

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

**Інститут телекомунікаційних систем  
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж**

До захисту допущено:  
В.о. завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ Лариса ГЛОБА  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

**Дипломна робота  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні  
технології»  
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
на тему: «Аналіз роботи систем супутникового зв'язку на низькій орбіті»**

Виконав:  
студент ІV курсу, групи ТІ-71  
Биков Павло Ігорович \_\_\_\_\_

Керівник:  
доцент кафедри ІТМ, к.т.н., доцент  
Кононова Ірина Віталіївна \_\_\_\_\_

Рецензент:  
Доцент кафедри ТС, к.т.н., доцент  
Максимов Володимир Васильович \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

## ВСТУП

На сьогодні більшість супутників (66%) займають низьку орбіту Землі. Через невелику віддаленість від поверхні нам відкриваються нові можливості використання каналу супутникового зв'язку, а саме, широкосмуговий доступ до мережі інтернет, який сьогодні в основному реалізують за допомогою наземних ліній зв'язку. Нерівномірність густоти населення та інші фактори, викликають проблеми через які близько половини населення планети наразі не має доступу до мережі інтернет, головна з яких - відсутність комерційного інтересу та нерентабельність прокладання наземних телекомунікаційних мереж до менш розвинутих та густонаселених регіонів. При таких умовах значна частина населення Землі ніколи не отримає доступу до швидкісного інтернету через неймовірні витрати на прокладення таких мереж. Існуючі супутникові системи зв'язку (ССЗ) на геостаціонарній орбіті через низьку швидкість і велику затримку не можуть задовольнити сучасних потреб, враховуючи необхідність мати з'єднання в режимі реального часу та тенденції на постійне збільшення потоку інформації на одного користувача.

Нова концепція розгортання низькоорбітальних ССЗ передбачає покриття променями малих супутників швидкісного інтернету всієї площі Землі. Вже зараз сфера низькоорбітальних супутників зв'язку набуває високої конкуренції серед гравців ринку телекомунікацій, зацікавлених в кращих параметрах мережі при нижчій вартості розгортання та обслуговування. Поточний етап розвитку даних систем знаходиться на початковій стадії. Вже функціонують перші супутники системи Starlink, в процесі розгортання глобальні системи OneWeb та Beidou, протягом декади планується запуск супутників "Сфера". Аналіз та прорахунок однієї з таких систем проведений в даній роботі, розглянуто основні принципи функціонування та приклад використання таких систем в нашій країні.

## АНОТАЦІЯ

Робота містить 76 сторінок, 26 рисунків, 3 таблиці та 2 додатки. Було використано 71 джерело.

**Актуальність роботи:** Сучасні телекомунікаційні мережі в будь-якій країні світу представлені в основному наземними ВОЛЗ, кабельними мережами DSL/ADSL, та радіочастотними каналами передачі даних. Кожного року таких мереж стає все більше, зростає кількість абонентів та мережевого трафіку, вимоги до якості зв'язку та швидкості передачі даних збільшуються. Згадані типи наземних мереж не розповсюджені в областях з малою густиною населення, або у малонаселених районах, які займають більшу частину земної поверхні. Для вирішення проблем доступності всесвітньої мережі необхідні кардинально нові рішення, які будуть одноково привабливими для постачальників послуг та їх клієнтів.

**Метою роботи** є аналіз існуючих рішень в сфері низькоорбітальних ССЗ та дослідження систем що знаходяться в процесі розгортання. В кінцевому результаті проведення моделювання однієї з таких систем що буде надавати послуги на території нашої країни.

### **Задачі дослідження:**

- провести аналіз існуючих рішень та технологій мережевої взаємодії.
- провести огляд сучасних систем супутникового зв'язку та їх порівняння
- розглянути принципи функціонування ССЗ,
- провести точний аналіз та моделювання роботи однієї з таких систем.

**Об'єкт дослідження:** Угрупування системи супутникового зв'язку низької навколосемної орбіти «Starlink»

**Предмет дослідження:** Канал передачі даних та принцип функціонування супутникового угруповання.

**Наукова новизна:** моделювання роботи супутникового сузір'я на території нашої країни.

**Практична значимість:** можливість розглянути використання ССЗ низької навколоземної орбіти для використання в сфері послуг широкосмугового телекомунікаційного зв'язку, що раніше не представляло комерційного інтересу.

**Ключові слова:** низькоорбітальні ССЗ, супутникові сузір'я, Starlink.

## ANOTATION

The work contains 76 pages, 26 figures and 3 tables and 2 applications. 71 sources were used.

**Relevance:** Modern telecommunication networks in any country of the world are represented mainly by terrestrial fiber optics, DSL / ADSL cable networks, and radio frequency sensors. Every year, such networks become wider, increase amount of subscribers and the network traffic, the requirements for network quality and bandwidth are increasing. These types of terrestrial networks are uncommon in areas with low population density, or in sparsely populated areas that occupy most of the earth's surface. To resolve the problems of the World Wide Web availability, radically new solutions are needed that will be equally attractive to service providers and their customers.

**The aim of the work:** analyze the existing solutions in the field of low-orbit GCC and systems in the process of deployment. Final result is modeling one of such system that will be provide services in our country.

**Research objectives:**

- to carry out analytical economics and technologies of network interaction.
- to review modern satellite communication systems and compare them
- consider the operation principles the GCC
- to analyse and modeling of one such system.

**Object of research:** Constellation of Low Earth orbit satelites "Starlink"

**Subject of research:** Data transmission channel and operation principles of the satellite group.

**Scientific novelty:** modeling the operation of a complete satellite constellation.

**Practical significance:** the possibility of considering the use of low-Earth orbit GCCs for use in broadband telecommunications services, which has not commercial interest earlier. The possibility of considering the use of low-Earth orbit GCC for providing services. **Keywords:** low-orbit GCC, Starlink.

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВОЛЗ	волоконно-оптичні лінії зв'язку
КА	космічний апарат
МКА	малий космічний апарат
СТС	супутникові телекомунікаційні системи
ЦЗС	центральна земна станція
BATS	(Broadband Access via integrated Terrestrial and Satellite systems) - широкопasmовий доступ через інтегровані наземні та супутникові системи.
DAMA	(Demand Assigned Multiple Access) - Багаторазовий доступ за потребою
DR	(Delay Report) - звіт затримки
DTN	(Delay-tolerant networking) - мережа стійка до затримок
DVB	(Digital Video Broadcasting) Цифрове телевізійне мовлення
DVMRP	(Distance Vector Multicast Routing Protocol) - Протокол дистанційно-векторної багатоадресної маршрутизації
FTDMA	(Frequency Time Division Multiple Access) – частотно-часове розділення, множинний доступ.
GEO	(Geostacionary Earth Orbit) - геостационарна орбіта
HAP	(Hight Atitude Platform) - висотна платформа
HES	(Hybrid Earth Station) - гібридна Земна станція
IETF	(Internet Engineering Task Force) – інженерна рада інтернету
IOL	(Inter-Orbit Link) - міжорбітальний лінк
IP	(Internet Protocol) - інтернет протокол
ISL	(Inter-Satellite Link) - міжсупутниковий лінк
LEO	(Low Earth Orbit) - низькоорбітальна орбіта
M2M	(Machine to Machine) - машино-машинна взаємодія
MEO	(Medium Earth Orbit) - середня орбіта

MPLS	(Multiprotocol Label Switching) - багатопрокольна комутація за мітками
OSPF	(Open Shortest Path First) - спочатку відкритий найкоротший шлях
RIP	(Routing Information Protocol) - протокол маршрутної інформації
SGRP	(Satellite Grouping and Routing Protocol) – протокол супутникового групування та маршрутизації
SPF	(Shortest Path First) – спочатку найкоротший шлях
TCP	(Transmission Control Protocol) - протокол керування передачею
TDM	(Time Division Multiplexing) – мультиплексування з розподілом часу
UDL	(User Data Link) - лінк користувацьких даних
UDP	(User Datagram Protocol) - протокол датаграм користувача
VSAT	(Very Small Aperture Terminal) - термінал супутникового зв'язку з малою антеною

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	2
<b>АНОТАЦІЯ</b> .....	3
<b>РОЗДІЛ 1. ІСНУЮЧІ СИСТЕМИ ССЗ, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ</b> .....	9
<b>1.1 Способи надання послуг широкосмугового доступу до мережі інтернет</b>	9
<b>РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ ДО МЕРЕЖІ ІНТЕРЕНЕТ - НИЗЬКООРБІТАЛЬНІ СУПУТНИКИ</b> .....	29
<b>2.1 Маршрутизація супутникового трафіку</b> .....	29
<b>РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ НИЗЬКООРБІТАЛЬНОГО УГРУПУВАННЯ СУПУТНИКІВ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ</b> .....	53
<b>3.1 Технічний опис супутникового угруповання «Starlink» та вхідні данні</b> ...	53
<b>3.3 Бізнес-моделі та архітектура проекту Starlink.</b> .....	63
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ</b> .....	66
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	68
Додаток А .....	74
Додаток Б.....	75



## РОЗДІЛ 1

### ІСНУЮЧІ СИСТЕМИ ССЗ, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

#### 1.1 Способи надання послуг широкопasmового доступу до мережі інтернет

Головною особливістю телекомунікаційних провідних систем є можливість створення певного штучного середовища для поширення електромагнітних хвиль, що дає змогу оптимізувати це середовище з метою досягнення найбільшої пропускної здатності. Саме в процесі оптимізації відбувався розвиток провідного зв'язку від мідного проводу і коаксіального кабелю до волоконно-оптичної лінії зв'язку.

На рис. 1.1. показано пропускну здатність різних середовищ передачі кабельних ліній зв'язку. Як бачимо, найбільш перспективне застосування для створення магістральних каналів мають волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ). Їх основні переваги:

- широка смуга пропускання;
- низький рівень загасання сигналу при розповсюдженні;
- відсутність власних зовнішніх електромагнітних випромінювань;
- можливість повного діелектричного виконання волоконно-оптичних кабелів.

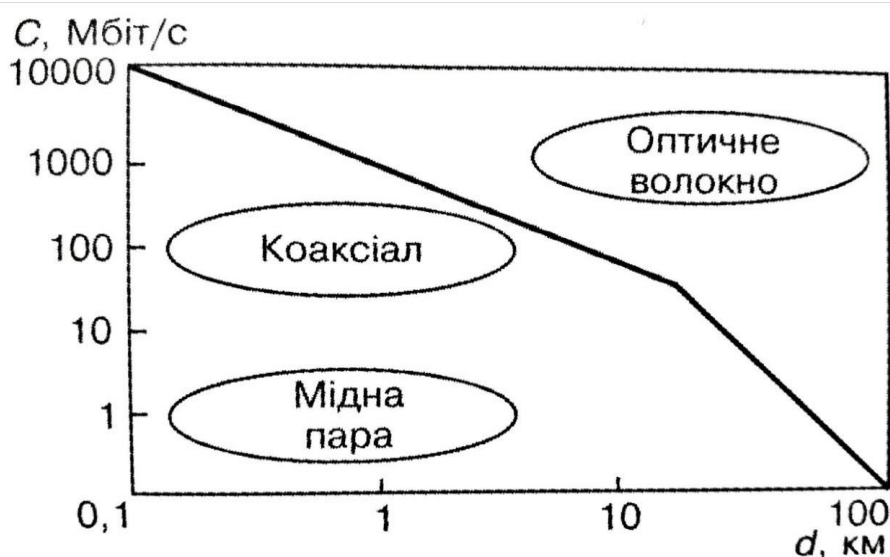


Рис. 1.1. Пропускна здатність різних середовищ

Ці переваги дають змогу створювати лінії зв'язку без регенеративних пристроїв довжиною понад 600 км. Повне діелектричне виконання забезпечує нечутливість до електромагнітних завад, тобто дає можливість усунути проблеми блукаючих струмів, корозії, грозозахисту, а отже, прокласти такі лінії, наприклад, у смузі залізниць або підвішувати кабелі на контактні опори ліній електропередач. Відсутність власних зовнішніх електромагнітних випромінювань не лише вирішує проблему впливу на інші кабелі зв'язку, а й забезпечує захищеність від перехоплення переданих повідомлень без механічного впливу на ВОЛЗ.

Сьогодні найбільше поширення набули одномодові волоконно-оптичні кабелі. Фактично максимальна пропускна здатність таких мереж сягає 5 Тбіт/с.

Розглянемо кілька прикладів практичної реалізації оптичних мереж в Україні. На даний час найбільшим власником оптичної мережі в Україні є акціонерна компанія з державним капіталом «Укртелеком», яка займає близько 80 % ринку послуг фіксованої телефонії та обслуговує понад 10,8 млн абонентів. Загальна довжина мережі волоконно-оптичних ліній зв'язку Укртелекому сягає 48 тисяч кілометрів. При цьому по кожній оптоволоконній парі можна передавати до восьми каналів по 2,5 Гбіт/с. [1]

Транспортна інфраструктура України розвивається також альтернативними операторами зв'язку. Зокрема, компанія «Атраком» будує оптоволоконні мережі в Україні для потреб операторів. На сьогодні ця мережа об'єднує близько 19 тис. км побудованих волоконно-оптичних ліній зв'язку і є найбільш розгалуженою в Україні. Частина мережі «Атраком» слугує основою для створення оптоволоконної магістралі передачі даних за технологією DWDM для оператора стільникового мобільного зв'язку «Beeline». Великі населені пункти і регіони України покриває оптична мережа компанії «Євротранстелеком». Волоконно-оптичний кабель прокладено в ґрунті в зоні залізниць України, що охороняється; це забезпечує високу надійність мережі. У мережі використовуються новітні

оптичні рішення компанії Nortel Networks. Лінійна швидкість передачі становить 2,5 Гбіт/с з можливістю її збільшення.

Розглянемо конкурентні переваги та недоліки супутникових систем зв'язку. Для супутникового зв'язку і мовлення характерна циклічність, пов'язана з дуже тривалим терміном розробки продукту та відповідного обладнання, супутника на орбіті, виведенням його на ринок, а також обмеженим періодом функціонування супутника на орбіті.

Наприклад, за оцінкою компанії Cisco Systems світовий обсяг IP-трафіку за 2021р. досягне 3,3 зеттабайт [2], при цьому в країнах і регіонах, що розвиваються, галузь телекомунікацій найбільше залежить від наявності супутникових магістральних каналів.

## 1.2. Аналіз систем геостаціонарного супутникового зв'язку

Радіорелейні та супутникові системи зв'язку. Для супутникового зв'язку і мовлення характерна циклічність, пов'язана з дуже тривалим терміном розробки продукту та відповідного обладнання, виведенням його на ринок, а також обмеженим періодом функціонування супутника на орбіті. На даний час глобальними показниками у галузі телекомунікацій, що впливають на ринок супутникового зв'язку, є:

1. збільшення, незважаючи на економічну кризу, попиту на послуги космічного зв'язку в світовому масштабі;
2. зростання абонентської бази в країнах Східної Європи, Азії та Південної Америки;
3. збільшення попиту на ТБ сервіси та тематичні послуги;
4. різке зростання трафіка в мережах передачі даних, зумовлене розвитком Інтернет-технологій;
5. інтеграція наземних мереж GSM і супутникових мереж зв'язку в прозору для користувача гібридну глобальну систему зв'язку.

Характеристика галузі супутникових систем. Постійна тенденція зростання попиту на послуги супутникового зв'язку і мовлення обумовлена такими факторами:

- глобалізацією економічної активності, що приводить до розширення географічної зони діяльності великих компаній та їх мережної інфраструктури. Крім того, глобалізація сприяє зростанню попиту на послуги з боку урядів з метою здійснення ними дипломатичної діяльності, а також з боку військових структур, міжнародних місій та організацій;

- наявністю комунікаційного простору і можливістю широкопasmового доступу, що є суттєвими елементами інфраструктури, без якої неможливе економічне зростання у будь-якій країні;

- зростанням обсягу контенту і розробкою нових форматів і стандартів його передачі, що призводить до підвищення вимог до ширини займаної смуги частот, з урахуванням того, що виробники контенту зацікавлені в максимальному охопленні потенційної аудиторії на основі різних технологій передачі відео і ТБ.

- розширення асортименту мобільних застосувань, включаючи безпроводові послуги передачі даних, морського зв'язку, зв'язку в літаках, а також різні голосові послуги і послуги доступу до Інтернету на ринках з низьким рівнем проникнення фіксованої телефонії.

Супутникові системи Ка-діапазону мають вирішують завдання доставки відеоконтенту, в тому числі для центральних і локальних серверів Інтернету, бо наземні мережі насилу справляються з ним. Геостаціонарна система рухомого супутникового зв'язку Inmarsat стала серйозним конкурентом традиційним системам зв'язку за деякими базовими послугами, включаючи передачу даних і доступ до Інтернету, Поява на ринку нової системи великої ємності O3b навряд чи змінить співвідношення між супутниковими системами на геостаціонарних орбітах і низькоорбітальними системами рухомого супутникового зв'язку, незважаючи на те, що система O3b дає змогу зменшити головний недолік використання геостаціонарних супутників — затримку сигналу і, як наслідок, затримку в доставці IP-пакетів.

Супутникові телекомунікаційні системи (СТС) мають унікальні особливості, що вигідно вирізняють їх серед інших систем телекомунікацій. При

цьому СТС активно конкурують з наземними системами та доповнюють їх (рис. 1.2).

