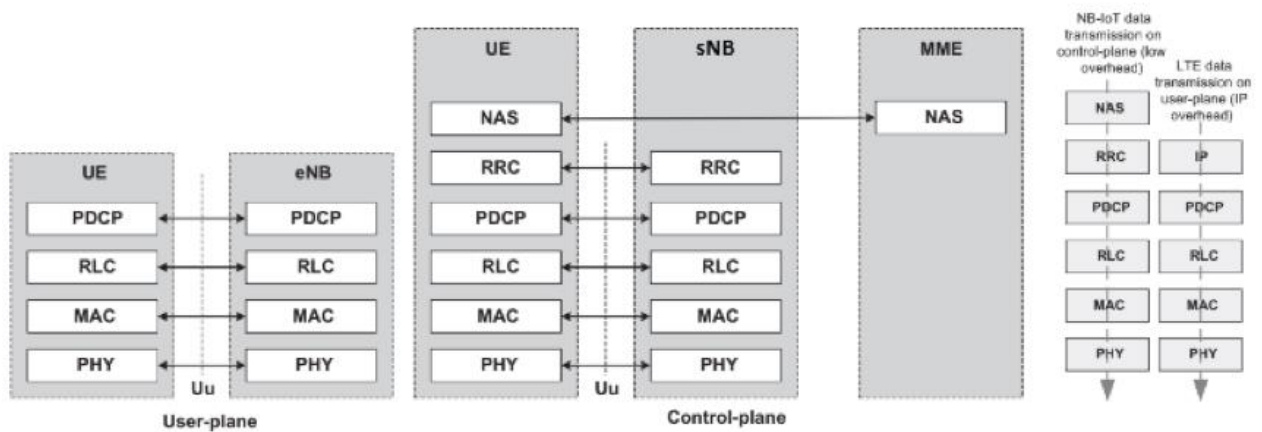


Рис.2.17. Структура протоколу рівня користувача та рівня керування NB-IoT

Протокольний стек NB-IoT є спрощеним варіантом протоколів LTE з функціональними обмеженнями. Окрім цього, NB-IoT застосовує модифіковану структуру носійних частот. Частина елементів радіоінтерфейсу (signaling radio bearer, SRB) запозичена з LTE: зокрема, SRB0 використовується для передачі повідомлень керування радіоресурсами (radio resource control, RRC) через спільний канал управління, тоді як SRB1 забезпечує транспортування повідомлень RRC і повідомлень рівня non-access stratum (NAS) через виділений керуючий канал. Протокольні стеки для площини управління та користувача в NB-IoT зберігають подібність до LTE, однак адаптовані та оптимізовані для надійної роботи в супутникових мережах (див. рис. 2.17).

Висновки

1. Для створення супутникової системи інтернету речей запропоновано використати архітектуру 5G із врахуванням перерозподілу функцій, що передбачені технологією NTN. Запропонована архітектура має три рівні: На першому рівні розташовані пристрої користувача UE, на другому рівні розташована LEO супутникова мережа, що виконує функції супутникової мережі радіодоступу, на третьому рівні знаходиться GEO складова. На відміну від базової архітектури NTN та 5G, коренева мережа винесена на рівень GEO сегменту. Також до складу GEO сегменту включені Хмарні дата-центри.

2. Запропонований розподіл програмних модулів та елементів архітектури 5G-NR між сегментами системи. В роботі зроблено розподіл програмних та апаратних елементів мережі радіодоступу із врахуванням їх трансформації в супутникову мережу радіодоступу та перенесена частина функцій, які пов'язані з організацією передачі даних користувачів, з рівня кореневої мережі на рівень мережі радіодоступу.

3. Для забезпечення зв'язності системи до архітектури орбітального угруповання було впроваджено лінії зв'язку між супутниками у складі LEO сегменту, GEO сегменту та між GEO та LEO сегментами.

4. Розроблені пропозиції щодо складу корисного навантаження супутників із складу GEO сегменту, в тому числі супутники-ретранслятори та супутники-хмарні дата центри. Запропоновано апаратна основа для розробки корисного навантаження GEO супутників-хмарних дата центрів на базі процесорів Intel® Xeon® 6, які здатні проводити звичайні обчислення та обчислення за технологією штучного інтелекту.

5. Для підвищення швидкості передачі інформації в системі в роботі запропоновано використання оптичних лазерних ліній зв'язку між супутниками зі складу LEO сегменту, GEO сегменту та між GEO та LEO сегментами. Для забезпечення універсальності запропонованих рішень що до взаємодії GEO та LEO сегментів системи запропоновано включення до складу LEO сегменту спеціалізованих супутників-ретрансляторів. Ці супутники

підтримують лазерні лінії зв'язку із супутниками на GEO та із сусідніми супутниками в своїй орбітальній площині.

6. Для реалізації систем інтернету речей із трирівневою ієрархічною структурою до складу LEO сегменту включене додаткове корисне навантаження супутників у складі обчислювачів на базі процесорів Intel® Xeon® 6 для виконання універсальних обчислень та для обчислень штучного інтелекту на рівні туманних та граничних обчислень.

7. В роботі розглянуто використання стандартів LoRaWAN та NB-IoT для забезпечення з'єднання з терміналами користувача в режимі безпосереднього доступу терміналу користувача до LEO супутника.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ АРХІТЕКТУРИ МОДИФІКОВАНОЇ СИСТЕМИ NTN В СТАНДАРТІ 5G-NR

3.1 Використання оптичних лазерних ліній зв'язку в супутникових системах

Оптичні (лазерні) лінії зв'язку в супутникових системах забезпечують високошвидкісну передачу даних між космічними апаратами без використання традиційного радіочастотного спектру. Основою технології є використання інфрачервоного лазерного випромінювання, переважно з довжиною хвилі 1550 нм. Така довжина хвилі є безпечною для людського ока, має добру стійкість до атмосферних втрат (для наземно-космічних застосувань) та сумісна з телекомунікаційним обладнанням. Принцип роботи лазерного зв'язку полягає в модуляції лазерного променя цифровим сигналом. Передавач формує вузьконаправлений когерентний промінь, який поширюється через відкритий космічний простір (free-space optical, FSO) до приймача, де він фокусується на фотодетекторі, перетворюється у електричний сигнал і піддається цифровій обробці.

У фізичному аспекті процес починається з генерації лазерного випромінювання. Для цього використовуються напівпровідникові або твердотільні лазери, які забезпечують когерентне монохроматичне світло. Після модуляції лазерний промінь випромінюється в напрямку приймального супутника. Поширення у вакуумі відбувається практично без втрат, за винятком геометричного розширення променя. Унаслідок цього промінь з часом розширюється, і при відстані в сотні чи тисячі кілометрів його діаметр може становити декілька метрів. Тому критично важливим є застосування високоточних систем наведення, відстеження та супроводу (ATP — Acquisition, Tracking, and Pointing), які утримують промінь у напрямку на приймач, незважаючи на рух обох супутників.

На приймальному боці використовується фотодетектор, який чутливий до довжини хвилі 1550 нм. Він перетворює оптичний сигнал на електричний

струм, який далі посилюється і демодулюється. Оптичний супутниковий зв'язок має низку переваг. Це висока пропускна здатність — до десятків гігабіт на секунду, низьке енергоспоживання на одиницю переданої інформації, високий рівень безпеки та перешкодозахищеності завдяки вузькій діаграмі направлення. У космосі, де відсутні атмосферні завади, такі канали практично ідеальні.