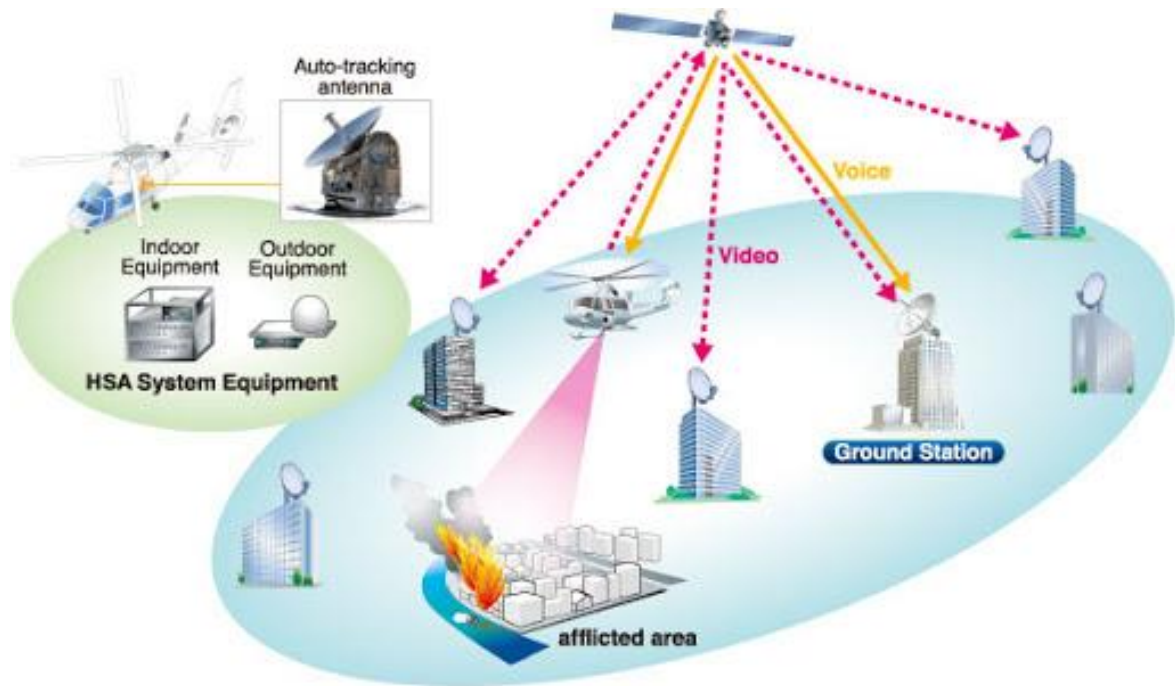


Рис. 1.2. Загальна схема зв'язку СТС

На даний час можна виділити такі основні особливості сучасних СТС:

Велика зона обслуговування (покриття) — дає можливість організувати зв'язок між географічно віддаленими об'єктами, в тому числі розташованими у важкодоступних районах, і охоплювати велику глядацьку аудиторію при трансляції ширококомовних програм.

Висока швидкість і вірогідність передачі інформації — робота через сучасний геостаціонарний супутник можлива на швидкості одиничних цифрових каналів до 155 Мбіт/с при малій імовірності помилки.

Конфіденційність системи — використовуються спеціальні методи кодування при передачі інформації між вузлами СТС. Для кожного вузла виділяється свій канал зв'язку, а перехоплення інформації вимагає колосальних витрат і тому економічно не вигідне.

Висока надійність супутникових каналів — дає змогу використовувати і для резервування окремих ділянок наземних мереж. Середній час напрацювання на

відмову для малогабаритної термінальної станції VSAT (Very Small Aperture Terminal) перевищує 100 000 год, а термін активного існування сучасних геостаціонарних супутників досягає 10-15 років.

Полізаastosування — СТС може одночасно використовуватися як комерційними, так і державними структурами.

Інтеграція послуг — по супутникових мережах передаються дані, голос, відео, підтримуються практично всі комунікаційні інтерфейси і протоколи. СТС можуть використовуватися для надання послуг глобальної мережі Інтернет, ретрансляції телевізійних каналів, замовлення авіаційних і залізничних квитків, проведення лотерей, визначення координат тощо.

Експлуатаційна гнучкість — свобода маневру пропускнуою здатністю, можливість оперативно додавати і відкидати вузли, змінювати конфігурацію переданого трафіка, простота контролю і діагностики роботи устаткування.

Швидкість розгортання — мають найкоротший термін розгортання (3-4 год.), забезпечують дальність каналів зв'язку за істотно менших порівняно з наземними мережами капітальних витрат.

Рішення проблеми «останньої милі» — малогабаритні наземні станції VSAT можна встановлювати поблизу мережного і кінцевого устаткування користувача.

Висока економічна ефективність — вартість передачі трафіка по супутниковому каналу практично не залежить від відстані між кореспондентами. В інших систем СТС відрізняються малими експлуатаційними витратами, докато ним характером будівництва і відносно недорогим устаткуванням.

Аналіз сучасного стану розвитку СТС показує, що як головні технології для перспективних СТС визначено сполучення двох технологій:

- застосування зв'язних високопродуктивних бортових процесорів
- застосування бортових багатопроменевих антенних систем.

Основна перевага таких ретрансляторів - універсальність супутника. Нові технології не відкидають традиційне рішення. Вони покликані розумно його доповнювати. У результаті частину стовбурів корисного навантаження перспективних супутників комерційного призначення пропонується виконати за

традиційною схемою з прямою ретрансляцією інформації, а частину стовбурів — з обробкою і комутацією на борту. Для супутників, що мають міжконтинентальні робочі зони (типу Intelsat), традиційно застосовуються антени з контурною діаграмою спрямованості, які формують кілька окремих променів, розв'язаних між собою в просторі саме за рахунок властивості високого (більше 27 дБ) придушення бічних пелюстків контурної антени.

Очевидно, що досягнення високого рівня визначає додаткові фінансові витрати на створення супутника. Для зменшення вартості та технічних проблем приймається компромісне рішення, що передбачає створення ретрансляційної апаратури корисного навантаження частково з прямою ретрансляцією, а частково з обробкою на борту. Такий підхід забезпечує економію витрат і спадковість рішень, прийнятих під час розвитку наземного сегмента в попередній період. Один із недоліків ретрансляційних стовбурів з обробкою на борту - неуніверсальність, яка проявляється в тому, що прийняту при створенні ретрансляційної апаратури технологію обробки інформації мають підтримувати також усі наземні термінали, що працюють використовуючи ресурси даного супутника.

При організації доступу до Інтернету через системи прямого мовлення виникає проблема забезпечення односпрямованої маршрутизації, що не може бути вирішена традиційними протоколами маршрутизації, розрахованими на дуплексні канали зв'язку. Існує два напрямки вирішення даної проблеми — модифікація протоколів маршрутизації і тунелювання трафіка. В рамках проблемної групи Інтернет-проекування IETF (Internet Engineering Task Force) організована робоча група UDLR (Unidirectional Link Routing) для розробки відповідного протоколу. Модифікований протокол має забезпечувати можливість маршрутизатору-приймачу (з приймального боку однонаправленого каналу) ідентифікувати маршрутизатор-передавач (з передавального боку однонаправленого каналу) щоразу, коли одержує від нього оновлену службову інформацію. Крім того, маршрутизатор-приймач періодично має сам відправляти свої службові повідомлення всім маршрутизаторам-передавачам

наземними зворотними каналами зв'язку. Коли маршрутизатор-передавач одержує маршрутну інформацію, він оновлює відповідний запис у своїй таблиці маршрутизації. Ця ідея використана робочою групою UDLR для модифікації таких поширених протоколів, як протокол маршрутної інформації RIP (Routing Information Protocol), відкритий протокол алгоритму кращого вибору найкоротшого маршруту OSPF (Open Shortest Path First) і протокол багатоадресної маршрутизації за вектором відстані DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol) [3]. За допомогою тунелювання трафіка робиться спроба сховати від процесу маршрутизації асиметричність використовуваних каналів. Між системою прямого мовлення і терміналом користувача за допомогою процедур інкапсуляції/декапсуляції емулюється віртуальна двонаправлена лінія. Вона і є тунелем, яким передаються пакети, призначені для передачі інформації від користувача до системи DBS. Наприкінці тунелю на стороні користувача пакети спочатку інкапсулюються, а потім обробляються протоколом маршрутизації, що направляє їх реальними зворотними наземними каналами. Пакети, що прибувають на сторону системи прямого мовлення, перехоплюються і декапсулюються, а потім обробляються протоколом маршрутизації, для якого вони виглядають так, начебто прибули двонаправленим каналом. Однак розглянуті схеми модифікації і тунелювання є досить простими і можуть застосовуватися стосовно однонаправлених каналів типу «точка-точка», хоча за своєю природою супутникові системи та оптимізація рішень для такої мережної архітектури вимагає подальшого вивчення. Зокрема, потребує вирішення проблема стосовно того, що в IP-мережах відсутні засоби ефективного керування трафіком і ефективного використання альтернативних маршрутів; в IP-мережах не допускається перетинання адресного плану і розподіл трафіка клієнтів для побудови віртуальних приватних мереж, що виключає можливість підключення клієнтів з однаковою адресацією; маршрутизація в IP-мережах виконується на порядок повільніше комутації внаслідок порівняно більшого часу аналізу IP-заголовка. Для розв'язання таких



задач розроблено архітектуру багатопроTOCOLЬНОЇ комутації за мітками MPLS (Multiprotocol Label Switching) [4].

Як транспортні Інтернет-протоколи широке застосування знайшли протоколи TCP і UDP. Однак їх ефективність у супутникових каналах різко знижується через наявні значні затримки і високий рівень каналних помилок.

Для організації мереж за топологією типу «зірка» і більшою кількістю абонентських терміналів із низьким навантаженням найефективнішими вважаються технології TDMDMA і FTDMA. В таких мережах усі термінали прямо (в один супутниковий стрибок) взаємодіють лише з ЦЗС. Завдяки ньому з'являється можливість застосовувати малопотужні і недорогі термінали і компенсувати низькі значення їх енергетичних характеристик установкою на ЦЗС антени великого діаметра (5 м і більше) і потужного передача. Наприклад, для роботи з супутником «Експрес -6А» в Ku-діапазоні можна використовувати термінали TDM/TDMA або FDMA з антеною діаметром 1,8 м і прийомопередавачем потужністю 1 Вт. У такий спосіб вдається істотно зменшити вартість реалізації проектів з більшою кількістю терміналів. Крім високих енергетичних характеристик ЦЗС повинна мати і високий рівень надійності, бо від стану цієї станції залежить функціонування мережі. Все це плюс наявність засобів керування мережею обумовлює високу вартість ЦЗС. Найбільш поширеними в усьому світі системами, на основі яких будуються мережі, є системи PES (Personal Earth Station) фірми Hughes Network System (США) і Skystar Advantage компанії Gilat (Ізраїль), які реалізують технології TDM/TDMA і FTDMA відповідно. Для побудови більших мереж з низьким навантаженням, призначених для передачі даних і організації телефонного зв'язку між периферійними терміналами, доцільно використовувати систему, що об'єднує технології TDM/TDMA (для передачі даних) і DAMA (для телефонії), або систему на базі технології FTDMA, що забезпечує зв'язок типу «кожний з кожним». Термінали цих систем коштують дорожче ніж, наприклад, термінали мереж з топологією типу «зірка», оскільки в них реалізовано додатковий режим роботи DAMA. До того ж для взаємодії один з одним вони повинні мати вищі

енергетичні характеристики. При використанні ретрансляторів Ku-діапазону, мінімальний діаметр антени для ЗС типу DAMA становить 2,4 м. Системи HES (Hybrid Earth Station) фірми Hughes Network System і Nextar AA/TDMA-BOD корпорації NEC підтримують технології TDMDMA і DAMA, а система FaraWay фірми Gilat заснована на технології FTDMA [5].

Окрему групу утворюють супутникові мережі, що забезпечують широкопasmовий доступ до інтернету. Вони характеризуються значною асиметрією трафіка: обсяг інформації, яка пересилається з усіх абонентських терміналів на ЦЗС, у 3-10 разів менше обсягу інформації, передано самою ЦЗС. У цих мережах для передачі високошвидкісного (до 40 Мбіт/с) потоку даних від ЗС до абонентських терміналів використовується широко застосована в цифровому телебаченні технологія DVB, а доступ терміналів до супутникового сегмента (для передачі даних на ЦЗС) здійснюється за технологією TDMA або FTDMA.

Технології мереж широкопasmового доступу до стосовні й для дистанційного навчання або телемедицини, але лише у випадку, коли необхідно транслювати відеозображення в одному напрямку - від ЦЗС, а зв'язок у зворотному напрямку може бути обмежений передачею текстових запитів або телефонних повідомлень. Унаслідок швидкого зростання потреб підприємств та індивідуальних користувачів у доступі до Інтернету на ринку з'явилися спеціальні системи, призначені вирішити це завдання. До них належать DirecWay фірми Hughes Network System і SkyBlaster компанії Gilat (обидві підтримують технологію DVB), LinkWayIP (реалізує технологію MF-TDMA) компанії Comsat, яка нещодавно ввійшла до складу фірми Viasat. Користувачами мереж є компанії, яким для передачі даних та організації кількох телефонних каналів потрібні ЗС з пропускною здатністю 32—256 кбіт/с. Таке устаткування може застосовуватися також для організації дистанційного навчання і телемедицини. В мережах з середнім навантаженням широко використовуються протоколи Frame Relay або IP, а їх топології («зірка» або «ієрархічна зірка» з підтримкою станцій від 10 до 100) відображають структуру підприємств.

На сьогодні спостерігається значне зростання реалізації послуг широкопasmового радіодоступу та передачі даних. У сфері широкопasmової передачі даних і суміжній з нею сфері послуг супутникового Інтернету основні перспективи розвитку телекомунікаційного ринку України пов'язані з поширенням сучасних високоефективних стандартів передачі даних, які є головним чинником у забезпеченні універсальності і максимальної доступності пропонованих послуг.

Аналіз малогабаритних супутників та наносупутників. Перевагу отримало створення малих космічних апаратів порівняно з великогабаритними і важкими космічними апаратами (КА) (масою більше 3 т). У результаті розпочатого та інтенсивно триваючого процесу мініатюризації КА вдалося зменшити маси деяких важких і великих КА, створити нові апарати аналогічного призначення з масою в кілька сотень кілограм, тобто з'явився клас малих космічних апаратів (МКА). Згідно з класифікацією [6] до тяжких, середніх і легких КА належать апарати масою понад 500 кг. Для супутників масою менше 500 кг прийнята така міжнародна класифікація:

- мінісупутники (100—500 кг);
- мікросупутники (10—100 кг);
- наносупутники (1—10 кг);
- пікосупутники (0,1—1 кг);
- фемтосупутники (до 100 г).

Створення МКА вирізняється збільшенням частки мініатюризації електроніки та обчислювальної техніки, наявністю нових підходів до організації архітектури КА і процесу проектування, виготовлення, випробування і запуску, забезпеченням надійного функціонування КА в поєднанні з широким застосуванням уніфікації та новітньої електронної бази серійного виробництва. МКА мають помітні переваги над великими і важкими космічними апаратами, а саме:

- економічна ефективність цільового використання МКА на висотах функціонування до 1000 км і особливо на висотах 200—500 км, на яких термін

активного існування важких КА без застосування відповідних засобів корекції орбіти досить малий.

- відповідність технології створення МКА стратегії скорочення витрат і ризиків;
- можливість швидкої модифікації для вирішення широкого кола завдань з різним цільовим призначенням;
- менший власний гравітаційний, електромагнітний і газовий (зовнішня атмосфера, фон, що дає змогу знизити ступінь впливу супутників платформи на роботу цільового корисного навантаження; + порівняно малий термін розробки цільового;
- можливість оперативного і прихованого запуску МКА з будь-якої точки земної кулі (в тому числі з використанням рухомих ракетних комплексів) за допомогою ракет-носіїв (РН) підземного, повітряного базування при високій оперативності підготовки до запуску;
- здешевлення щодо виведення на орбіту та орбітальної експлуатації МКА. Створення МКА дає змогу частіше проводити запуски, і при цьому:
  - розширювати можливості участі в проектах молодих вчених, а також студентської молоді та широкої науково-технічної громадськості;
  - прискорити використання в подальших програмах та проектах новітніх отриманих науково-технічних результатів.

Скорочення часового циклу, пов'язаного з реалізацією проекту, дає можливість:

- використовувати новітні інженерні засоби і поліпшити технологію керування;
- зменшити основний час розробки, відмовитися від неефективних або дубльованих процесів.

Використання нових технологій дає змогу:

- розширити можливості для їх впровадження;
- збільшити обсяг отриманої різнобічної інформації та привернути увагу до космічних досліджень;

- зменшити розміри КА і як результат загальну вартість проекту. В останній час найбільшу увагу серед МКА набувають наносупутники. Вони дають можливість проводити оперативні польотні випробування наукового корисного навантаження. Перевагами таких апаратів є їхня низька вартість, короткий час циклу розробки і створення корисного навантаження, недоліком є обмежені технічні можливості: неоптимальні орбіти (досить часто), незручне виведення на орбіту і, звичайно, дуже мала спроможність передачі даних на Землю.