Разом з тим, є й певні технічні виклики. Найбільшим є забезпечення стабільного наведення лазерного променя на приймач у русі, що потребує складних сенсорів, приводів і алгоритмів супроводу. Крім того, складною є точна синхронізація та юстування оптичних осей між супутниками, особливо у випадках, коли один або обидва об'єкти перебувають на низьких орбітах з високими кутовими швидкостями.

На практиці технологія вже реалізується. Наприклад, система Starlink від SpaceX оснащує супутники лазерними міжсупутниковими лініями зв'язку, що дозволяє мінімізувати затримки та зменшити залежність від наземної інфраструктури. Аналогічні рішення впроваджуються в системах Telesat, OneWeb, а також у дослідницьких проєктах NASA (LCRD, LLCD).

Таким чином, фізичні процеси, що лежать в основі лазерного зв'язку в супутникових мережах, забезпечують надійний і високошвидкісний обмін даними в умовах космічного простору, відкриваючи перспективи для реалізації глобальних міжсупутникових мереж нового покоління.

Структура обладнання, яке використовується для оптичного (лазерного) зв'язку між супутниками, включає кілька основних функціональних блоків, об'єднаних в оптичний термінал. Нижче наведено типовий склад та призначення основних компонентів.

Система міжсупутникового оптичного бездротового зв'язку складається з трьох основних частин: передавача, каналу розповсюдження та приймача, як показано на рис. 3.1, де передавач розміщено на першому супутнику, а приймач — на другому супутнику. Оптичний бездротовий зв'язок використовує для зв'язку світло в близькому інфрачервоному діапазоні. Передавач

міжсупутникового оптичного бездротового зв'язку отримує дані від системи телеметрії, відстеження та зв'язку (TT&C). супутник. Супутник зазвичай передає такі дані, як положення супутника та відстеження висоти, захоплене зображення для супутника дистанційного зондування або навіть голосові дані для супутника, що ретранслює телефонну мережу. Світлодіод (LED) і інжекторний лазерний діод (ILD) є двома типами оптичних джерел світла, які зазвичай використовуються в оптичному зв'язку. Електричний сигнал від системи TT&C модулюватиме джерело оптично модулятор перед тим, як він буде переданий у космос. Оптично модульовані світлові імпульси передаються в середовищі передачі на приймальний супутник. оптичний бездротовий канал є середовищем передачі для системи міжсупутникового оптичного бездротового зв'язку. На відміну від оптики вільного простору, тобто канал OWC вакуумний і вільний від атмосферні втрати. Приймальний кінець сигналу міжсупутникового оптичного бездротового зв'язку складається з фотодіода, модуля квадратного кореня та фільтра низьких частот. Завдяки високій чутливості лавинний фотодіод (APD) використовується в оптичних даних у вільному просторі на великих відстанях. спосіб передавання.

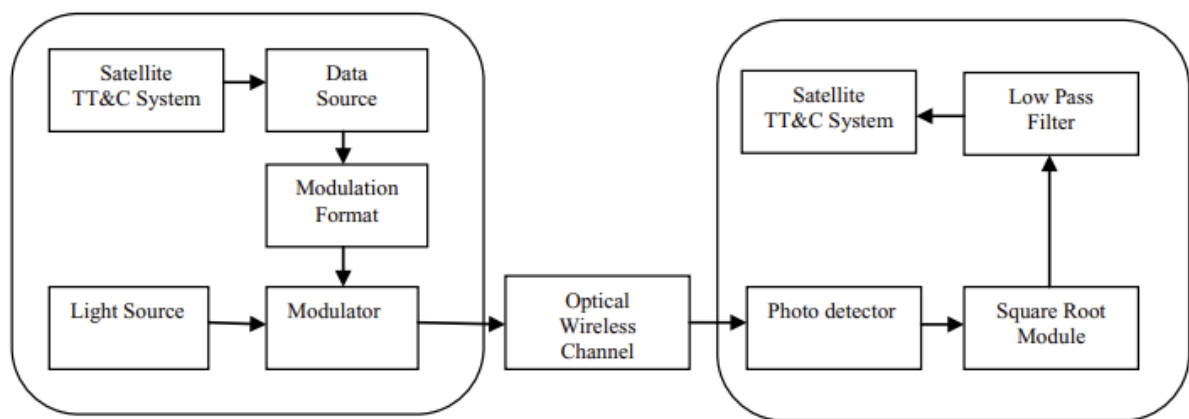


Рис.3.1. Блок-схема міжсупутникового оптичного бездротового зв'язку

Щоб задовольнити комунікаційні потреби подібних сузір'їв, Мунаріс розробив мініатюрний лазерний термінал для міжсупутникових зв'язків під назвою CONDOR. Цей термінал розроблено переважно з урахуванням серійне виробництво та оптимізація витрат, а також забезпечення надійності каналу

передачі даних. CONDOR — це оптичний термінал, призначений для встановлення міжсупутникових зв'язків у космічному середовищі. The CONDOR Gen1 (1 покоління) може працювати як єдине ціле з власною електронікою, інтегрованою в супутник корпус або прикріплений зовні. CONDOR Gen2 може працювати з іншими терміналами CONDOR, що мають спільний доступ електроніки, що стає оптимальним для супутникових угруповань. Його схематичний дизайн показаний на малюнку 7, виділення вузол оптичної системи, вузол електронної системи та оптична головка. Основні функціональні блоки лазерного терміналу CONDOR (Рис. 3.2).

Збірка оптичної системи містить оптико-механічні елементи, необхідні для прийому вхідного лазерного променя і стабілізація, а також точне наведення та стабілізація переданого лазерного променя. Він включає вузол точного наведення (FPA), датчик наведення, смуговий фільтр (BP), дільник променя (BS), датчик відстеження вузол (TS/FTS) і блок приймача. Промінь передавача підтримується точковим переднім вузлом (PAA), коліматор передавача та вузол передавача. Блок електронної системи є центральним елементом управління лазерним терміналом. Це окремий підрозділ і повинні бути вбудовані в корпус супутника. Оскільки цей блок не має тих самих обмежень, що й оптична система дозволяє вигідно розташувати супутник у плані управління температурою, радіація та сміття. Це дозволяє зробити екран тоншим і, таким чином, зменшити вагу. Основні завдання електроніки складання системи – це керування приводами наведення променя, а також контроль і нагляд за периферійні пристрої, які безпосередньо не задіяні в операції лазерного відстеження. Він також обробляє зв'язок із супутникову шину та виконання основних команд. Він включає комп'ютер керування терміналом (TCC) відповідає за контроль вказівки та управління TMTS, а також виконує оперативний графік за участю інших лазерні термінали на сусідніх супутниках. Лазерний трансивер Ethernet (LET) виконує кодування/декодування двонаправлене посилення. Оптична головка включає вузол грубого наведення (CPA) і вузол телескопа (TLA). Оптомеханічний

вузол CPA відповідає за безперервний канал передачі даних і дозволяє CONDOR встановлювати внутрішньоплощинні та міжплощинні зв'язки з іншими супутниками. CPA має механізм меншої пропускної здатності та змінний зміна швидкості для початкового наведення з розімкненим контуром і пошуку отримання даних. Для дизайну терміналу — плоский шарнір була обрана дзеркальна конфігурація. Ця конфігурація включає дзеркало з приводом, розташоване перед телескопом апертура для керування променем передачі в азимутальному та кутовому напрямках. TLA отримує та зменшує діаметр отриманого променя або збільшує вихідний світловий промінь до необхідного розміру, який відповідає зображенню потреб оптики. Для космічного терміналу конфігурація телескопа була обрана як пристрій з єдиною апертурою виконувати функції як TX, так і RX.