Стан розвитку супутникового зв'язку в Україні. Стан розвитку супутникового зв'язку в Україні варто розглянути на прикладі двох найбільших супутникових операторів компаній «Укрсат» і «Датасат», які мають власні потужні телепорти з центрами керування супутниковим зв'язком. Акціонерне товариство «Укрсат» («Українські сателітарні системи»), як українська фірма-оператор у галузі телекомунікаційного та інформаційного забезпечення, розробила і впровадила комплексні рішення для глобальних, національних і місцевих інформаційно-телекомунікаційних систем для комп'ютерних мереж будь-якого рівня. Використання сучасного обладнання, досвід створення комплексних систем масштабу країни, регіону, міста та вирішення проблем «останньої милі» дала можливість АТ «Укрсат» вдало реалізовувати складні інформаційно-телекомунікаційні проекти (наприклад: Адміністрація Президента України, Верховна Рада України, Кабінет Міністрів України, Адміністрація державної прикордонної служби України та інші органи виконавчої влади і державні установи) [7].

Послідовно діючи в напрямку, визначеному принципом інтеграції послуг і безпосередньо пов'язаним цим принципом об'єднанням апаратури і обладнання, АТ «Укрсат» [9] побудував власний телепорт, що підтримує технологію ISBN (Integrated Services Business Network). Різновидом ISBN є технології IP-Advantage і Direct Way, які дають змогу досягти значного збільшення швидкостей передачі інформації в каналах (до 40 Мбіт/с), що апаратно вирішується на основі використання спеціальної приймальної приставки в периферійних станціях зв'язку.

Компанія ДАТАГРУП, експлуатує два комплекси супутникового зв'язку виробництва Hughes Network System DirecWay HUB. Кожен HUB складається з множини функціональних елементів, з обов'язковим резервуванням.

Установка другого HUB зроблена для збільшення загальної виробничої потужності супутникової мережі ДАТАГРУП. Комплекси HUB працюють за допомогою різних супутників Eutelsat-W2 (16° східної довготи) і Eutelsat- Sesat-2 (53° східної довготи). Робота з супутником Eutelsat-W2 дає можливість розширити зону обслуговування завдяки більшій зоні покриття, а також застосовувати антени діаметром 0,6—1,0 м унаслідок кращих, порівняно з Eutelsat- Sesat-2, енергетичних показників Eutelsat-W2. Застосування систем DirecWay HUB дає змогу забезпечити ефективні, захищені, інтерактивні канали зв'язку високої якості з сотнями і навіть з десятками тисяч віддалених терміналів, за допомогою яких можна реалізувати двосторонній супутниковий зв'язок або лише приймати супутникове мовлення, використовуючи наявну наземну інфраструктуру для трафіка зворотних каналів.

Робота системи супутникового зв'язку на основі DirecWay HUB перевірена чотирирічним досвідом експлуатації в Україні. Згідно з результатами експлуатації система має найкращі технічні і цінові характеристики порівняно з аналогічними системами, пропонованими на світовому ринку. Можливості системи такі, що для задоволення запитів і вимог найрізноманітніших клієнтів немає потреби у доробках. Тому компанія, що впровадила таку систему, не несе практично ніякого потенційного ризику при подальшому її використанні. На базі DirecWay HUB перевірені і стабільно працюють основні Види переданої інформації — дані, голос, відео.

До складу наземної інфраструктури Національної системи супутникового зв'язку України входить наземний комплекс керування, а також станції моніторингу корисного навантаження. Наземний комплекс керування включає дві ідентичні станції, функціями яких є відстеження поточного положення супутника на орбіті, прогнозування та корекція параметрів орбіти. Комплекс моніторингу складається з чотирьох станцій моніторингу: по одній на території

західноафриканського та індійського променів та дві на території євро-українського променя.

Подальший розвиток СТС пов'язаний із впровадженням сучасних технологій цифрової обробки сигналів та каналотворення, методів багатостанційного доступу, із застосуванням новітніх мікрохвильових технологій при розробці супутникового та термінального обладнання, нових підходів до створення багатостільникових робочих зон покриття, технологій підвищення спектральної ефективності та нових транспортних мережних технологій, зокрема MPLS.

### 1.3 Концепція функціонування низькоорбітальних супутників зв'язку та їх застосування

Завдяки високому розташуванню над землею супутники ефективно забезпечують широке покриття. Коли одна стільникова антена на землі покриває лише кілька квадратних км., один супутник залежно від його висоти охоплює тисячі квадратних км. щоб забезпечити охоплення територій, які в іншому випадку залишились би повністю не обслуженими. Вартість такого рішення, як і раніше, є важливою, такі рішення регулярно аналізують, щоб зробити їх все більш доступними.

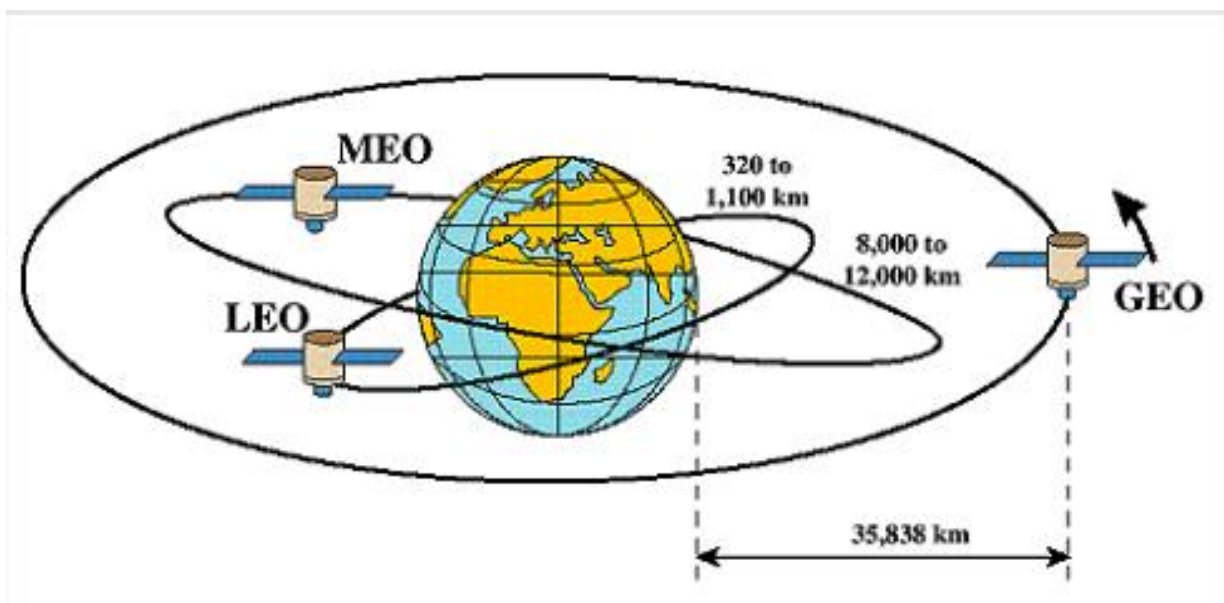


Рис. 1.3 траекторія LEO, MEO та GEO

У 90-х роках в кількох гравців виникла ідея запустити безліч супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO) з метою надання послуг зв'язку за низькою вартістю. Замість використання лише декількох супутників з високою орбітою, особливо на геостаціонарній орбіті, де супутники мають фіксоване положення відносно Землі (при відстані близько 36000 км), ідея полягала в тому, щоб розмістити менші та легші супутники, що обертаються нижче по висоті (в діапазоні 180 км до 2000 км) і, таким чином, значно зменшити вартість рішення через те що такий супутник менш дорогий у виробництві та запуску. Однак це спричинило труднощі, як технічні, так і фінансові.

Висота, на якій функціонують LEO, складаю пряму пропорційність охопленню земної поверхні. На висоті 36000 км покриття супутника на в 2,7 разів ширше, ніж на 1000 км над поверхнею Землі. Коли для покриття Землі на GEO потрібно три супутники, як мінімум 15 потрібно покрити всю Землю на LEO. Оскільки супутники на цій висоті рухаються, для забезпечення постійного покриття потрібно набагато більше ... Але зменшена затримка та збільшена пропускна здатність, нижча висота супутникового сузір'я LEO також має свої переваги. Дійсно, оскільки супутники ближче до Землі, ніж супутники GEO, час подорожі між землею і супутником і супутником і землею значно зменшується, а також час затримки, що є одним із застережень супутників GEO загалом. Затримка критична для додатків реального часу, зокрема для VoIP.

Основні сузір'я LEO, орієнтовані на широкосмуговий зв'язок. Додаючи більше супутників у сузір'я, пропускну здатність і, як результат, пропускну здатність для кожного користувача можна легко додати за граничні витрати. Хто що робить? Які гравці, які ринки? Кілька нових учасників, не пов'язаних із традиційними супутниковими гравцями, серед більш ніж 15 проектів LEO, що з'явилися за останні 3 роки, низка нових гравців змагаються за запуск нових проектів сузір'я, орієнтованих на ринок, де потрібна висока пропускна здатність та висота. Трьома найбільш відомими проектами в цьому плані є ініціативи OneWeb, LeoSat та SpaceX. Останній отримав велику пресу через свого генерального директора Ілона Маска, також фінансувача Tesla. SpaceX також



відомий розробкою пускової установки, 1-й етап якої може бути використаний повторно. Ця можливість спрямована на подальше зниження вартості запуску супутника в космос. У глобальному масштабі повне завершення всіх проектів LEO призведе приблизно до більш ніж 17 000 супутників, що забезпечують пропускну здатність понад 150 Тбіт / с. Головне питання, яке тут порушується, - чи достатньо місця на ринку для всіх гравців. Швидше за все, лише декільком гравцям вдасться запустити своє супутникове сузір'я. Як результат – отримаємо споживчі та корпоративні широкосмугові мережі як основні ринки. З огляду на їх характеристики, LEO особливо актуальні для випадків використання, коли потрібна велика пропускну спроможність. Не дивно, що більшість амбіційних проектів за своїм розміром зосереджуються на широкосмугових додатках, на що можна звернутися з різними підходами:

- Шляхом мобільного зв'язку: у районах, де наземний зв'язок є занадто витратним.
- Фіксований широкосмуговий доступ для B2C у віддалених / необслуговуваних / недоступних зонах, включаючи ринки, що розвиваються.
- Широкосмуговий діапазон для об'єктів з високою мобільністю (поїзди, літаки, катери).
- Виділені урядові, наукові та підприємницькі зв'язки. M2M та візуалізація, спрямована на інших гравців.

Хоча проекти, орієнтовані на широкосмуговий зв'язок, набули значної уваги, M2M, відстеження активів та візуалізація також націлені на інші гравці. Єдині три проекти LEO 2000 року вижили після банкрутства (Iridium, Orbcomm та Globalstar) вже запустили друге покоління супутників на заміну першого. Вони, як і раніше, зосереджені на M2M та відносно вузькосмугових програмах (голос, обмін повідомленнями). Таким чином, ці проекти не потребують супутника. Наприклад, Iridium NEXT матиме 66 оперативних супутників. Що стосується проектів візуалізації, в цей ринок інвестували нові гравці, часто стартапи, використовуючи дуже дешеві мікросупутники. «Planet» - один з них. Він спрямований на фотографування Землі щодня і, таким чином, робить

псевдозйомки в реальному часі. Ці оновлення будуть критично важливими для картографії та відкритимуть шлях до нових інноваційних застосувань, заснованих на недорогих обстеженнях Землі.

Спектр є ключовим для збільшення пропускної здатності. Чим більше ширина спектру, тим більше ємності та пропускної здатності. Діапазони частот, безумовно, мають вирішальне значення для будь-якої системи бездротового зв'язку, на землі або в космосі. Сьогодні для збільшення потужності потрібно все більше і більше спектру. Раніше для надання послуг голосового зв'язку та обміну повідомленнями була потрібна лише обмежена ширина спектру. З розвитком нових інтенсивних методів використання даних, таких як споживання відео, доступ до хмар, утримання обмеженої кількості спектру вже не є варіантом, і більшість гравців бореться за цей доступ. Не всі смуги частот рівні. Важливо розуміти, що не всі смуги частот мають однакові характеристики. Тому діапазони частот мають різні значення для гравців ринку. Діапазон частот в спектрі є важливим, але також важлива ширина смуги частот. Нижче наведено основні принципи, які потрібно розуміти:

- Нижня частина спектру сприяє поширенню. Це покращує, наприклад, для покриття приміщень або сільських районів для наземних станцій. Для супутників це також перевага в місцях, де є частими опади.

- У свою чергу, більш високі частоти важче використати, але, як наслідок, мають більшу пропускну здатність для використання. Супутникові системи раніше могли використовувати більш високі частоти, оскільки більше потужності може бути використано для передачі і таким чином компенсувати погіршення сигналу

- Діапазони більш високих частот поставляються з променями пучка. Ширший промінь краще використовувати для трансляції, тоді як менший промінь краще за потужністю. Діапазон Ка є найкращим діапазоном для розширення пропускної здатності, але його використання може виявитися важким у майбутньому. Для полегшення ідентифікації смуг частот їм присвоєно літери. Основні діапазони, що використовуються супутниковими системами,

представлені на наступному рисунку 1.4, упорядкованому відповідно до їх положення в спектрі.

Band	Frequencies (GHz)	Description
L	1.518-1.675	Doesn't require stabilised dish but bandwidth is limited, however. Interesting for M2M and narrowband coms.
C	3.4-7.025	Widely used for broadcasting and other data transmissions. The size of antenna (4-6 m) required make it unsuited for consumer market services
Ku	10.7-14.5	Widely used for broadcasting as well as for broadband. It is favoured by Intelsat because it is more immune to rainfalls than Ka band and considered as more secure. Band used by OneWeb
Ka	17.3-30	Started to be used in the mid 2000s, today the most favoured band for HTS satellites. Preferred band for first generation LEO constellations
V	40-75	Not used yet but favored for next generation very high capacity satellites including LEO projects

Рис.1.4 Використання основних діапазонів частот

Це також історично відповідає часу, коли ці діапазони почали освоюватися та використовуватися. Діапазон Ku використовується протягом багатьох років, тоді як використання діапазону Ka, хоча і швидко зростає, почав використовуватися значно пізніше. Оскільки вони забезпечують достатню пропускну здатність і можуть використовуватися з меншими антенами, а також через те, що оператори супутників зараз мають достатній досвід роботи з ними, Ku і, перш за все, діапазон Ka є найкращими діапазонами для проектів сузір'їв LEO. Діапазон Ka вже є найкращим діапазоном для систем високої пропускну здатності GEO (HTS), за винятком Intelsat, який віддає перевагу діапазону Ku, оскільки він менш схильний до перешкод, створюваних дощами. Це означає, що діапазон Ka в даний час є досить дослідженим, і що використання цього діапазону буде дедалі складнішим для обмеження перешкод. Перспектива використання мереж 5G цієї смуги частот викликає занепокоєння супутникових провайдерів. У США, а також у Південній Кореї вже прийнято рішення, що діапазон 28 ГГц, розташований у діапазоні Ka, буде присвоєний 5G. Інші діапазони, такі як діапазони L, S, C та X, є більш типовими для додатків з менш важливою потребою в пропускну здатності, таких як M2M. Також часто використовується в проектах LEO для спостереження за землею V діапазон. В даний час ця смуга практично не використовується через технічні труднощі, пов'язані з її високим положенням у спектрі [8].

## **Висновок**

В даному розділі було розглянуто теоретичні відомості та основні технічні можливості реалізації супутникових систем зв'язку на середніх, низьких та високих орбітах. Вищезгадані технології надають великий спектр послуг, проте через низку недоліків та малу конкурентоспроможність займає незначну частку ринку телекомунікаційних послуг. Дані системи не дають можливості користування широкосмуговими каналами зв'язку і не можуть скласти конкуренцію наземним системам.

Можна стверджувати про вдалий досвід використання супуників лише в окремих сферах, що не вирішує глобальних проблем широкосмугового доступу до мережі WWW. Для поставлених задач існують інші розробки супутникових угруповань, які будуть висвітлені у наступному розділі.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ ДО МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ - НИЗЬКООРБІТАЛЬНІ СУПУТНИКИ

#### 2.1 Маршрутизація супутникового трафіку

Один супутник LEO/MEO може покривати лише обмежену географічну область на Землі через фізичні обмеження. Для забезпечення глобального покриття мережі зв'язку, дані повинні належним чином передаватися через супутникову мережу. Методологія управління потоком даних у супутниковій мережі називається маршрутизацією супутникової мережі.

Відповідно до налаштування сузір'я супутникової мережі, маршрутизацію супутникової мережі можна загалом класифікувати на три категорії: одношарова маршрутизація супутникової мережі, багатшарова маршрутизація супутникової мережі та інші методи маршрутизації.

Розглянемо детально одношарову маршрутизацію супутникової мережі яка побудована за допомогою супутників, які обертаються на однаковій або подібній висоті, такі як Iridium, OneWeb та O3b.

З точки зору всієї супутникової мережі, немає суттєвої різниці щодо кожного окремого супутника в межах сузір'я та кожного зв'язку суша-супутник. Характеристики міжсупутникових зв'язків, якщо такі зв'язки існують у мережі, можуть різнитися залежно від розташування супутників та динаміки. Через велику кількість супутників, що використовуються в сузір'ї LEO, високу відносну динаміку між двома супутниками та між супутником і наземним терміналом, мале покриття, яке може забезпечити кожен окремий супутник, маршрутизація в супутниковій мережі LEO є складнішою, але важливою для забезпечення глобального зв'язку.

Загалом існує дві основні стратегії маршрутизації супутникової мережі LEO: віртуальний вузол та віртуальна топологія.

Стратегія віртуального вузла полягає в тому, що Землю ділиться на логічні області відповідно до певних теорій, як правило, на основі географічної довготи

та широти для полегшення управління. Кожна зона обслуговується одним супутником. Ця стратегія може приховати складний рух супутників LEO до наземних користувачів. Алгоритм маршрутизації на основі IP для супутникових мереж LEO із стратегією віртуальних вузлів, запропонований Хашимото розділяє земну поверхню на площини 160 км на 160 км, так звані «суперстільники», і кожен суперстільник додатково ділиться на 9 комірок. Поняття "Віртуальна адреса (VID)", призначена статично на основі географічної інформації стільникового зв'язку та вставлена в датаграми IP, використовується для міжсупутникової маршрутизації. Замість того, щоб використовувати географічну довготу та широту для управління покриттями супутників, алгоритм маршрутизації, запропонований у [29] та [30], використовує порядковий номер супутника на його орбіті (S) та порядковий номер орбіти у всьому сузір'ї (P), щоб визначити місце розташування супутника. P є статичним у розрахунку маршруту, а S змінюється під час переміщення супутника. Подібно до алгоритму «Найкоротший шлях спочатку» (SPF) [31], цей алгоритм враховує довжину посилення для наскрізної оптимізації затримки. На основі роботи в [28] - [30], алгоритм розподіленої географічної маршрутизації (DGRA) [32] вводить двоетапний процес прийняття рішення для визначення найкоротшого шляху: супутник спочатку обчислює загальну довжину маршруту на основі "легкодоступності", інформації про місцезнаходження, а потім направляє пакет на сусідній супутник, що найбільше зменшує відстань до пункту призначення. Підходи до імовірнісної маршрутизації на основі місцезнаходження представлені відповідно в роботах [33] та [34], а для визначення місцезнаходження супутника використовуються "адреса орбіти" та "відносна широта". Застосовуючи функцію розподілу ймовірностей, отримаємо, що кількість спроб перемаршрутизації може бути зменшено без знання точної тривалості сигналу та розташування користувача, тоді як раніше визначався розмір сховищ таблиць маршрутизації в кожному супутнику. Оптимізований алгоритм маршрутизації на основі ймовірності зберігає більше ISL, щоб зменшити ймовірність блокування дзвінків. Інші протоколи супутникової

маршрутизації на основі стратегії віртуального вузла можна знайти в світовій літературі [36] - [39]. Маршрутизація на основі стратегії віртуального вузла призначена для супутникових широкосмугових послуг з урахуванням вимог QoS, тоді як IP-послуги надаються через мережу АТМ (асинхронний режим передачі). Балансування навантаження виконується на кожному супутнику шляхом перенаправлення трафіку на сусідні супутники з більшою залишковою пропускнуою здатністю, що має забезпечити глобальне збалансування шляхом дифузії трафіку в перевантажених районах на менш зайняті райони.

Незважаючи на назву "логічна топологія", все ще використовують стратегію "віртуального вузла" при розробці протоколу маршрутизації сузір'їв LEO. Зазвичай використовується статична маршрутизація в логічній мережі, побудованій віртуальними вузлами, оскільки "логічні вузли" приховують фактичну динаміку супутників і, отже, є більш стабільними.

Віртуальна топологія повністю використовувала детермінований характер сузір'їв LEO. Оскільки супутники періодично обертаються навколо Землі, через певний період топологія мережі знову буде такою ж, як і поточна. Якщо розділити цей проміжок часу на зрізи за певним алгоритмом і якщо зріз часу досить короткий, топологія мережі в кожному зрізі часу може розглядатися як фіксована. Тому супутникову постійно мінливу топологію можна перетворити на кілька фіксованих топологій. Провідні вчені Чанг та ін. змоделював супутникову мережу LEO як Кінцевий автомат - Finite State Automaton (FSA) [40], [42]. Було використано сузір'я Одісеї для дослідницьких цілей. 6-годинний період орбіти Одісеї розділений на 144 різні стани, і топологія кожного стану аналізується відповідно. Їх алгоритм маршрутизації призначений для традиційних телефонних послуг; під час процесу маршрутизації переважним є зв'язок із більшою залишковою пропускнуою здатністю, щоб зменшити ймовірність блокування сигналів. Алгоритм міжсупутникової маршрутизації LEO на основі АТМ із стратегією віртуальної топології з назвою «динамічна віртуальна топологія маршрутизації дискретного часу» Discrete-Time Dynamic Virtual Topology Routing (DT-DVTR). Поділивши топологію супутникової

мережі на фіксовану топологію з дискретним часом, маршрути обчислюються поза мережею без адаптації до стану зв'язку в режимі реального часу. Підтримка широкосмугових послуг також виходить за рамки цього дослідження. Інший алгоритм маршрутизації супутникової мережі LEO, заснований на стратегії віртуальної топології, цей алгоритм не зберігає таблицю маршрутизації з усією інформацією про топологію мережі на супутниках; натомість маршрути обчислюються, а таблиця маршрутів зберігається на наземних станціях, які називаються мережевими центрами управління та контролю (NOCC). Найкращі маршрути обираються на основі SPF.

*Багатошарова маршрутизація супутникової мережі.* Надання послуг на різній висоті призведе до різних характеристик. Тому деякі дослідники запропонували багатошарову структуру супутникової мережі, побудовану сузір'ями LEO / MEO або LEO / MEO / GEO, а також запропонували алгоритми маршрутизації для таких мереж. Перша мережа "Супутник через супутник" (СЧС) була представлена в 2000 р. Ця робота не визначає кількість шарів у мережі СЧС, але використовувала тришарову мережу LEO / MEO / GEO як приклад сценарію зв'язку.

Введено три типи комунікаційних ліній:

- User Data Link (UDL): з'єднує супутникові вузли та наземні вузли;
- Inter-Satellite Link (ISL): з'єднує супутники в межах одного шару;
- Inter-Orbit Link (IOL): з'єднує супутники в різних шарах.

Всі три типи посилянь існують на найнижчому рівні, тоді як UDL не обов'язковий для вищих шарів. Супутники на вищих рівнях зазвичай використовуються для управління мережевою топологією нижчого шару та для обчислення таблиць маршрутів для нижчих шарів, а іноді вони також можуть використовуватися як зворотний зв'язок для додаткового резервування.

*Двошарова маршрутизація мережі,* як правило, містять шари LEO та MEO для мінімальної затримки та найкращого покриття (супутники GEO не можуть забезпечити полярне покриття), а супутник MEO зазвичай вибирається як "менеджер" супутників LEO в межах його покриття. Протокол групування та



маршрутизації супутників (SGRP) перекладає відповідальність наземних станцій за обчислення маршруту міжсупутникових маршрутів у традиційних протоколах на супутники MEO «менеджер» [46]. Кожен супутник LEO постійно вимірює метрику затримки на всіх вихідних посиланнях і створює "Звіт про затримку" (DR). Потім DR надсилаються менеджеру супутника LEO - відповідного супутника MEO.

Супутники на рівні MEO створюють новий DR на кожній стороні супутника та обмінюються новими звітами між собою; таким чином, кожен супутник MEO може отримати загальну інформацію про топологію мережі LEO рівня. Таблиці маршрутизації обчислюються на основі цих DR і передаються від супутників менеджера MEO до супутників LEO.

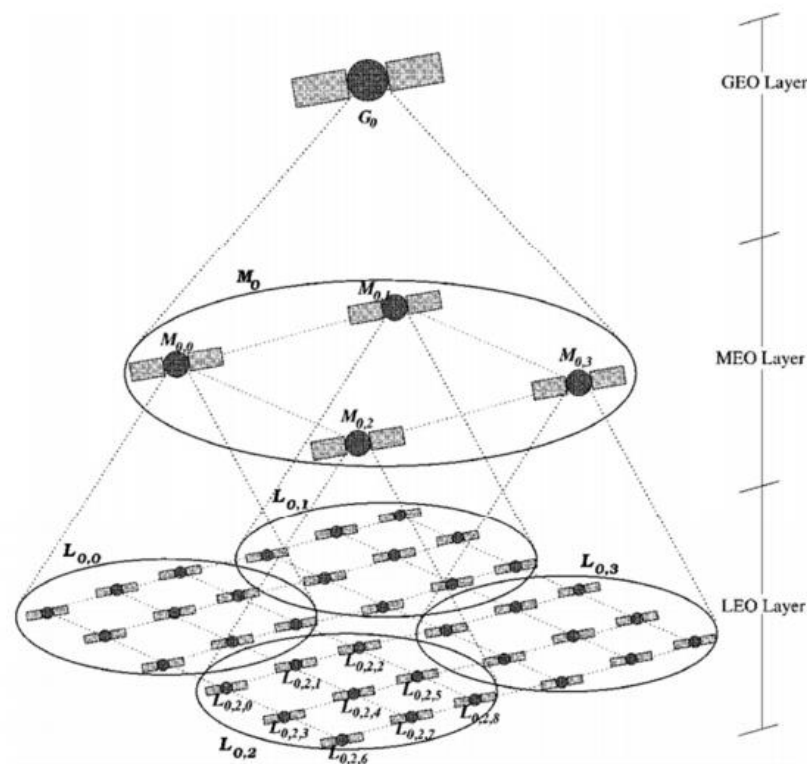


Рис. 2.1 Приклад багатосарової супутникової мережі

Роботи в [47] та [48] базуються на SGRP, але вони сприяють зменшенню знімків та, крім того, зменшенню вимог для зберігання таблиці маршрутизації. Перший теоретично аналізує топологічну динаміку супутникової мережі LEO та зменшує знімки. Останній вдосконалює стратегію групування супутників,

налаштовуючи алгоритм, яким супутник LEO спілкується зі своїм менеджером MEO, тобто супутник LEO переключається на іншого менеджера MEO лише тоді, коли він більше не перебуває під охороною свого колишнього менеджера. За такої практики також можна зменшити кількість знімків. Іншим прикладом двошарового протоколу маршрутизації супутникової мережі є адаптивна до трафіку гібридна маршрутизація (TAHR). У TAHR супутники MEO періодично обчислюють ISL на рівні MEO і оновлюють інформацію про топологію своєї області управління (так звана таблиця згрупування покриттів, CGT), коли відбувається передача IOL, що призводить до певної можливості адаптації стану мережевого трафіку до супутникової мережі. Комунікації низького діапазону передаються через рівень LEO, а далекобійні - через рівень MEO.

*Тришарова маршрутизація мережі.* Деякі дослідники вважають, що поєднання супутників LEO, MEO та GEO як комбінованої мережі супутникового зв'язку дасть кращі характеристики, ніж використання одного рівня [50]. Подібно до двошарового підходу, алгоритм багатошарової супутникової маршрутизації (MLSR) вибирає супутник у верхньому шарі в якості менеджера супутників нижнього шару в межах його покриття, тобто супутники MEO є менеджерами супутників LEO, а супутники GEO - менеджерами супутників MEO. Розрахунок таблиці маршрутизації виконується наступними кроками, показаними на рисунку (див. додаток 2). «Новий протокол групування та маршрутизації супутників» (NSGRP) успадковується від MLSR та SGRP і має на меті вирішити проблеми MLSR та SGRP щодо неефективної обробки перевантажень та великого навантаження на обчислення маршруту шляхом введення стратегії віртуального вузла та стратегії віртуальної топології, які зазвичай використовуються для одно-багатошарової маршрутизації супутникової мережі LEO до багатошарових мереж [51]. У NSGRP супутники GEO виконують функцію зворотного зв'язку і контролюють роботу всієї мережі; наземні шлюзи контролюють обчислення знімків та завантажують результати на супутники GEO; обчислення маршруту виконуються спільно наземними шлюзами та

супутниками МЕО; Супутники LEO передають пакети даних під управлінням супутників МЕО.

Ще один підхід тришарової мережі LEO / МЕО / GEO, так звана „МЕО-орієнтована на користувача космічна інтегрована інформаційна мережа”, може бути знайдено в [52]. У цій концепції мережа LEO більше не використовується як маршрутизатор; всі розрахунки та рішення маршрутизації приймаються на рівнях МЕО та GEO. Натомість супутники LEO використовуються як звичайні вузли зв'язку. Подібна концепція запропонована в [53], до складу якої входить високогірна платформа (HAP) / МЕО / GEO. Рівень HAP має подібну функцію до рівня LEO у [52], а рівень LEO має подібну функцію до рівня МЕО. Деякі інші підходи до маршрутизації супутникової мережі були досліджені для таких сценаріїв, як мережа з затримкою (DTN), мережа глибокого космосу (DSN) та міжпланетна мережа (IPN). DTN - це мережі для послуг зв'язку, які не мають сенсу до затримки або порушення передачі, такі як збір даних датчиків не в реальному часі [54]. Очевидно, що через велику відстань передачі DSN та IPN також є екземплярами DTN.

Darting - класичний алгоритм маршрутизації для великих мереж динамічної топології на основі простору [55]. Основна мета проектування Darting - мінімізувати накладні витрати на повідомлення, зберігаючи надійну доставку повідомлень на DTN. Для досягнення такої мети кожен вузол обчислює вартість маршруту від себе до пункту призначення та визначає, який є наступним вузлом (передбачається, що кожен вузол має копію заздалегідь визначеної матриці витрат мережевих зв'язків), і такий механізм спрацьовує лише тоді, коли є дані для передачі. Однак Дартинг не завжди може діяти, як передбачається, деякі дослідники вирішують проблему маршрутизації DTN в середовищі DSN іншими підходами. Оскільки комунікації в космосі різко відрізняються від сценаріїв наземного зв'язку, що обговорюються в цій дипломній роботі, такі відмінності включають, але не обмежують довжину лінії зв'язку, тривалість зв'язку, частоту помилок, пропускну здатність лінії зв'язку та допуск служби до затримки, тому більш детально розглядатись не буде.

Сценарії застосування супутникової мережі еволюціонували від наукових та інституційних до комерційного масового ринку. В даний час супутникові мережі застосовуються до різних аспектів, як показано на рисунку 2.2. З розвитком супутникової мережі сценарій застосування супутників постійно розширюється.

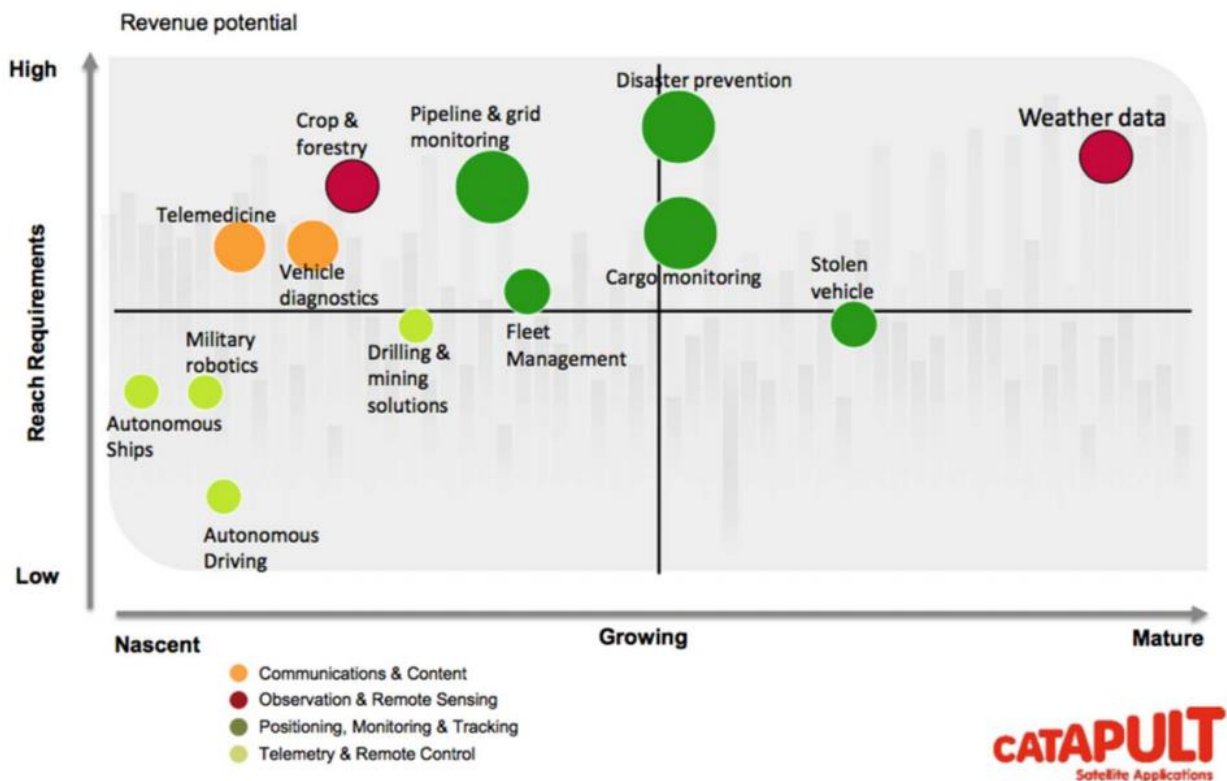


Рис. 2.2 Супутникові програми - вигляд портфоліо [103]

Дедалі популярнішими стають такі програми:

- Точна автоматизація: На основі інформації GNSS (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou та ін.) та інтегрованою з наземною інфраструктурою, супутникові мережі можуть підтримувати точну автоматизацію для багатьох областей, таких як

Інтеграція даних із супутників, БПЛА та датчиків по місцю може ефективно спрямовувати дефіцитні ресурси, надаючи відповідну інформацію.