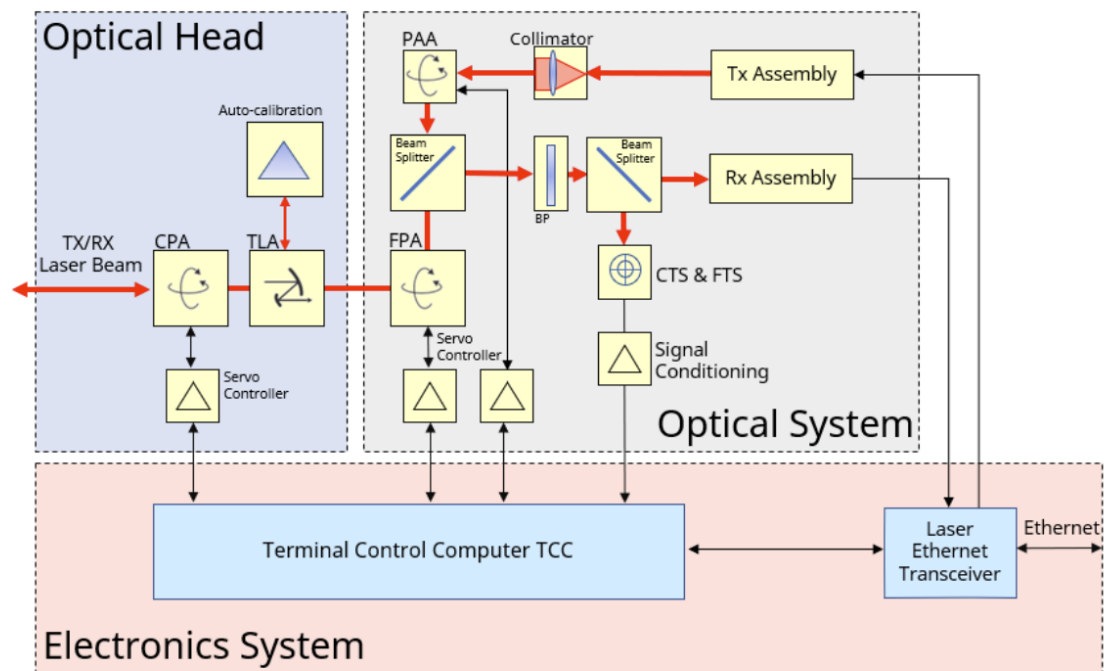


Рис.3.2. Функціональна блок-схема терміналу CONDOR[9]

Starlink (SpaceX)



Рис.3.3 Оптичний космічний лазер Starlink[12]

Оптичні термінали на супутниках Starlink — ключовий елемент міжсупутникового зв'язку (ISL — Inter-Satellite Links) SpaceX активно впроваджує оптичні лінії зв'язку у своїй супутниковій системі Starlink, особливо у супутниках покоління V1.5 і вище. Починаючи з 2021 року, кожен супутник обладнується трьома або чотирма лазерними терміналами, які дозволяють з'єднувати супутники один з одним у режимі реального часу без участі наземних станцій.

Приклади використання:

- Передача даних над океанами та віддаленими районами, де немає наземної інфраструктури.
- Зниження затримок при глобальній маршрутизації трафіку — наприклад, обхід наземних вузлів у США або Європі для швидшої доставки пакетів до Азії.
- Мінімізація використання наземних шлюзів — передача даних через оптичну сітку супутників дозволяє не залежати від розташування наземних станцій.

- Інфраструктура для армії США — Starlink ставить оптичні термінали як пріоритетну вимогу у контрактах з Міністерством оборони США.

Переваги:

- Наднизька затримка (менше 30 мс на міжконтинентальних трасах)
- Глобальне покриття без необхідності локального наземного шлюзу
- Підвищена захищеність каналів зв'язку завдяки вузьконаправленому лазерному променю

Lightspeed (Telesat)

Lightspeed — супутникова система зв'язку на низькій орбіті (LEO), яку розробляє канадська компанія Telesat. Супутники цієї системи масово використовуватимуть оптичні міжсупутникові лінії зв'язку (OISL) для побудови повністю оптичної мережі в космосі[15].

Приклади використання:

- Передача даних між супутниками у полярних регіонах, де наземна інфраструктура відсутня або ненадійна.
- Підключення до віддалених промислових об'єктів, таких як морські платформи, шахти, нафтопереробні заводи, де потрібна безперебійна висока швидкість з'єднання.
- Інтеграція з державними мережами безпеки та управління надзвичайними ситуаціями, забезпечуючи прямий оптичний маршрут зв'язку без використання третіх країн.
- Об'єднання континентів — наприклад, оптичний маршрут може обійти Європу та передавати трафік між Північною Америкою та Азією через полюс.

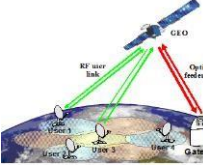
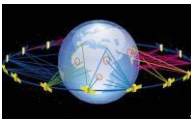
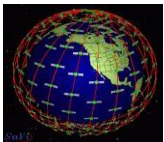
Характеристики оптичного зв'язку Lightspeed:

- Пропускна здатність — до 10 Гбіт/с на лінк
- Кожен супутник має 4 оптичні термінали

- Мережа автоматично реконфігурується залежно від руху супутників і потреб користувачів

Таблиця 3.1.

Основні характеристики для кожного типу місії[7]

		Feeder GEO		LEO / GEO		MEO Constellations		LEO Constellations	
									
		Baseline	Goal	Baseline	Goal	Baseline	Goal	Baseline	Goal
ISL	Data rate	> 40 Gbps	100 Gbps	> 40 Gbps	100 Gbps	10 Gbps	100 Gbps	10 Gbps	40 Gbps
	Range	> 2500 km	80000 km	40000 km	80000 km	21000 km	14000 km	1300 km	1000 km
	Neighbours	2	2	/	/	2	4	4	8
	Modulation	TBD	Analogic	TBD	Analogic	TBD	Analogic	TBD	Analogic
	BER before FEC	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}
	Consumption / ISL	200 W	200 W	100 W	100 W	150 W	150 W	50 W	50 W
	Onboard memory	2 Tb	10 Tb	2 Tb	10 Tb	1 Tb	5 Tb	500 Gb	2 Tb
Terrestrial downlink	Range	36000 km	36000 km	/	/	25000 km	30000 km	2000 km	1500 km
	Data rate	100 Gbps	1 Tbps	/	/	200 Gbps	1 Tbps	40 Gbps	100 Gbps
	Modulation	Analogic	Analogic	/	/	Analogic	Analogic	TBD	Analogic
	BER before FEC	10^{-3}	10^{-4}	/	/	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}

3.2 Методика розрахунку лазерних оптичних ліній зв'язку між супутниками.