- Доступ до Інтернету: Супутникова мережа є ідеальним рішенням для надання інтернету віддаленим районам та менш розвиненим регіонам з обмеженою інфраструктурою наземної мережі. Сузір'я супутників O3b успішно

надало інтернет-послуги для екваторіальних регіонів зі швидкістю 3G. Майбутні сузір'я розроблені для забезпечення доступу до інтернету зі швидкістю від мбіт/с до гбіт/с, чого достатньо для сучасних Інтернет-додатків.

- IoT та охорона здоров'я: Подібно до забезпечення звичайного доступу до Інтернету, супутникові сузір'я також можуть бути ідеальним рішенням для забезпечення віддаленого моніторингу та контролю для IoT та програм охорони здоров'я. Цей сценарій особливо важливий для надання медичних послуг сільським районам, оскільки медичні ресурси не розподіляються рівномірно по всьому світу. Мешканці сільських районів зазвичай не мають належного доступу до належних медичних послуг. Мережа супутникового зв'язку може принаймні надати необхідну підтримку, необхідну в разі потреби.

Очікується що супутникові мережі будуть важливою частиною мережі 5G. Історично склалося, що супутникові мережі та наземні мобільні мережі розроблялись окремо. Що стосується наземного мобільного зв'язку, супутникові мережі, як правило, на одне покоління відстають від наземних; результатом цього розділення є труднощі при інтеграції двох мережевих форм та надання безперебійних послуг [59]. Статистика 5G збільшення об'єму даних в 1000 разів до 2021 року та появу IoT [60]. Обидва вони потребують збільшення пропускну здатності мережі, доступності та надійності. Супутники можуть бути частиною 5G у таких областях:

- Стійкість: наземні інфраструктури легко піддаються техногенним або природним катастрофам. Супутникові мережі можуть бути не в змозі надати повний набір послуг поодиноці, але вони можуть бути використані для надання основних послуг з ліквідації наслідків стихійних лих та управління ними, і тому вони можуть допомогти наземним службам якомога швидше.

*Мережа досконалого супутникового зв'язку SatNEx.* SatNEx - це довгострокове дослідження супутникового зв'язку в Європі, яке тривало 9 років (2004-2013), включаючи три етапи [65]. Одним з основних дослідницьких завдань у фазі III SatNEx було «Дослідження гібридних методів обробки сигналів космосу / землі» під керівництвом Болонського університету. Ця робота була

зосереджена на обробці сигналів на фізичному рівні з використанням таких методів, як стиснення даних, формування променя (BF) та багатокористувачий (MU) багатовхідний багаторазовий вихід (MIMO) разом з бортовою обробкою (ОВР) для досягнення такої мети. Гібридна обробка космічного / наземного сигналу є компромісом між продуктивністю та складністю корисного навантаження. Для досягнення запропонованої продуктивності кожному супутнику потрібно спочатку обробити сигнали даних такими методами, як BF, стиснення даних, кодування та модуляція тощо, перш ніж передавати їх на землю. Їх гібридна архітектура обробки сигналів, яка називається Digisat, проілюстрована на рисунку 2.3.

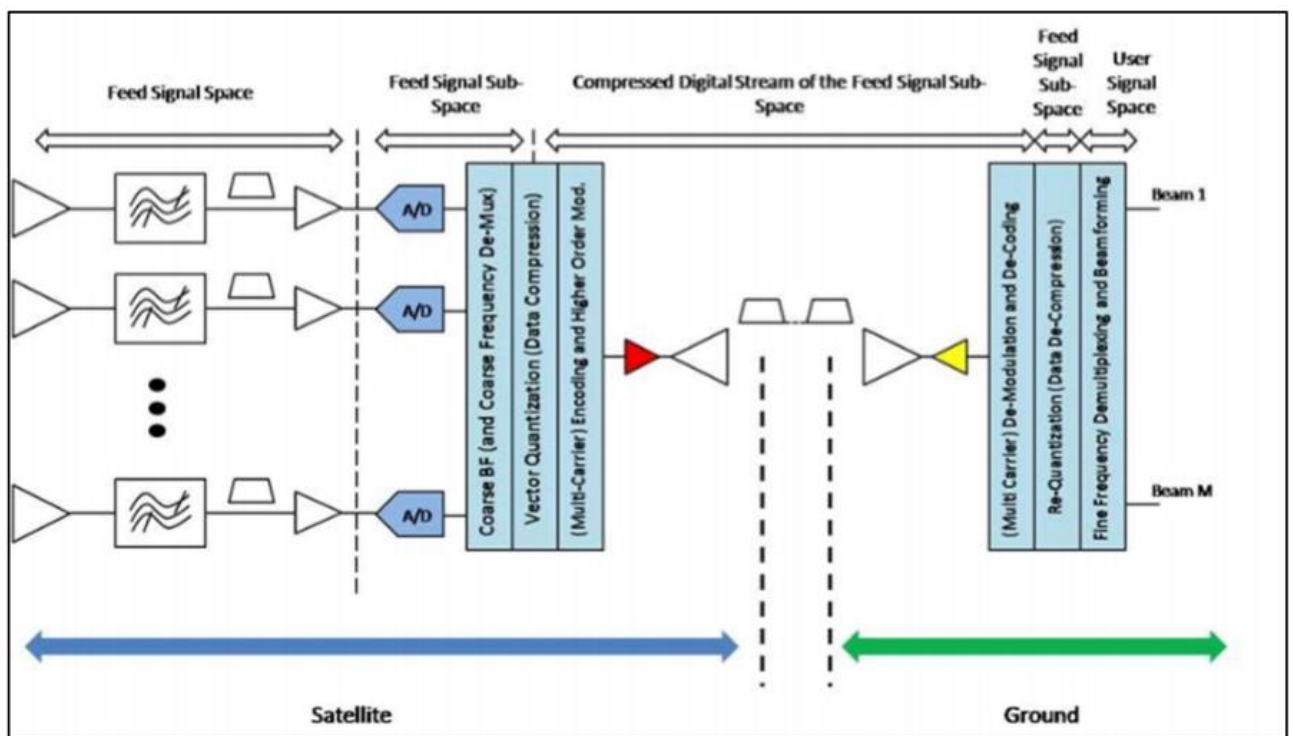


Рис. 2.3 Архітектура Digisat [110]

У цій системі супутник Ка-діапазону (26,5 - 40 ГГц) використовується для забезпечення високої пропускної здатності [66]. Пряма лінія працює на частоті 20 ГГц із загальною пропускною здатністю 500 МГц на основі стандарту DVB-S2, тоді як зворотна лінія працює на частоті 30 ГГц, займаючи однакову кількість смуг пропускання із використанням стандарту DVB-RCS2.

SATSIX Системи зв'язку на базі SATellite в рамках IPv6 (SATSIX) - це проект, який зосереджений на впровадженні Інтернет-протоколу версії 6 (IPv6) у супутникових мережах для забезпечення зближення двох типів платформ супутникової мережі, а саме прозорої платформи та регенеративної платформи. У прозорій платформі супутник діє як ретранслятор, і вся мережа має типову зіркову топологію. Цей тип платформи забезпечує двонаправлений IP-зв'язок між терміналами та наземними мережами. У регенеративній платформі мережа зазвичай має топологію комірок (mesh). Він може пропонувати прямі з'єднання від користувача до користувача без потреби попередньої концентрації сигналів у концентраторі. Ці дві мережеві платформи проілюстровані на рисунку 2.4.

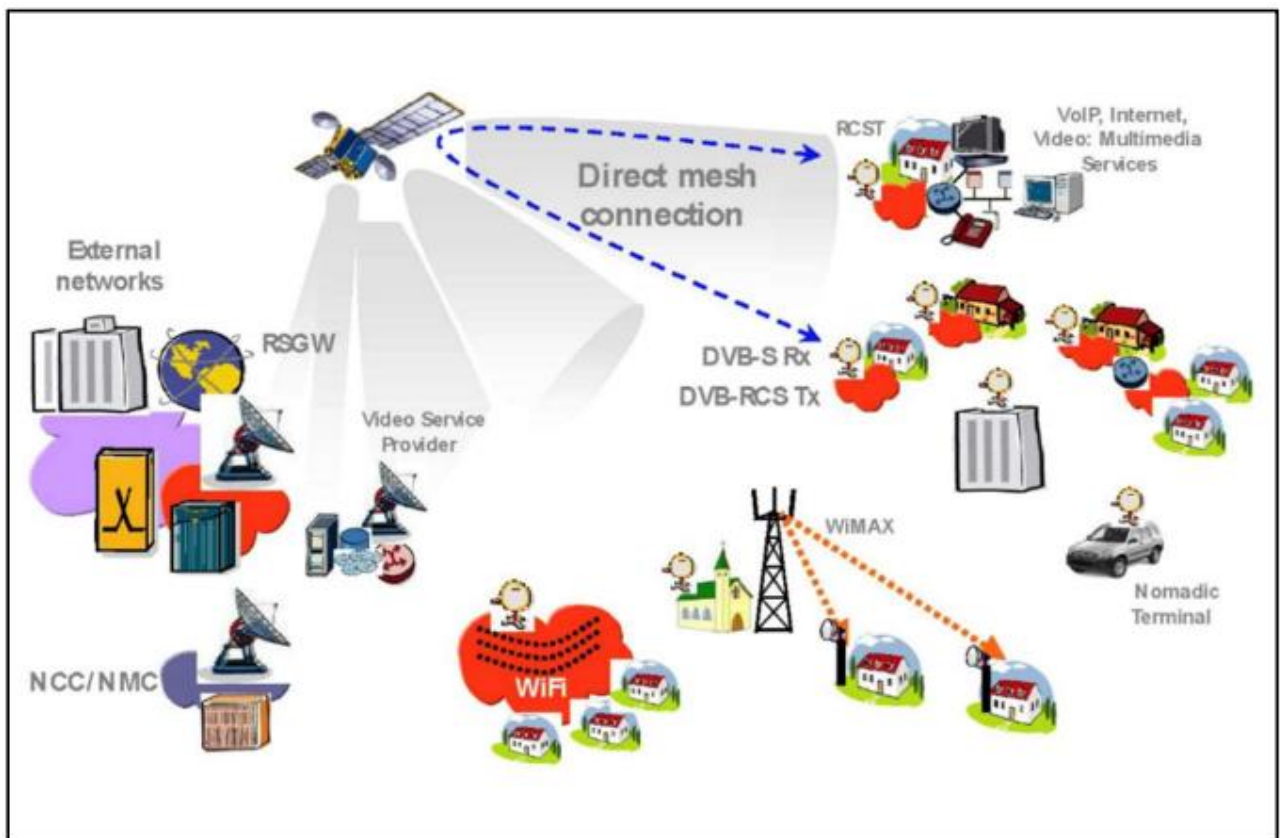


Рис. 2.4 Платформи SATSIX [112]  
(а) Прозора платформа (б) Регенеративна платформа

У проекті SATSIX Wi-Fi та WiMAX використовуються як наземні мережі зв'язку. Сценарії дослідження включають:

- Швидкісні поїзди, що з'єднуються із супутниками, передають сигнали до наземних бездротових мереж (Wi-Fi), коли супутникові з'єднання стають недоступними (наприклад, заїзд в тунель або залізничну станцію).

- послуги 3-play (голос, відео та дані).

- Телевізор через DVB-S (висхідна лінія) / DVB-RCS (низхідна лінія). Як описано вище, наземними мережами, обраними в проекті SATSIX, є Wi-Fi та WiMAX, що означає, що наземні структури є фіксованими, тобто AP (точка доступу) не може бути змінена. Однак у режимі ad hoc AP слід вибрати за певною схемою. З цієї причини SATSIX не може ідеально підходити до сценаріїв з високою динамікою, таких як місця катастроф, коли зазвичай задіяна спеціальна мережа.

*MONET.* Механізми MONET для оптимізації гібридних спеціальних та супутникових мереж (MONET) є проект поєднання мобільних спеціальних мереж (MANET) та супутникових систем (рис.2.5).

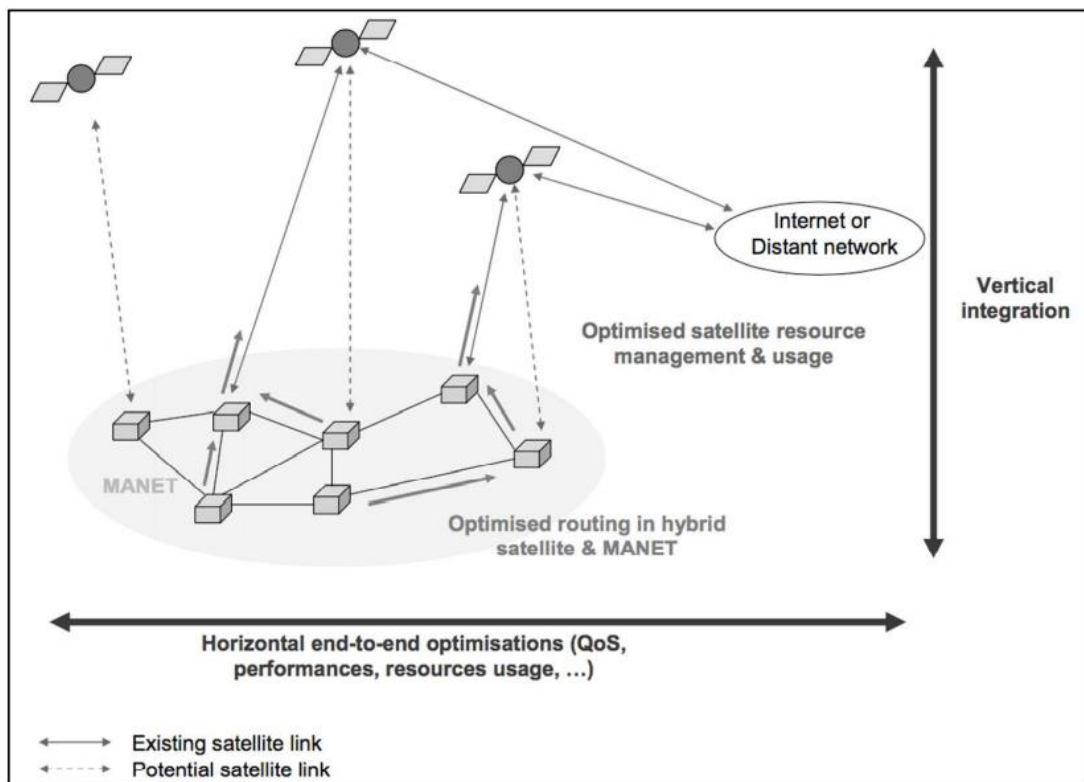


Рис. 2.5 Концепція MONET [113]



Найціннішою характеристикою MANET є його гнучкість. Така мережа ідеально підходить для районів без мережевої інфраструктури або з пошкодженою інфраструктурою, таких як місця надзвичайних ситуацій та катастроф. Супутникові мережі можуть забезпечити покриття глобальної мережі відносно низькою вартістю. Отже, ця комбінація MANET та супутника в MONET спрямована на надання послуг з надзвичайних ситуацій та ліквідації наслідків стихійних лих. Загальна архітектура MANET та потенційний сценарій у цій обставині показані на рисунку 2.6.

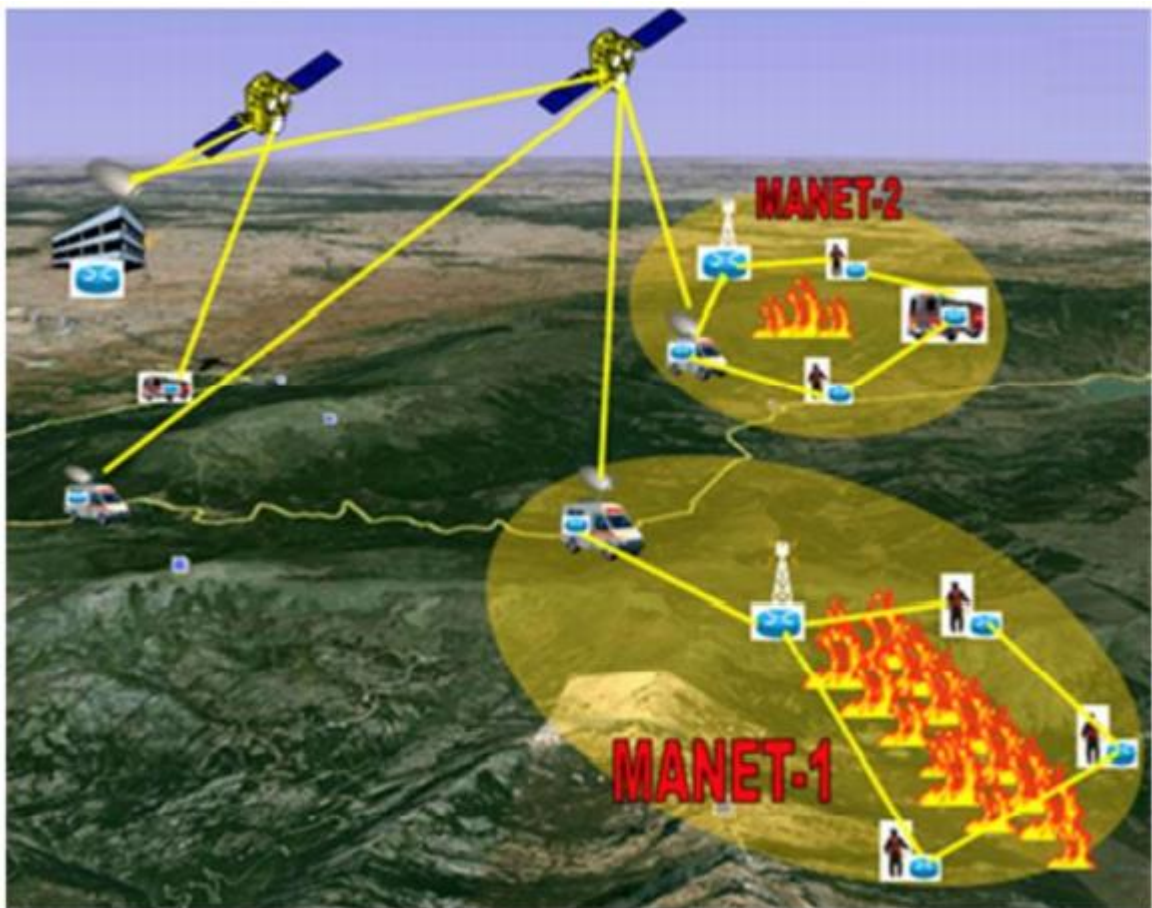


Рис. 2.6 Загальна архітектура MANET [114]

Основними цілями MONET є:

- Сформувані повне розуміння проблем та складносців, що лежать в основі високодинамічного та неоднорідного середовища гібридної мережі супутників MANET;

- Оптимізувати використання супутникових каналів доступу в MANET за допомогою механізмів, що пропонують та впроваджують зміни в топології та використовуваних ресурсах;

- Надавати безперешкодні широкопasmові послуги кожному в будь-який час в гібридній супутниковій мережі MANET завдяки оптимізованим алгоритмам та мережевим механізмам;

- Подолати вузькі місця та перешкоди в гібридних супутникових мережах MANET, щоб забезпечити більш проникну та оптимізовану структуру мережі.

*BATS*. Broadband Access via integrated Terrestrial and Satellite systems (BATS) - це проект, що фінансується 7-ю програмою фінансування Європейського Союзу (FP7), який триває досі і був розпочий в 2013 році, має на меті надати понад 30 Мбіт / с широкопasmової послуги для 100% європейських домогосподарств до 2020 року. Загальна її структура представлена на рис. 2.7.

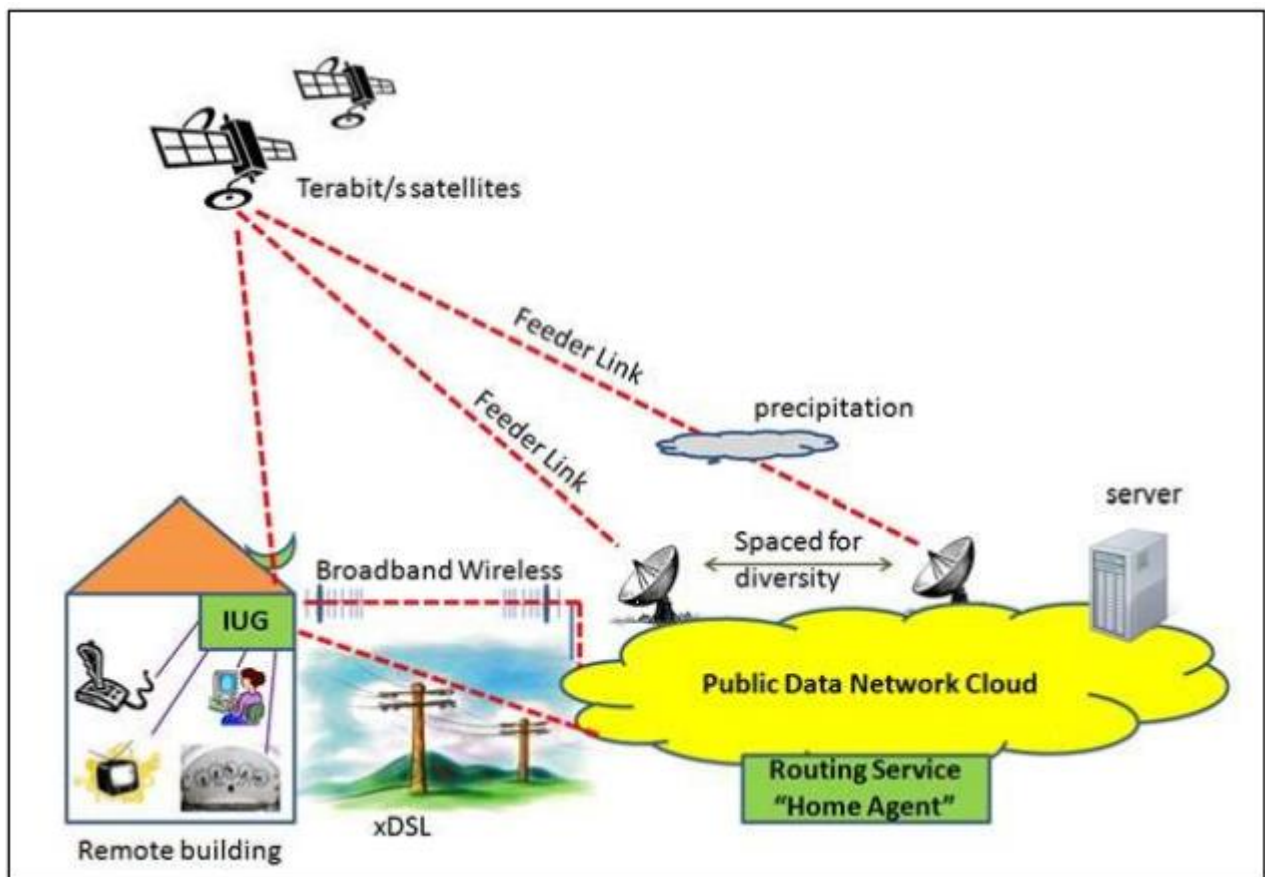


Рис. 2.7 Архітектура BATS [115]

У міських районах загалом можливо виконати вимогу щодо широкопasmового зв'язку за допомогою кабельних, волоконних та мобільних мереж; однак, розміщення такої інфраструктури у сільській місцевості буде дорогим. Натомість супутник відіграє важливу роль у підтримці потреб сільських користувачів. BATS також враховує різноманітність маршрутів як на стороні користувача, так і на наземній станції за допомогою Intelligent User Gateway (IUG). При використанні супутникового зв'язку IUG вибере найбільш підходящу наземну станцію для спілкування. Крім того, цілі проекту BATS включають наступні пункти:

- Інтегрована концепція BATS: визначити та перевірити нову наскрізну архітектуру для надання послуг широкопasmового зв'язку  $> 30$  Мбіт / с;
- Інтелектуальна розробка шлюзу користувача для забезпечення безперебійного наскрізного з'єднання;
- Розробити нові методи для покращення пропускної здатності супутникової мережі;
- Визначити нові методи тестування для оцінки реального користувацького досвіду;
- Розробити відносні стандарти;

Отже, з технічної точки зору, порівняння проектів, описаних у цьому розділі, проводиться на основі:

- типу наземної мережі (наприклад, дротової або бездротової)
- діапазону робочих частот супутникового зв'язку
- прямого та зворотного каналу частоти та стандартів.

Результати продемонстровано в таблиці 2.1, звідки можемо отримати наступні висновки:

1. Усі попередні тези визначали IP-мережу як наземний компонент, хоча мережа може бути як дротовою (xDSL), так і бездротовою (Wi-Fi), WiMAX). MANET - це окремий випадок бездротової IP-мережі.

2. Деякі роботи (MONET) використовують традиційний L-діапазон для ліній GSL, тоді як деякі (SatNex, SATSIX та BATS) використовують більш високі

частоти, такі як Ku-, Ka- або навіть V-діапазон для більшої пропускної здатності зв'язку. (Діапазон Q коливається від 33 ГГц до 50 ГГц, що потрапляє в діапазон Ka- або V- діапазони відповідно до стандарту IEEE, наведеного в Додатку 1).

Таблиця 2.1

### Технічне порівняння супутникових інтегрованих мереж

Проект	Наземна мережа	Операційний діапазон частот	Прямі/зворотні частоти та стандарти
SatNex	IP network	Ka-band	<i>Forward</i> : 20 GHz (DVB-S2)
			<i>Return</i> : 30 GHz (DVB-RCS2)
SATSIX	Wi-Fi, WiMAX	Ku-band	<i>Forward</i> : DVB-S
			<i>Return</i> : DVB-RCS
MONET	MANET	L-band	<i>Forward</i> : 1626.5 MHz - 1660.5 MHz
			<i>Return</i> : 1525 MHz - 1559 MHz
BATS	xDSL, Broadband Wireless	Ka-band, Q/V-band	<i>Forward</i> : 17.7 - 20.2 GHz, 37.5 - 38.5 GHz
			<i>Return</i> : 27.5 - 30 GHz, 40.5 - 41.5 GHz

Крім того, ми можемо зробити наступні висновки:

1. Можливо побудувати супутниково-наземну інтегровану мережу.
2. Широко використовуваній в даний час Інтернет-протокол (IP) все ще використовується в інтегрованих мережах. Використання одного і того ж протоколу як у супутникових, так і в наземних частинах може зменшити складність управління мережею.
3. Діапазон Ku і більш високі частоти будуть все більш популярними для інтегрованих супутникових мереж. Це відбувається відповідно до тенденції сузір'їв супутників наступного покоління.

## 2.2 Порівняння системи Starlink з іншими ССЗ

Супутники LEO працюють на значно менших висотах порівняно з супутниками MEO та GEO; така характеристика приносить унікальні переваги сузір'ям LEO:

- Низька затримка: Навіть для самої верхньої орбіти LEO (2000 км) час передачі в обидва кінці становить лише 13,3 мс;
- Висока пропускна здатність: Оскільки для забезпечення глобального покриття потрібно набагато більше супутників, загальна пропускна здатність мережі сузір'я LEO зазвичай набагато вища, ніж сузір'їв MEO та GEO, тому кожному користувачеві може бути виділено більше мережевих ресурсів;
- Менша втрата передачі сигналу: тривалість проходження сигналу набагато менша порівняно з MEO та MEO. Основним недоліком сузір'їв LEO є висока супутникова мобільність, що призведе до частих передач супутників при зв'язку з земними терміналами. Для постійного земного користувача тривалість зв'язку із супутником менше 20 хвилин . Це слід враховувати при розробці протоколів маршрутизації. У цьому розділі буде представлено п'ять сузір'їв LEO, а саме Iridium, LeoSat, OneWeb, Starlink та Hongyun Project.

*Iridium.* Система Iridium стала офіційно доступною наприкінці 1998 р. [9]. Вона містить 66 активних супутників, що працюють на висоті близько 781 км, тоді як деякі запасні супутники на орбіті у випадку відмови системи працюють на висоті близько 666 км [10]. Кожен супутник обертається навколо Землі приблизно кожні 100 хвилин; за іншими словами, середній час видимості супутника до нерухомого наземного терміналу становить близько 9 хвилин [11]. Сузір'я Iridium показано на рисунку 2.8

Iridium може забезпечити глобальне покриття голосових послуг, SMS-послуг, послуг передачі даних і навіть широкосмугових послуг [12]. Через унікальні фізичні характеристики сузір'їв LEO, Іридїум є єдиною доступною на сьогодні мережею супутникового зв'язку, яка забезпечує справжню глобальну (поліс-до полісу) покриття [13]. Перевага покриття значно підвищує

ефективність системи. Супутники взаємодіють між собою за допомогою Ка-діапазону, що працює зі швидкістю 10 Мбіт/с [14].

Операційна компанія Iridium, Iridium Communications Inc., починає створювати «Iridium NEXT», спеціально націлену на широкопasmові послуги. Нове сузір'я також матиме 66 активних супутників LEO та кілька запасних супутників, в той час як воно може забезпечити передачу даних 1,5 Мбіт/с через діапазон L та 8 Мбіт/с через діапазон Ка. Згідно з офіційним описом, Iridium NEXT сприятиме глобальній еволюції комунікацій, забезпечуючи зв'язок від машини до машини (M2M), потужнішу та надійнішу наземну мобільну службу, швидші та більш доступні широкопasmові послуги [15].

*LeoSat* - супутникове сузір'я LEO, що надає послуги підприємствам, фінансовим установам, уряду, енергетичному та морському сектору. Все сузір'я містить 108 супутників, які обертаються на відстані 1400 км. Пропоноване сузір'я проілюстровано на рисунку 2.9. Підключення до одного супутника наступне: 10 керованих користувацьких антен діапазону Ка (забезпечують 50 Мбіт / с - 1,6 Гбіт / с, - швидкість доступу до Інтернету на наземного користувача), 2 керовані антени шлюзу (забезпечують загальний канал до 10 Гбіт / с, або 5,2 Гбіт / с на користувача) і 4 оптичних ISL [16]. Сузір'я розроблено так, щоб забезпечити затримку від поверхні Землі до космосу менше 20 мс. Можливо, *LeoSat* може забезпечити кращу продуктивність комунікаційних мереж, ніж наземні. Наприклад, затримка зв'язку з Лондона до Сінгапуру по волоконному кабелю перевищує 180 мс, а за *LeoSat* - менше 120 мс [17]. Перші нано - супутники планувалося запуснути в 2019 році. Сузір'я за планом має надавати повний спектр послуг у всьому світі з 2022 року [18].

*OneWeb*. Спочатку запропонована наприкінці 2014 року, *OneWeb* (раніше відома як *WorldVu* або *L5*) - сузір'я LEO, що складається з 648 супутників, що обертаються на висоті 1200 км в 18 літаках. За підтримки великих міжнародних підприємств, таких як *Qualcomm*, *Virgin Group* та *Airbus*, *OneWeb* є однією з найвідоміших мереж супутникового зв'язку LEO наступного покоління. Сузір'я супутників проілюстровано на рис. 2.10.