Для FSOSN оптичні лінії зв'язку між передавачами та приймачами можна класифікувати як висхідну лінію зв'язку, міжсупутникову лінію зв'язку та низхідну лінію зв'язку. Оптичний міжсупутниковий канал зв'язку — це зв'язок між двома супутниками, а середовищем розповсюдження є космічний

вакуум, оскільки ці зв'язки існують між супутниками, розташованими в космосі. Для оптичного міжсупутникового зв'язку отримана потужність подається як[8]

$$P_R = P_T \eta_T \eta_R G_T G_R L_T L_R L_{PS} \quad 3.1$$

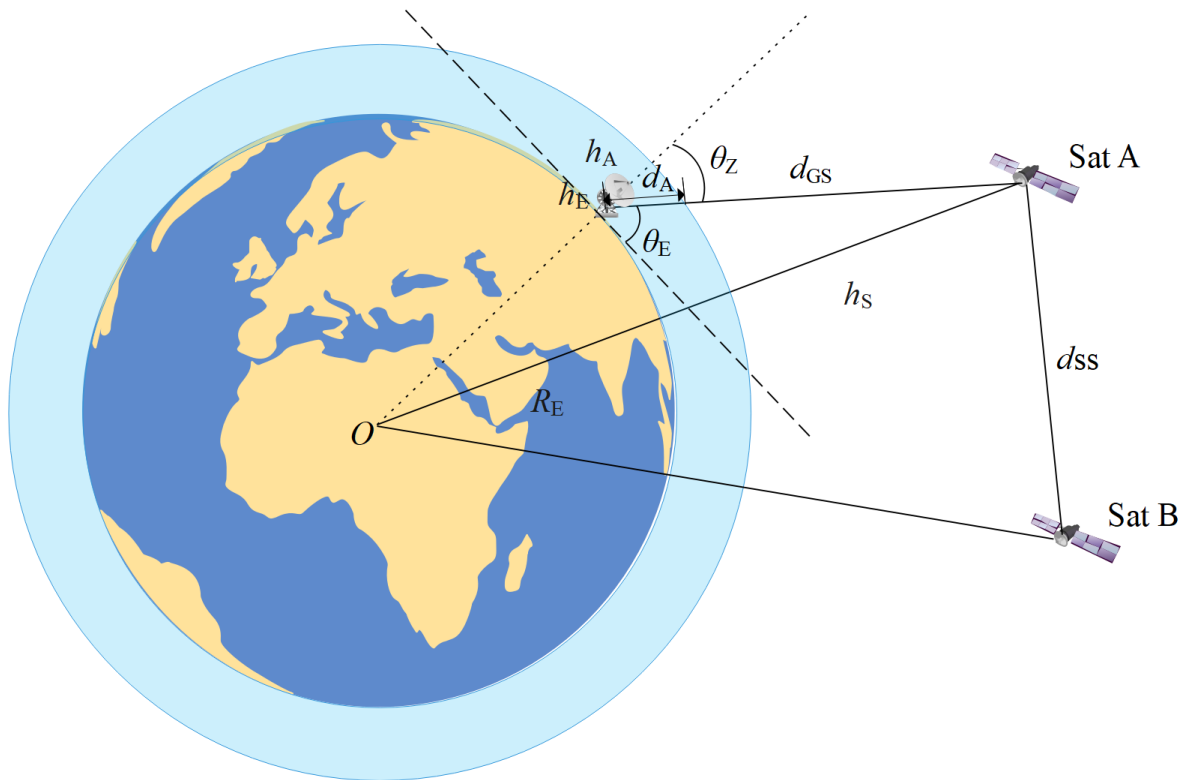


Рис.3.4. Геометричне представлення параметрів для оптичного зв'язку та міжсупутникового зв'язку.

P_T Потужність передавача

P_R Отримана потужність

G_T діаметр антени передавача

G_R діаметр антени приймача

L_T втрати передавача

L_R втрати приймача

L_{PS} втрати для оптичного зв'язку

η_T оптична ефективність,

η_R оптична ефективність

λ довжина хвилі

d_{SS} відстань між супутниками в Км

Розрахунок оптичної лазерної лінії міжсупутникового зв'язку здійснюється з використанням таких формул[13]:

Підсилення передавача G_T виражається як

$$G_T = \left(\frac{D_T \pi}{\lambda} \right)^2 \quad 3.2$$

Підсилення приймача G_R виражається як

$$G_R = \left(\frac{D_R \pi}{\lambda} \right)^2 \quad 3.3$$

Втрати передавача L_T виражається як

$$L_T = \exp(-G_T(\theta_T)^2) \quad 3.4$$

де θ_T – похибка наведення передавача в радіанах

Втрати приймача L_R виражається як

$$L_R = \exp(-G_R(\theta_R)^2) \quad 3.5$$

де θ_R – похибка наведення приймача в радіанах

Втрати для оптичного зв'язку L_{PS} виражається як

$$L_{PS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{SS}} \right)^2 \quad 3.6$$

Геометричні співвідношення для визначення довжини лазерних ліній зв'язку між супутниками.