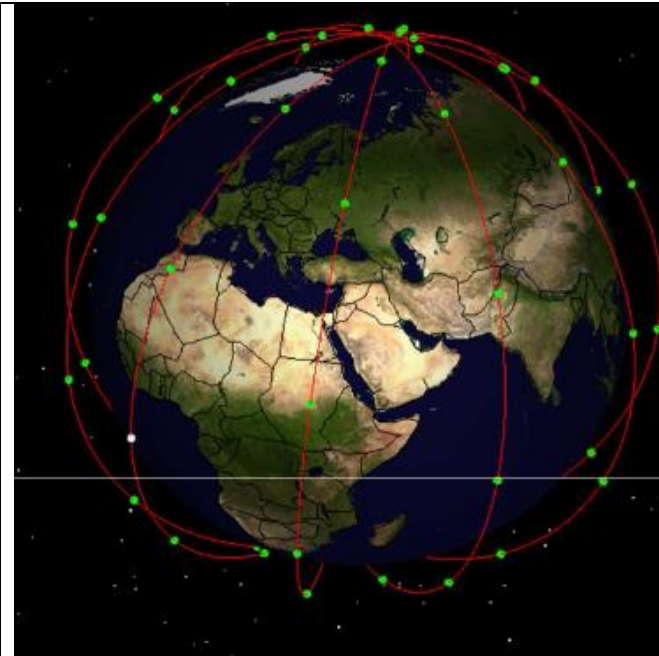


Рисунок 2.8 Iridium

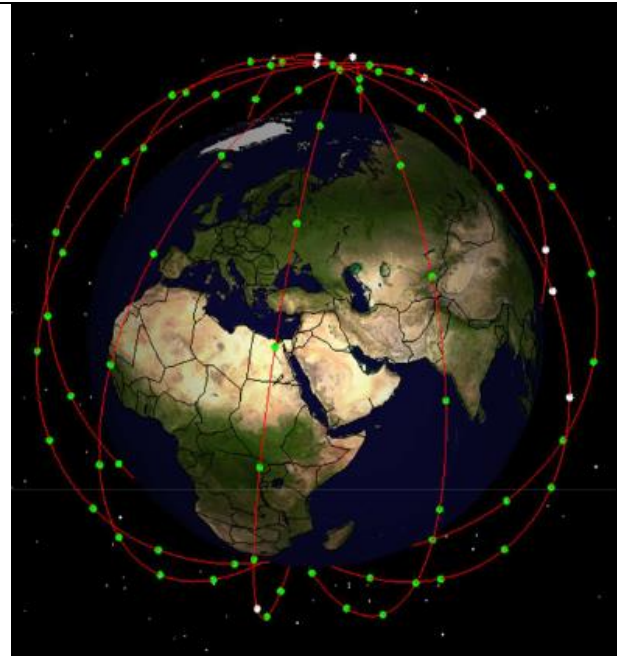


Рисунок 2.9 LeoSat

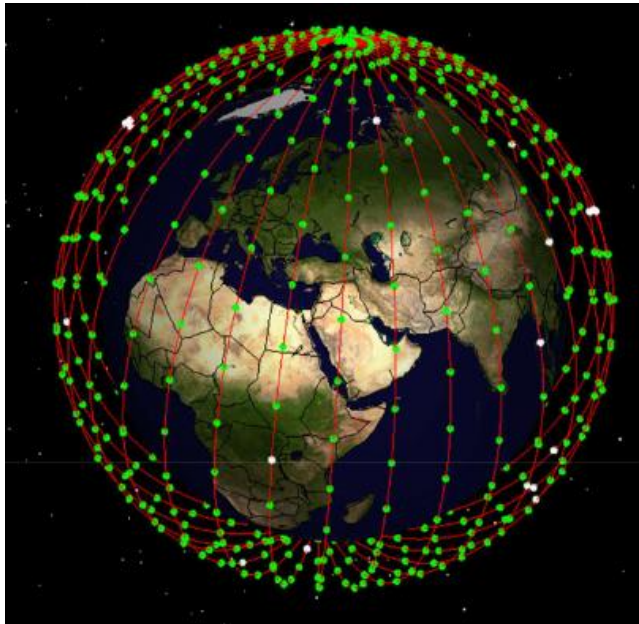


Рисунок 2.10 OneWeb

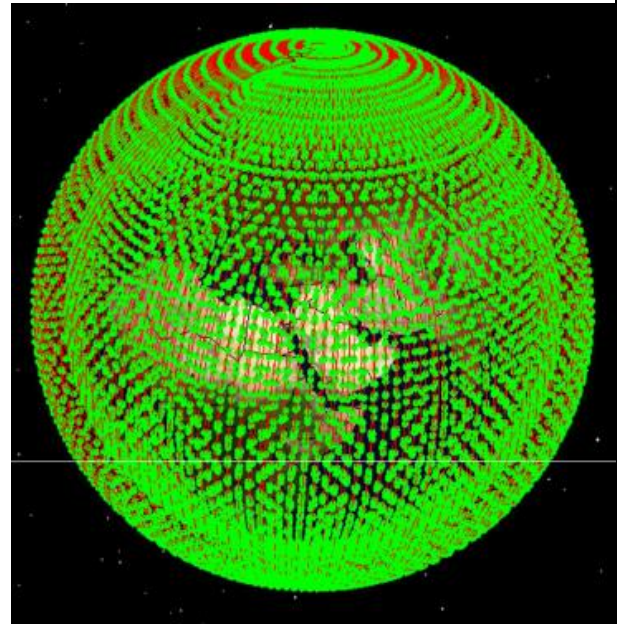


Рисунок 2.11 Starlink

Космічний зв'язок використовуватиме діапазон Ku та діапазон Ka, тоді як кожен наземний користувач матиме 50 Мбіт / с низхідної лінії зв'язку та 25 Мбіт / с висхідної лінії Інтернету; кожен супутник забезпечить загальну пропускну здатність до 7,5 Гбіт / с [19]. Зона обслуговування кожного супутника розрахована на 1080 км x 1080 км [20]. Очікується, що затримка передачі в обидва кінці буде до 50 мс порівняно із затримкою 600+ мс, яку надають поточні

супутникові провайдери [21]. Для того, щоб побудувати таке мега сузір'я, супутники OneWeb мають модульну конструкцію і виготовляються по трубопроводах - до 15 супутників можна виробляти на тиждень. Така практика різко знижує вартість виробництва супутників. Повне сузір'я планувалося задіяти з 2019-2020 років. Більшість початкових потужностей 648 супутників вже продано, тому OneWeb розглядає можливість постановки 1 972 додаткових супутників до поточної установки 648 супутників [22]. Однак досі незрозуміло, як буде виглядати нове сузір'я [23].

*Starlink* - це сузір'я LEO, запропоноване SpaceX, і це сузір'я з найбільшою кількістю супутників серед усіх наступних поколінь пропозицій LEO mega. Сузір'я Starlink містить 4425 супутників, які обертаються на висоті 1200 км у 83 літаках і 7518 супутників, що обертаються на 340 км (також відома як дуже низька орбіта Землі, або VLEO); загальна кількість супутників проекту, таким чином, становить 11 943 [24]. Уявне уявлення про пропонований сузір'ям зв'язок показано на рисунку 2.11. Завдяки численним супутникам, які крутяться навколо LEO, Starlink також доступний для забезпечення найбільш конкурентоспроможних мережевих характеристик. Швидкість "гігабіт" буде надана користувачам із затримкою  $\sim 25$  мс [25]. Операційне сузір'я було запущене в 2020 році, а повна розробка не завершиться до 2024 року. Starlink все ще перебуває на початкових стадіях тестувань, більше технічних деталей ще не опубліковано.

*Проект Hongyun* є китайським еквівалентом мега сузір'я LEO, запропонованого Китайською аерокосмічною науково-промисловою корпорацією. Він матиме 156 супутників, що рухаються на орбіті на 1000 км. Кожен супутник матиме пропуснн здатність і 6 Гбіт / с, тоді як кожен користувач матиме канал в 40 Мбіт / с. Космічний зв'язок використовуватиме діапазон Ка. Пропонується, щоб все сузір'я повноцінно діяло в 2024 році [26].

Порівняння перелічених мега сузір'їв LEO наступного покоління наведено в таблиці 2.2. Можна помітити, що мега сузір'я LEO наступного покоління використовуватимуть набагато вищі частоти для передачі сигналу, ніж



традиційні, від звичайного С-діапазону, L-діапазону до Ku-діапазону, Ka-діапазону і навіть V-діапазону. Більш високі частоти призведуть до більшої пропускної здатності зв'язку, що є важливим для сучасних Інтернет-програм, таких як потокове передавання мультимедіа.

Таблиця 2.2

### Порівняння LEO наступних поколінь

	<b>Iridium NEXT</b>	<b>LeoSat</b>	<b>OneWeb</b>	<b>Starlink</b>	<b>Hongyun Project</b>
<b>Кількість супутників</b>	66	108	648 (+ 1,972)	4,425 + 7,518	156
<b>Висота орбіти</b>	781 km	1,400 km	1,200 km	1,200 km and 340 km	1,000 km
<b>Смуга частот</b>	L-band Ka-band	Ka-band	Ku-band (V-band)	Ku-band Ka-band V-band	Ka-band
<b>Ємність на 1 супутник</b>	N/A	11.6 Gbps	N/A	N/A	4 Gbps
<b>Швидкість П.Д.</b>	128 kbps 1.5 Mbps 8 Mbps	50 Mbps- 1.6Gbps 5.2 Gbps	50 Mbps	“Gigabit per second”	40 Mbps
<b>Затримка передачі</b>	N/A	< 20 ms	N/A	~25 ms	N/A
<b>Рік з якого працюють</b>	2015	2022	2019	2019	2024
<b>Компанія</b>	Iridium Inc.	LeoSat	Qualcomm, Virgin Group, Airbus, etc.	SpaceX	CASIC

Середні недоліки мега сузір'їв LEO включають:

- Управління мережею: будь-яка помилка може призвести до значних несправностей у всій мережі.
- Рішення про маршрутизацію пакетів: супутникове сузір'я має постійно мінливу топологію мережі з високою мобільністю.

- Проблема, пов'язана з регіонами: деякі регіони обмежують використання певного діапазону частот. Пролітаючи над цими регіонами, супутники повинні вимкнути певні компоненти, щоб впоратися з місцевим регулюванням. Щільність супутника в полярних районах надзвичайно висока, що може призвести до серйозних перешкод.

- Екологічно безпечний: супутник LEO зазвичай має менше 25 років життя [27]. Після завершення місії численні супутники стають космічним сміттям і потенційно можуть стати загрозою для майбутніх космічних місій. До цих недоліків слід підходити серйозно.

Далі проведемо аналіз сузір'я OneWeb у порівнянні з найвідомішою супутниковою мережею LEO, "Іридіум", яка експлуатується протягом двох десятиліть. Детальне порівняння проілюстровано в таблиці 3.

Таблиця 2.3.

### Порівняння супутникових угруповань Iridium та OneWeb

	<b>Iridium</b>	<b>OneWeb</b>
<b>Кількість супутників</b>	66	648
<b>Теоретична кількість супутників для покриття всієї поверхні</b>	33	432
<b>Висота орбіти</b>	750 km	1200 km
<b>Середній радіус покриття (На супутник)</b>	2209 km	613 km
<b>Кількість супутників у полі видимості (На оритувача)</b>	1-4	1-4
<b>Час доступності</b>	491 secs	182 secs
<b>Кількість супутників у полі видимості для ISL (супутник)</b>	~ 10	> 50
<b>Відстань між супутниками для ISL</b>	4495 km	3520 km
<b>Кут нахилу орбіти</b>	22 degrees	50 degrees
<b>Мінімальний кут нахилу для підключення</b>	10 degrees	55 degrees (for user) 15 degrees (gateway)

З порівняння вище можна помітити, що сузір'я супутникової мережі LEO наступного покоління містить набагато більше супутників, ніж сучасне; це також значно збільшує мінімальну висоту для підключення, що може забезпечити кращу якість зв'язку, незалежно від стану місцевості. З іншого боку, недоліки майбутнього сузір'я супутникової мережі LEO включають меншу тривалість доступу до одного супутника, що призведе до частішої передачі даних між супутниками. З точки зору експлуатаційних витрат, майбутні сузір'я LEO не обов'язково коштують набагато дорожче, ніж сучасні сузір'я, як результат нижчої вартості малих супутників і ракет-носіїв, а також можливості запуску декількох супутників за допомогою одного транспортного засобу [66].

### **Висновок**

Проаналізовано протоколи маршрутизації, запропоновані для мереж супутникового зв'язку. Означені стратегії в поєднанні з різними архітектурами мережі для задоволення певних вимог до послуг зв'язку. Для одношарових супутникових мереж LEO віртуальний вузол і віртуальна топологія - дві основні стратегії, що використовуються для вирішення складної проблеми маршрутизації, введеної складною динамікою сузір'я.

Для багатшарових супутникових мереж зазвичай вибираються супутники на верхніх шарах в якості менеджерів супутників на нижніх шарах, щоб надати супутниковій мережі більше незалежності від контролю наземних станцій; однак основною проблемою такої багатшарової архітектури є висока вартість і великі труднощі для простої побудови такої мережі. Це є непрактично, враховуючи відсутність таких багатшарових мереж супутникового зв'язку, які навіть не пропонуються. Глибокі комунікації суттєво відрізняються від сценаріїв комунікацій навколо Землі; потрібні особливі міркування щодо проектування архітектури мережі та вибору стратегії маршрутизації.

У даному розділі було розглянуто деякі напрямки досліджень, включаючи наземну спеціальну маршрутизацію мереж, найсучасніші підходи до маршрутизації супутникових мереж, мережі супутникового зв'язку, інтегровані

мережі космос-земля та застосування супутникової мережі. Для мобільної спеціальної мережі необхідно вибрати відповідний алгоритм маршрутизації відповідно до деталізованих сценаріїв.

Наприклад, активна маршрутизація є кращою для мереж з обмеженою рухливістю, тоді як реактивна маршрутизація надійна до змін топології. Протокол маршрутизації повинен бути обраний відповідно до характеристик мережі, а поточні протоколи маршрутизації повинні бути оптимізовані для нових мережевих технологій, наприклад використання MANET як частини пропонованої супутниково-наземної інтегрованої мережі. Залежно від різних мережевих структур та різних сценаріїв застосування запропоновані різні підходи до маршрутизації супутникової мережі.

Методи варіюються від одношарової структури супутникової мережі до багатошарової структури супутникової мережі, а сценарії - від наземного зв'язку до міжпланетного зв'язку. Механізм маршрутизації разом із загальною структурою мережі повинен бути розроблений так, щоб відповідати передбачуваним вимогам до послуг (наприклад, пропускна здатність, затримка тощо), оскільки різні підходи можуть призвести до різних характеристик. Мережі супутникового зв'язку мають тенденцію до зменшення висоти над рівнем моря, збільшення частоти передачі та збільшення кількості супутників. Такі характеристики суттєво вплинуть на продуктивність мережі та створять потенціал для нових областей застосування. Велика мобільність та динаміка супутників сусіднього покоління, особливо сузір'їв LEO, внесе значну системну складність для виявлення підходящого маршруту для передачі пакетів та загального управління мережею. Отже, можна передбачити потенціал інтеграції сузір'я LEO та наземного MANET.

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ НИЗЬКООРБІТАЛЬНОГО УГРУПУВАННЯ СУПУТНИКІВ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ

#### 3.1 Технічний опис супутникового угруповання «Starlink» та вхідні данні

Склад угруповання Starlink. Щодо складу низькоорбітального угруповання Starlink компанії SpaceX треба відзначити, що вона складається як мінімум з двох окремих супутникових мереж. Перша мережа спочатку (відповідно до поданих заявок SpaceX в FCC від 15 листопада 2016 г.) планувалася на 4425 супутників. Друга мережа з 7518 повинна буде працювати в V-діапазоні. Слід відзначити, що на початку червня 2020 року SpaceX направила в FCC ще одну заявку, названу Generation 2, згідно з якою планується ще майже 30 тис. Супутників.

В даній роботі сконцентруємося на аналізі першого етапу мережі в Ku / Ka-діапазонах, яка реально розгортається зараз. На даний момент SpaceX бачить її в наступному вигляді: 72 орбітальні площини з нахилом 53 градусів по 22 супутника в кожній на висоті 550 кілометрів (можливо, що і це не остаточний варіант). Виглядає це так:



Рис. 3.1 Перший етап розгортання супутникової мережі

До архітектури мережі Starlink входять її найважливіші компоненти, а саме:

**Космічний сегмент** - це супутники на низькій орбіті (на даний момент розгортаються перші 1600 супутників на орбіті заввишки 550 км з нахилом 53 градусів);

**Наземний сегмент:**

- Центр управління мережею (Network Management System),
- Шлюзові станції (Gateway),
- Абонентський термінал (User Terminal)

Стосовно наземної мережі, то вона побудована на мережі Google. Судячи з наявних даних, трафік абонентів SpaceX маршрутизується по орендованим ВОЛЗ (переважно власної мережі Google, де це можливо) на найближчі вузли / точки обміну трафіком в США: LAX (Лос Анджелоса), SEA (Сіетл), ORD (Орландо) та інші.

Космічні апарати Starlink спеціально сконструйовані для групового запуску двома стопками по 30 супутників під обтічником ракети Falcon 9 і мають розміри: довжина - 3,2 м, ширина - 1,6 м, висота - 0,2 м (рис. 3.2).

Після виведення групи супутників на опорну орбіту (як правило це 280 км) супутники розкривають сонячні батареї, встановлюють контакт з наземним Центром управління і проводять перевірку на працездатність і відсутність пошкоджень при відділенні від ракети, далі вони активують електроракетні двигуни (ЕРД) на криптоні і починають рух на робочу орбіту, яке займає 2-3 місяці. Сонячні батареї при запуску складені «гармошкою» і мають 12 сегментів, де довга сторона кожного сегмента дорівнює ширині супутника (3,2 м).

Для переміщення супутника з опорної орбіти 280 км на робочу 550 км і утримання його на ній використовуються плазмові двигуни або ЕРД. Якщо відштовхуватися від ЕРД для малих супутників типу ВНТ-1500, то їх споживана потужність дорівнює приблизно 1,5 кВт, а тяга 100 мН, при питомому імпульсі на рівні 1700-1800 секунд. ЕРД виглядає приблизно так (див. малюнок нижче) і має габарити приблизно 20x20x15 см.