3.2.1 Відстань між супутниками у складі LEO складової

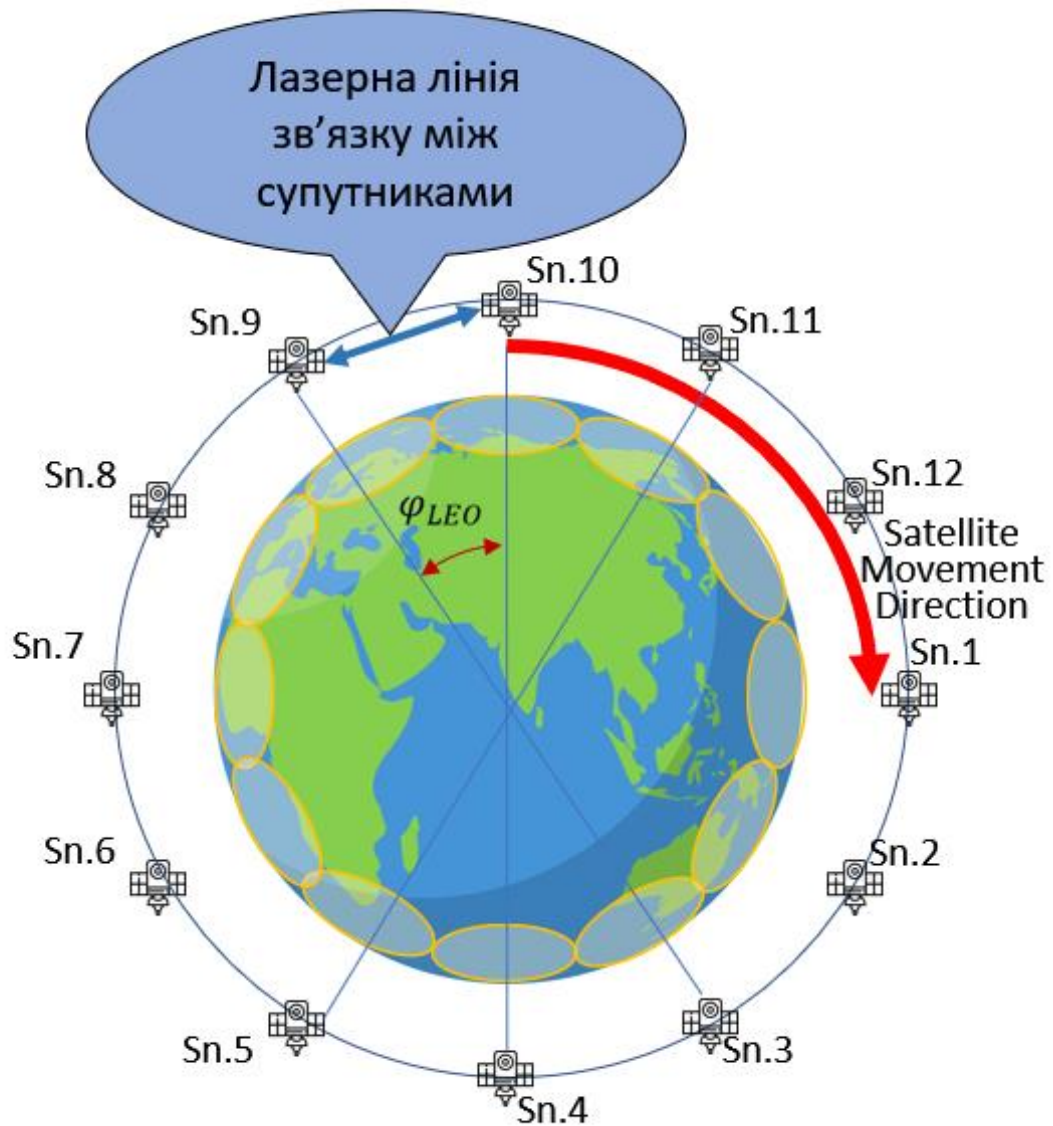


Рис.3.5 Відстань між супутниками у складі LEO складової

На рисунку 3.5 представлена модель для розрахунку довжини лазерної лінії зв'язку між супутниками у складі однієї орбітальної площини у складі LEO угруповання. Для моделі прийнято, що до складу однієї орбітальної площини входять 24 супутники, що рівномірно розташовані в орбітальній площині. У цьому разі центральний кут між супутниками φ_{LEO} становить 15° . Розрахунок здійснюється за формулою:

$$d_{ss} = 2(R_E + h_{LEO}) \times \sin\left(\frac{1}{2}\varphi_{LEO}\right) \quad 3.7$$

Де R_E – середній радіус Землі, $R_E = 6371$ км;

h_{LEO} – висота орбіти, $h_{LEO} = 700$ км.

Згідно представленої моделі довжина лазерної лінії зв'язку між супутниками LEO складової становить:

$$d_{ss} = 1923 \text{ км}$$

3.2.2 Відстань між супутниками у складі GEO складової

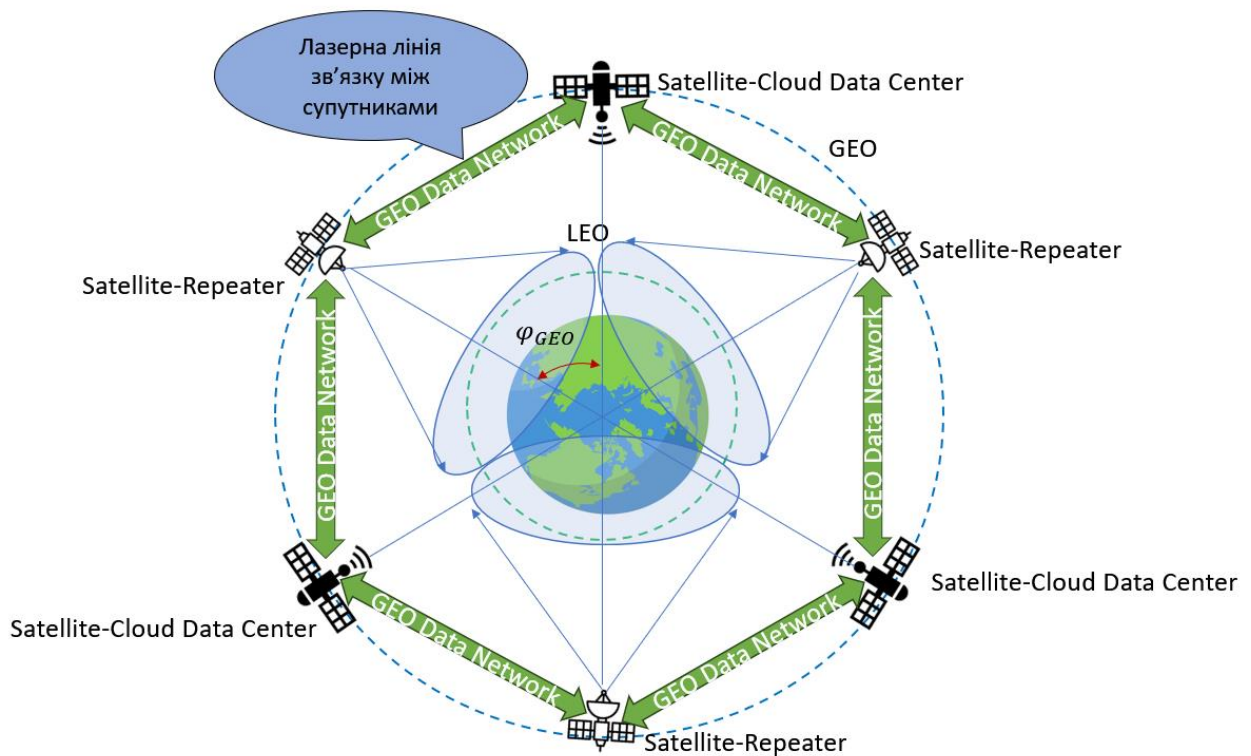


Рис.3.6 Відстань між супутниками у складі GEO складової

На рисунку 3.6 представлена модель для розрахунку довжини лазерної лінії зв'язку між супутниками у складі однієї орбітальної площини у складі GEO угруповання. Для моделі прийнято, що до складу однієї орбітальної площини входять 6 супутники, що рівномірно розташовані в орбітальній площині. У цьому разі центральний кут між супутниками φ_{GEO} становить 60° . Розрахунок здійснюється за формулою:

$$d_{ss} = 2r_{GEO} \times \sin\left(\frac{1}{2}\varphi_{GEO}\right) \quad 3.8$$

Де r_{GEO} – радіус геостационарної орбіти, $r_{GEO} = 42164$ км.

Згідно представленої моделі довжина лазерної лінії зв'язку між супутниками GEO складової становить:

$$d_{ss} = 36515 \text{ км}$$

3.2.3 Відстань між супутниками GEO-LEO

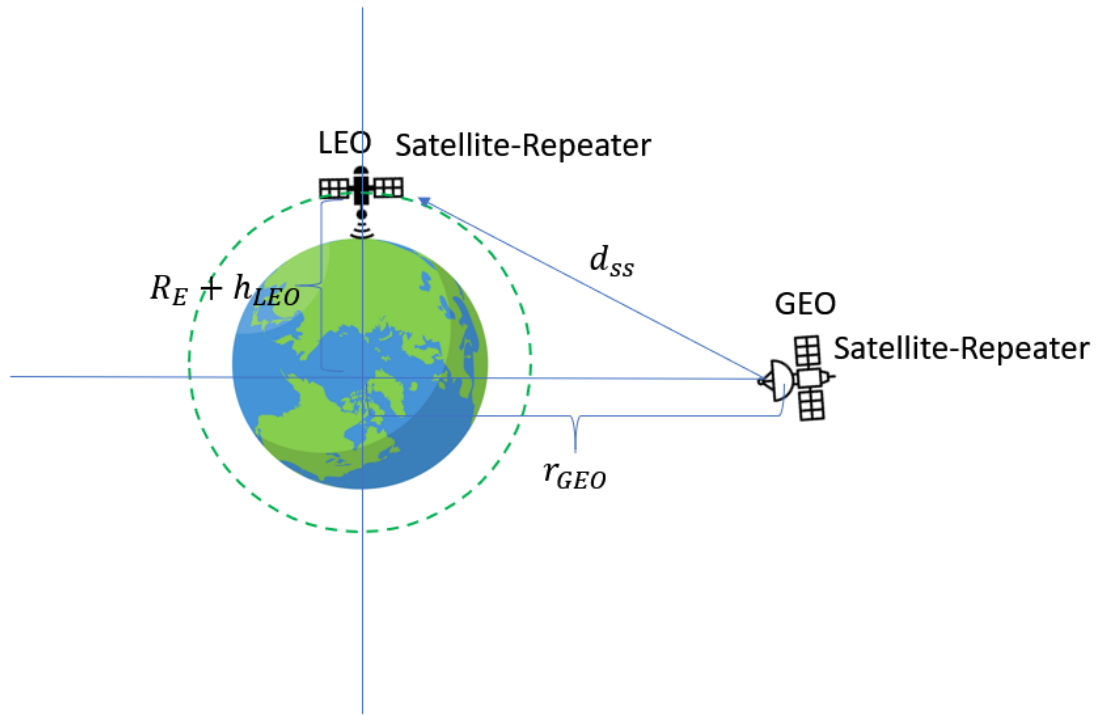


Рис.3.7 Відстань між супутниками GEO-LEO

На рисунку 3.7 представлена модель для розрахунку довжини лазерної лінії зв'язку між GEO та LEO супутниками. Для моделі прийнято, що висота орбіти LEO супутника становить 700 км. В моделі вважається, що центральний кут між супутниками становить 90° . Розрахунок здійснюється за формулою:

$$d_{ss} = \sqrt{(R_E + h_{LEO})^2 + r_{GEO}^2} \quad 3.9$$

Де r_{GEO} – радіус геостационарної орбіти, $r_{GEO} = 42164$ км.

За результатами розрахунку згідно моделі довжина лазерної лінії LEO-GEO становить

$$d_{ss} = 41508 \text{ км}$$

3.3 Використання оптичних ліній для побудови низькоорбітальної мережі передачі даних

Лінії зв'язку між супутниками в межах LEO сегменту забезпечують побудову LEO мережі передачі даних (рис. 3.8). Підключення до цієї мережі здійснюється через кореневий супутник, до складу корисного навантаження якого входить маршрутизатор. Усі супутники-ретранслятори та супутники з обчислювальними функціями, що входять до складу РС, виступають як хости в мережі передачі даних, яка реалізована на основі внутрішньої радіомережі. Ця радіомережа, у свою чергу, з'єднується з LEO мережею передачі даних через маршрутизатор кореневого супутника. Таким чином, у межах LEO сегменту сформовано структуровану мережу передачі даних.

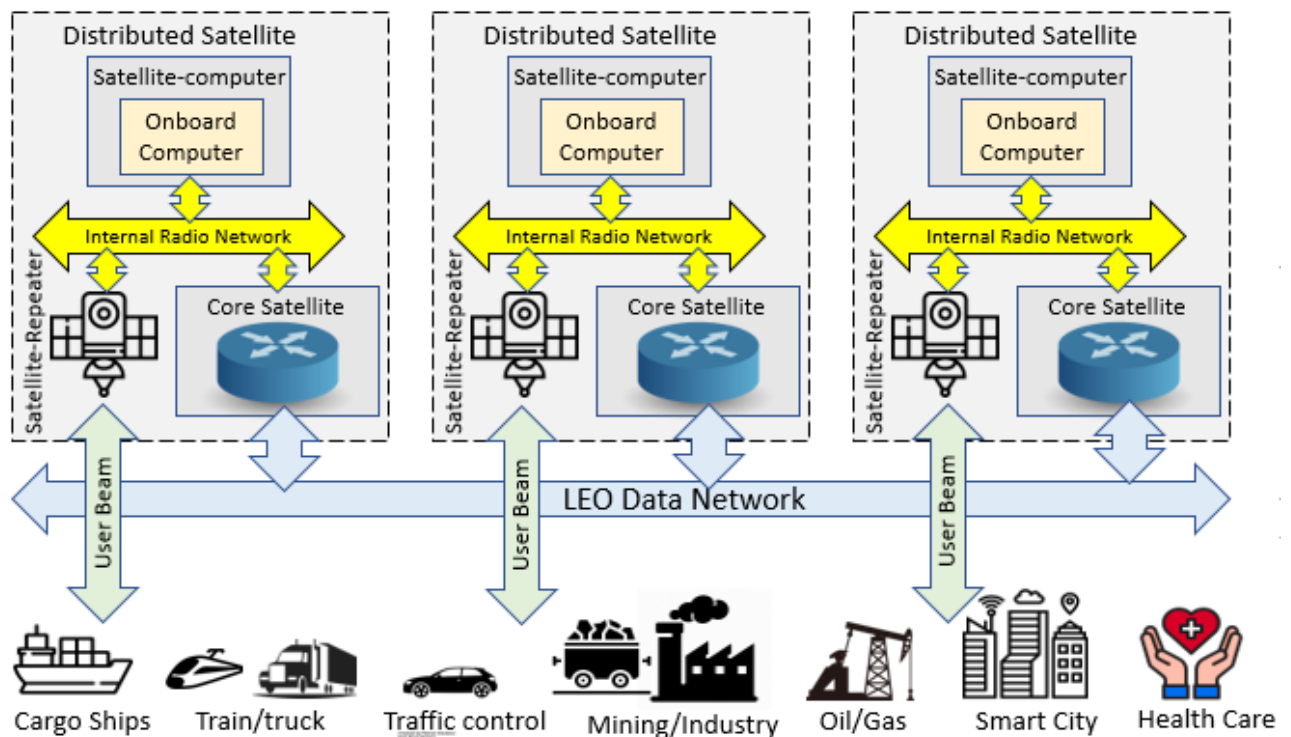


Рис. 3.8. LEO мережа передачі даних.

Обчислювальні модулі супутників-обчислювачів побудовані за принципом компактних серверів і оснащені власними модулями пам'яті. Дані, які зберігаються в довготривалій пам'яті корисного навантаження супутника,

формують розподілену базу даних супутникової системи. Ця база даних включає наступну інформацію: параметри пристроїв IoT, зокрема MAC- та IP-адреси, типи пристроїв, методи адресації, відповідні сервіси, поточні координати, а також характеристики у вигляді констант і коефіцієнтів ,програмне забезпечення для обробки даних IoT, як універсальне, так і адаптоване для окремих типів пристроїв, результати обробки даних від пристроїв IoT у режимі реального часу.

База даних структурована на дві частини: постійну (довготривалого зберігання) та оперативну (короткочасного використання). Постійна частина містить дані, актуальні протягом періоду, що перевищує один орбітальний оберт. Оперативна частина призначена для зберігання результатів обробки в реальному часі, прив'язана до конкретного сервісного регіону та представлена у вигляді Локалізованої Базы Даних.

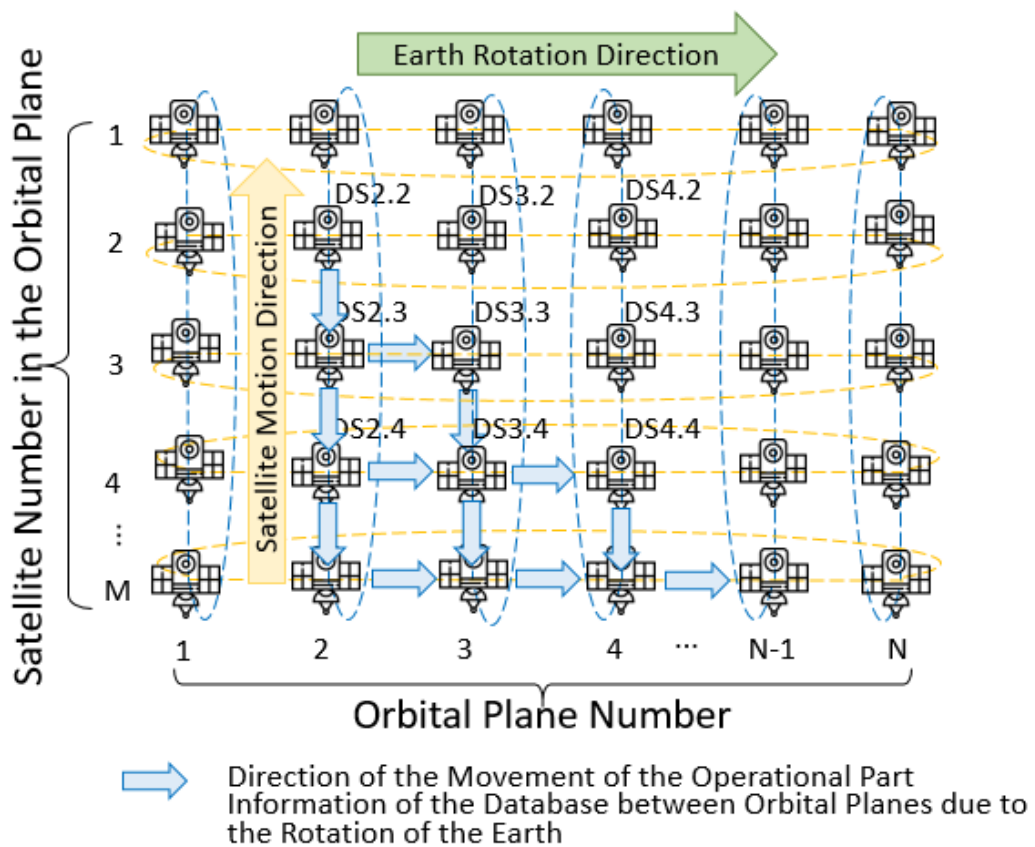


Рис. 3.9. Напрямок руху інформації баз даних між орбітальними площинами.

LEO супутникові системи характеризуються тим, що їх супутники здійснюють оберт навколо Землі з періодом, значно меншим за тривалість доби. Орбітальна площина LEO супутника змінює свою орієнтацію дуже повільно, тому протягом однієї доби її можна вважати практично сталою. У результаті обертання Землі навколо власної осі, смуга покриття кожної орбітальної площини поступово зсувається на захід. Пристрої IoT, які перебувають у межах цієї смуги, з часом потрапляють до зони покриття сусідньої орбітальної площини, розташованої східніше.

Щоб компенсувати таке зміщення, орбітальна мережа передачі даних реалізує механізм пересилання оперативної частини бази даних у напрямку, протилежному руху супутників, тобто на схід. Це дає змогу забезпечити безперервність надання послуг не лише в межах однієї орбітальної площини, а й по всій території, яку охоплює супутникова система загалом (рис. 3.9).

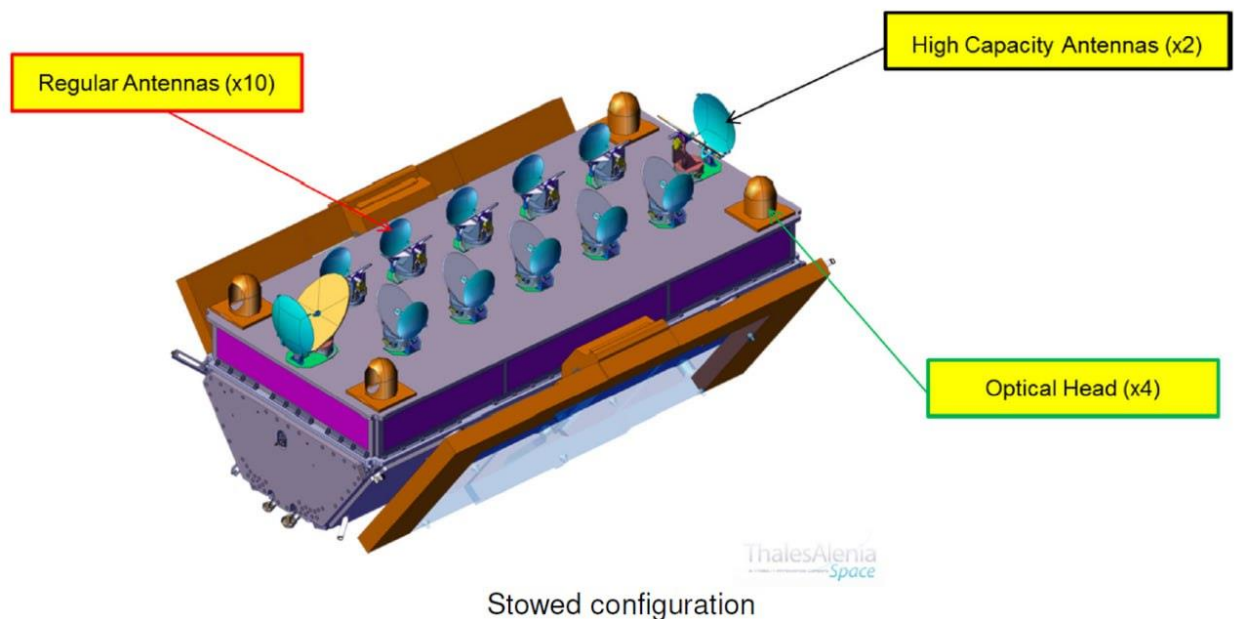


Рис. 3.10. Приклад розташування оптичних головок (Optical Header) в конструкції супутника

На рис. 3.10 зображено супутник у транспортній (стисненій) конфігурації, створений компанією Thales Alenia Space. Демонструється розташування різних елементів корисного навантаження на корпусі апарата.

У центральній частині платформи розміщено десять регулярних антен, які встановлені у два ряди. Вони позначені червоним прямокутником. На протилежних краях корпусу супутника розташовано дві антени з високою пропускною здатністю, виділені жовтим прямокутником. Крім того, на чотирьох кутах апарата встановлено чотири оптичні головки, що слугують для міжсупутникового зв'язку на основі лазерних технологій. Вони позначені зеленим прямокутником.

Ця конфігурація ілюструє, як компоненти системи зв'язку інтегруються у структуру супутника для забезпечення надійної та масштабованої передачі даних.

3.4 Взаємдія гео та лео складових із використанням оптичних лазерних ліній зв'язку

Таблиця 3.2.

Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Символи	Одиниці	Значення
Довжина хвилі	λ	нм	1550
Оптична ефективність	η_T		0.8
Оптична ефективність	η_R		0.8
Швидкість передачі даних	R_{data}	Гбіт/с	10
Діаметр антени приймача	D_R	мм	80
Помилка наведення передавача	θ_T	мкрад	1
Помилка наведення приймача	θ_R	мкрад	1
Кут розбіжності	Θ_T	мкрад	15
Чутливість приймача	P_{req}	дБм	-35.5
Частота бітових помилок			10^{-12}
Запас лінії	LM	дБ	3; 10
Довжина оптичної лінії	d_{ss}	км	1927
			36515
			41508

Таблиця 3.3.

Результати розрахунку. Запас лінії $LM = 10$ дБ

d_{SS} (km)	L_{PS} (dB)	P_T (dBm)	P_T (W)
1927	-263,88	28,06	0,639
36515	-289,43	53,61	229,61
41508	-290,54	54,72	296,48

Таблиця 3.4.

Результати розрахунку. Запас лінії $LM = 3$ дБ

d_{SS} (km)	L_{PS} (dB)	P_T (dBm)	P_T (W)
1927	-263,88	21,06	0,127
36515	-289,43	46,61	45,81
41508	-290,54	47,72	59,15

Висновки

1. Лазерні оптичні лінії зв'язку є ефективним засобом для організації зв'язку між супутниками у складі супутникових телекомунікаційних систем, які надає змогу передавати інформацію на швидкостях 10 Гбіт/с і вище. Такий засіб особливо ефективний для організації лінії зв'язку між супутниками, на які не впливають атмосфера Землі.

2. Запропоновано використовувати лазерні оптичні лінії зв'язку між супутниками у складі GEO сегменту, LEO сегменту та між GEO та LEO сегментами.

3. На підставі результатів досліджень у відкритих джерелах розроблена і використана методика розрахунку оптичної лазерної лінії зв'язку. Вихідними даними для розрахунку зокрема є довжина оптичної лінії, довжина хвилі випромінення, діаметр лінзи оптичного передавача-приймача.

4. Розроблена і розрахована модель орбітального угруповання супутників, на підставі якої визначені довжина лазерних оптичних ліній зв'язку між супутниками у складі GEO сегменту, LEO сегменту та між GEO та LEO сегментами.

5. Проведено розрахунки оптичних ліній зв'язку між супутниками для запасу лінії 3 дБ та 10 дБ. За розрахунками показано, що для забезпечення оптичних ліній зв'язку на швидкості 10 Гбіт/с між супутниками у складі LEO сегменту достатньо передавача оптичного/лазерного сигналу потужністю до 0,7 Вт. Для ліній GEO та LEO та ліній у складі GEO сегменту потужність випромінення зростає приблизно до 300 Вт. Для зменшення потужності можливе збільшення діаметрів передавальної та приймальної лінзи, а також перехід в діапазони з більшою довжиною хвилі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Архітектура мобільних мереж 5G активно розвивається в напрямку інтеграції неназемних мереж (NTN – Non-Terrestrial Networks), що дозволяє забезпечити глобальне покриття широкосмугового доступу. У Релізі 17 3GPP були закладені основи для включення супутникових сегментів до загальної архітектури 5G-NR, з урахуванням особливостей орбітального розташування (LEO, GEO). Це дозволяє користувачам отримувати зв'язок у важкодоступних регіонах (океани, пустелі, гірські райони), де традиційні наземні мережі неефективні або відсутні.

2. Для реалізації супутникової мережі Інтернету речей (IoT) було запропоновано трирівневу архітектуру, яка включає: Перший рівень - пристрої користувачів (UE), що взаємодіють із мережею безпосередньо або через термінали доступу. Другий рівень - низькоорбітальне угруповання супутників (LEO), яке виконує функції мережі радіодоступу (RAN). Третій рівень - геостационарні супутники (GEO), які виконують функції транспортної та кореневої мережі, включаючи хмарні дата-центри.

Цей підхід дозволяє перенести частину функціоналу з традиційного ядра (core network) ближче до краю мережі, підвищуючи ефективність обробки даних і скорочуючи затримки.

3. Для забезпечення високошвидкісного, надійного та малозатратного зв'язку в умовах вакууму космосу до архітектури орбітального угруповання запропоновано додати лазерні оптичні лінії зв'язку. Вони забезпечують передачу даних зі швидкістю до 200 Гбіт/с на відстані понад 3500 км, без впливу атмосферних перешкод. Оптичні міжсупутникові лінії реалізовані у трьох напрямках: між супутниками в межах LEO-сегменту, між супутниками GEO-сегменту, а також між LEO та GEO сегментами. Такий підхід суттєво підвищує швидкодію системи та дозволяє уникнути перевантаження наземних ретрансляторів.

4. З метою збільшення автономності та продуктивності супутникової системи запропоновано розміщення обчислювальних ресурсів у складі як GEO, так і LEO супутників. У складі GEO-сегменту передбачено наявність супутників-хмарних дата-центрів, які базуються на процесорах Intel® Xeon® 6, здатних виконувати як класичні, так і штучно-інтелектуальні обчислення. У складі LEO-сегменту передбачено використання Fog- і Edge-обчислювачів, також побудованих на Intel® Xeon® 6, що дозволяє зменшити затримки, зменшити навантаження на центральну мережу та забезпечити обробку даних ближче до джерела їх виникнення.

5. На основі аналізу наукових публікацій та відкритих джерел була розроблена методика розрахунку параметрів оптичної лінії зв'язку, яка враховує такі вхідні параметри: довжину хвилі, відстань між супутниками, діаметр передавальної та приймальної лінзи, потужність лазера, втрати лінії. За результатами: Для LEO–LEO зв'язку достатньо лазерного передавача потужністю до 0,7 Вт. Для зв'язку між LEO та GEO, а також GEO–GEO потрібно збільшити потужність до 300 Вт. Оптимізація можлива шляхом збільшення діаметрів лінз або використання довших хвильових діапазонів, що дозволяє зменшити втрати на трасі. Ці результати підтверджують ефективність оптичного зв'язку як перспективної технології для міжсупутникових комунікацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Content Delivery over 5G Non-Terrestrial Networks [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://5g-mag.com/post/content-delivery-over-5g-non-terrestrial-networks>
2. A Service Function Chain Deployment Scheme of the Software Defined Satellite Network [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://onlinelibrary.wiley.com/>
3. 5G NR Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards / Sassan Ahmadi., 2019.
4. 5G NR. The Next Generation Wireless Access Technology / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold., 2018.
5. Introduction to 3GPP and 3GPP 5G Releases 15, 16 and 17 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ivezic.com/miot-5g/5g-3gpp-releases-15-16-17/>
6. Non-Terrestrial Network Technology from a 3GPP Perspective [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21252945/rohde-schwarz-nonterrestrial-network-technology-from-a-3gpp-perspective>
7. Towards the All Optical satellite communications system [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://nebula.esa.int/sites/default/files/neb_study/1276/C4000117594ExS.pdf
8. Design of a Standardized Inter Satellite Optical Wireless Communication (IsOWC) System with Minimum Input Power / Published by Elsevier L.
9. Optical inter-satellite link terminals for next generation satellite constellations / Carlos Carrizo, Markus Knappek, Joachim Horwath, Dionisio Diaz Gonzalez, and Paul Cornwell Mynaric, Dornierstrasse 19, 82205 Gilching, Germany
10. Intel Xeon 6 - 128 Cores of Performance, 144 Cores of Efficiency [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.exxactcorp.com/blog/news/intel-xeon-6-128-cores-of-performance-144-cores-of-efficiency>

11. Intel® Xeon® 6 Processor Family Product Brief [Электронный ресурс] -

Режим доступа до ресурсу:

<https://www.intel.com/content/www/us/en/content-details/845771/intel-xeon-6-processor-family-product-brief.html>

12. Starlink [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

<https://www.starlink.com/ua/specifications>

13. Free Space Optical FSO Satellite Networks Performance Analysis

Transmission / [Электронный ресурс] - Режим доступа до ресурсу:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10354376>

14. Eutelsat OneWeb [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

<https://oneweb.net>

15. Telesat Lightspeed [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

<https://www.telesat.com>