Рис. 3.2 Укомплектування супутників для запуску на орбіту

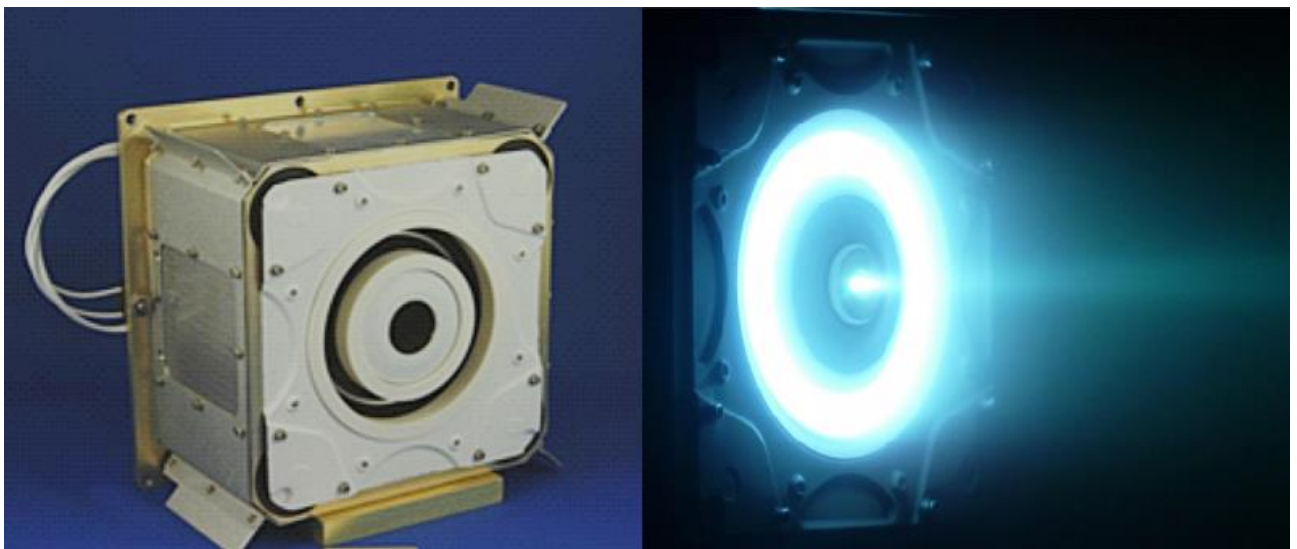


Рис. 3.3 Типові ЕРД для малих супутників

ЕРД мають запас криптону орієнтовно 5-10 кг, який заправлений в баллон високого тиску. Даний запас дозволить підняти супутник на кругову орбіту 550 км, утримати супутник на ній протягом п'яти років, а потім змінити орбіту з круговою на еліптичну, змінивши перигей з 550 км до 250 км, де за рахунок

гальмування про залишки атмосфери супутник досить швидко загальмується і згорить.

Основним корисним навантаженням супутника Starlink є 2 антенних комплекси для зв'язку з шлюзовими станціями (гейтвея) і з абонентськими терміналами. Антенний комплекс для зв'язку з гейтвея (або лінія фідера) являє собою параболічні антени, що наводяться в процесі польоту на точку Землі, де знаходиться Гейтвей. Фідерна лінія працює в Ка-діапазоні (18/30 ГГц).

Також на борту перебувають 4 плоскі квадратні антени з фазованою решіткою - три на передачу інформації від супутника на абонентський термінал і одна для прийому сигналу від терміналу.

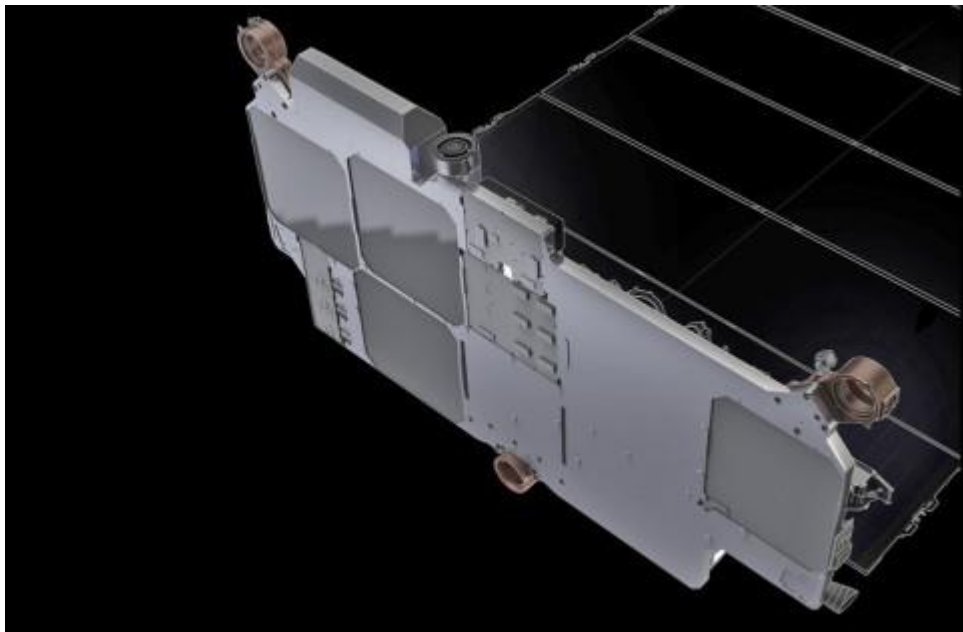


Рис.3.4 Вигляд типового супутника з угруповання

Зв'язок між абонентським терміналом і супутником здійснюється в Ku-діапазоні, при цьому для передачі від супутника до абонента можна використовувати 2000 МГц, а від абонента до супутника тільки 500 МГц.

З урахуванням двох поляризацій для передачі трафіку супутник має смугу 4000 МГц вниз і на прийом - 1000 МГц. Також на борту є комплекс обладнання для командної радіолінії і передачі телеметрії, що використовує по 150 МГц відповідно в Ка і Ku діапазонах. Супутник Starlink є ретранслятором і не виконує обробки інформації: на його борту відбувається тільки зміна частоти сигналу і



його підсилення. Також супутники першого покоління не мають міжсупутникового зв'язку (ISL - Inter Satellite Link) і можуть отримувати та передавати інформацію тільки на Землю. Як станції TT & C (управління, контролю, приймання телеметрії) заявлені 4 земні станції, в тому числі телепорт Брюстнер, розташований в штаті Вашингтон. У зоні видимості станції TT & C супутник Starlink знаходиться не більше п'яти хвилин, при цьому обсяг даних, що збираються з угруповання, становив в червні 2020 року біля 5 Тбайт на добу, тобто не менше 10 Гбайт з одного супутника на добу.

На борту кожного супутника Starlink знаходиться близько 70 окремих процесорів під управлінням Linux і близько 10 мікроконтролерів. Перебуваючи на орбіті в 550 км, супутник може покрити своїм сигналом пляму на Землі радіусом 950 км (тобто діаметром приблизно 1900 км) за умови, що кут місця для абонентського терміналу не буде менше 25 °.

Необхідно відзначити, що для фідерного променя в Ка-діапазоні, який забезпечує «підйом» інтернет-трафіку на борт супутника, використовується параболічна антена. Для того щоб забезпечити максимальну пропускну здатність при фіксованій доступною смузі частот в Ка-діапазоні, необхідно забезпечити максимальне співвідношення «сигнал / шум» за рахунок збільшення потужності сигналу з борту супутника, і для цього потрібно максимально звужити зону покриття на Землі - в сучасних системах, працюючих з HTS-супутниками, її діаметр становить близько 100 кілометрів. З огляду на, що супутники Starlink знаходяться на набагато меншій висоті, ніж геостаціонарні ШСЗ діаметр зони фідерного променя може бути ще менше. Додатковою перевагою вузького плями в Ка-діапазоні є те, що сигнал із супутника не створює перешкоду іншим системам на Землі, які працюють в Ка-діапазоні.

Управляти відхиленням променя від надіру в зоні покриття буде фазована антена супутника, яка може відхиляти промінь в будь-якому напрямку (steerable beam) і навіть відповідно до поданих заявок Space X в FCC міняти його форму (shapeable). На висоті 550 км супутник рухається з такою швидкістю, що час його прольоту в зоні видимості абонентського терміналу становить 4,1 хвилину або

приблизно 250 секунд. Якщо в системі Starlink буде реалізована ідеологія максимального часу сеансу супутника з групою терміналів, що знаходяться в одному районі і мінімальної кількості перемикань (handover) терміналу, то це ілюструє наступний малюнок, в якому супутник управляє своїм променем, встановивши його на одній групі терміналів в одному географічному районі.

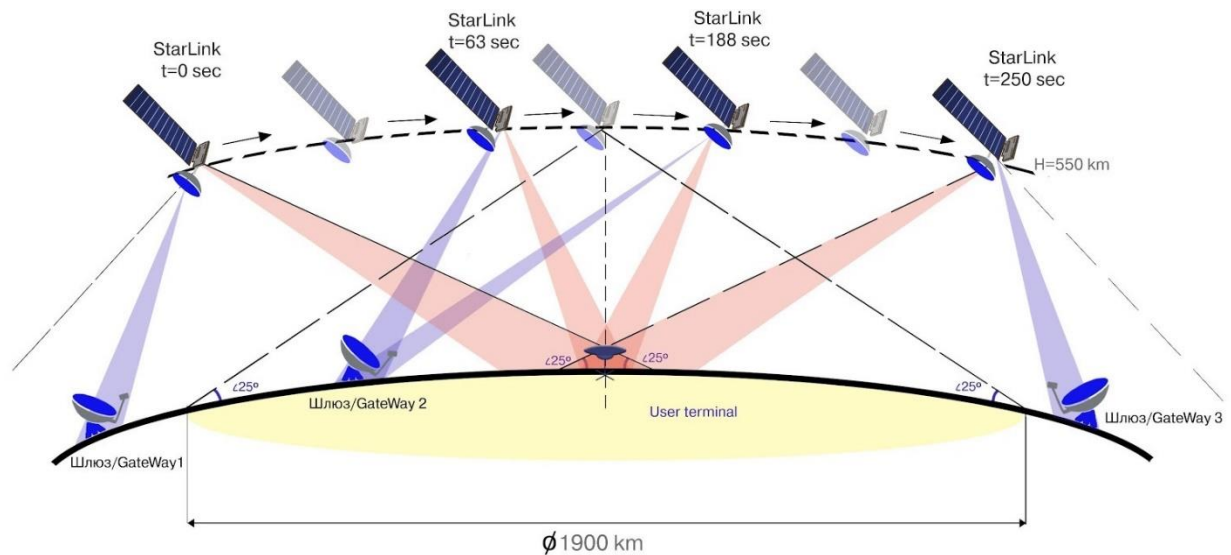


Рисунок 3.5 Промені супутника в одному географічному районі

Термін життя супутника Starlink на орбіті 550 км становить приблизно 5 років, після чого запас криптону закінчується, і супутник або по команді спричиняє зниження орбіти до щільних шарів атмосфери, або, в разі втрати зв'язку із Землею, знижується поступово, гальмується залишками атмосфери, і згоряє.

### 3.2 Імітаційна модель супутникового угруповання, результати дослідження

*Стрибковий супутниковий зв'язок між наземною станцією та приймальним пристроєм.* Необхідно дослідити мілівість відношення сигнал / шум при різних відстанях супутників від приймальної станції та пристрою користувача. Моделювання проводиться на прикладі вже виведених супутникових угруповань. В моделюванні приймає участь лише 2 супутники з майже 2000 запусчених на сьогодні, оскільки в більшій кількості експеримент

портеби не має. Маршрут сигналу наступний: ЗС – супутник1 – супутник2 – приймальний пристрій. Моделювання проводиться за допомогою ПЗ “Matlab” та додатку “Satellite toolbox”.

Відповідний виконавчий скрипт:

```

startTime = datetime(2021,6,7,09,00,0);      % 7 June 2021 09:00 PM UTC - ÷àñ
ïî÷àðèó
stopTime = startTime + hours(8);
sampleTime = 60;
sc = satelliteScenario(startTime,stopTime,sampleTime);

satelliteScenarioViewer(sc);

%âèçíà÷áííÿ êîíðàêèàðè ààèð ñóíîðèèè³â

semiMajorAxis = 6921000;          % meters
eccentricity = 0.0001235;
inclination = 53.0502;           % degrees
rightAscensionOfAscendingNode = 8.9053; % degrees
argumentOfPeriapsis = 64.4714;   % degrees
trueAnomaly = 87.2619;          % degrees
mwSat1 = satellite(sc, ...
    semiMajorAxis, ...
    eccentricity, ...
    inclination, ...
    rightAscensionOfAscendingNode, ...
    argumentOfPeriapsis, ...
    trueAnomaly, ...
    "Name","Sat 2688", ...
    "OrbitPropagator","two-body-keplerian");

semiMajorAxis = 6921000;          % meters
eccentricity = 0.0001212;
inclination = 53.0504;           % degrees
rightAscensionOfAscendingNode = 8.9103; % degrees
argumentOfPeriapsis = 69.2052;   % degrees
trueAnomaly = 82.8810;          % degrees
mwSat2 = satellite(sc, ...
    semiMajorAxis, ...
    eccentricity, ...
    inclination, ...
    rightAscensionOfAscendingNode, ...
    argumentOfPeriapsis, ...
    trueAnomaly, ...
    "Name","Sat 2720", ...
    "OrbitPropagator","two-body-keplerian");

%ñàâèè àíðáèè à à ï³ââ³ñè ïæííâí ç ñóíîðèèè³â

gimbalMWSat1Tx = gimbal(mwSat1, ...
    "MountingLocation",[0;1;2]); % meters
gimbalMWSat2Tx = gimbal(mwSat2, ...
    "MountingLocation",[0;1;2]); % meters
gimbalMWSat1Rx = gimbal(mwSat1, ...
    "MountingLocation",[0;-1;2]); % meters

```

```

gimbalMWSat2Rx = gimbal(mwSat2, ...
    "MountingLocation",[0;-1;2]); % meters

mwSat1Rx = receiver(gimbalMWSat1Rx, ...
    "MountingLocation",[0;0;1], ... % meters
    "GainToNoiseTemperatureRatio",3, ... % decibels/Kelvin
    "RequiredEbNo",4); % decibels
mwSat2Rx = receiver(gimbalMWSat2Rx, ...
    "MountingLocation",[0;0;1], ... % meters
    "GainToNoiseTemperatureRatio",3, ... % decibels/Kelvin
    "RequiredEbNo",4); % decibels

%----- àèñòààëÿ°ìî à³àìàòð àìòáíè ìà ìðèéìàèüí³é
%ñòìðíí³ òà ìà ìàðáààààèèüí³é ÇÑ

gaussianAntenna(mwSat1Rx, ...
    "DishDiameter",0.5); % meters
gaussianAntenna(mwSat2Rx, ...
    "DishDiameter",0.5); % meters

mwSat1Tx = transmitter(gimbalMWSat1Tx, ...
    "MountingLocation",[0;0;1], ... % meters
    "Frequency",30e9, ... % hertz
    "Power",15); % decibel watts

mwSat2Tx = transmitter(gimbalMWSat2Tx, ...
    "MountingLocation",[0;0;1], ... % meters
    "Frequency",27e9, ... % hertz
    "Power",15); % decibel watts

gaussianAntenna(mwSat1Tx, ...
    "DishDiameter",0.5); % meters
gaussianAntenna(mwSat2Tx, ...
    "DishDiameter",0.5); % meters

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% éîðäèìàðè ÇÑ

latitude = 50.4668668; % degrees
longitude = 30.5161838; % degrees
mwKyiv = groundStation(sc, ...
    latitude, ...
    longitude, ...
    "Name","MathWorks Kyiv");

latitude = 41.7339946; % degrees
longitude = 21.7939122; % degrees
mwMacedonia = groundStation(sc, ...
    latitude, ...
    longitude, ...
    "Name","MathWorks Macedonia");

%Àèñòààëÿ°ìî àìòáíè ìà ÇÑ

gimbalMWKyiv = gimbal(mwKyiv, ...
    "MountingAngles",[0;180;0], ... % degrees

```

```

    "MountingLocation",[0;0;-5]); % meters
gimbalMWMacedonia = gimbal(mwMacedonia, ...
    "MountingAngles",[0;180;0], ... % degrees
    "MountingLocation",[0;0;-5]); % meters

mwKyivTx = transmitter(gimbalMWKyiv, ...
    "Name","MathWorks Kyiv Transmitter", ...
    "MountingLocation",[0;0;1], ... % meters
    "Frequency",30e9, ... % hertz
    "Power",30); % decibel watts

gaussianAntenna(mwKyivTx, ...
    "DishDiameter",2); % meters

mwMacedoniaRx = receiver(gimbalMWMacedonia, ...
    "Name","MathWorks Macedonia Receiver", ...
    "MountingLocation",[0;0;1], ... % meters
    "GainToNoiseTemperatureRatio",3, ... % decibels/Kelvin
    "RequiredEbNo",1); % decibels

gaussianAntenna(mwMacedoniaRx, ...
    "DishDiameter",2); % meters

% Àèçíà÷à°íî "ìàððóóò" íàøíãî ñèãíàèó òà àèðèàó°íî ë³íèè

pointAt(gimbalMWKyiv,mwSat2);
pointAt(gimbalMWSat1Rx,mwMacedonia);
pointAt(gimbalMWSat1Tx,mwSat2);
pointAt(gimbalMWSat2Rx,mwSat1);
pointAt(gimbalMWSat2Tx,mwKyiv);
pointAt(gimbalMWMacedonia,mwSat1);

lnk = link(mwKyivTx,mwSat1Rx,mwSat1Tx,mwSat2Rx,mwSat2Tx,mwMacedoniaRx);

linkIntervals(lnk)

play(sc);

[e, time] = ebno(lnk);
margin = e - mwMacedoniaRx.RequiredEbNo;
plot(time,margin,"LineWidth",2);
xlabel("Time");
ylabel("Link Margin (dB)");
grid on;

```

На рисунку 3.6 можемо розглянути ідеальний випадок відношення сигнал/шум, коли приймальний та передавальний супутники знаходяться рівновіддалено від своїх кінцевих вузлів. Підтвердженням цього є 4-й прохід на графіку, див. рисунок 3.7.



Рис. 3.6 Рівновіддаленність супутників від приймача та передавача

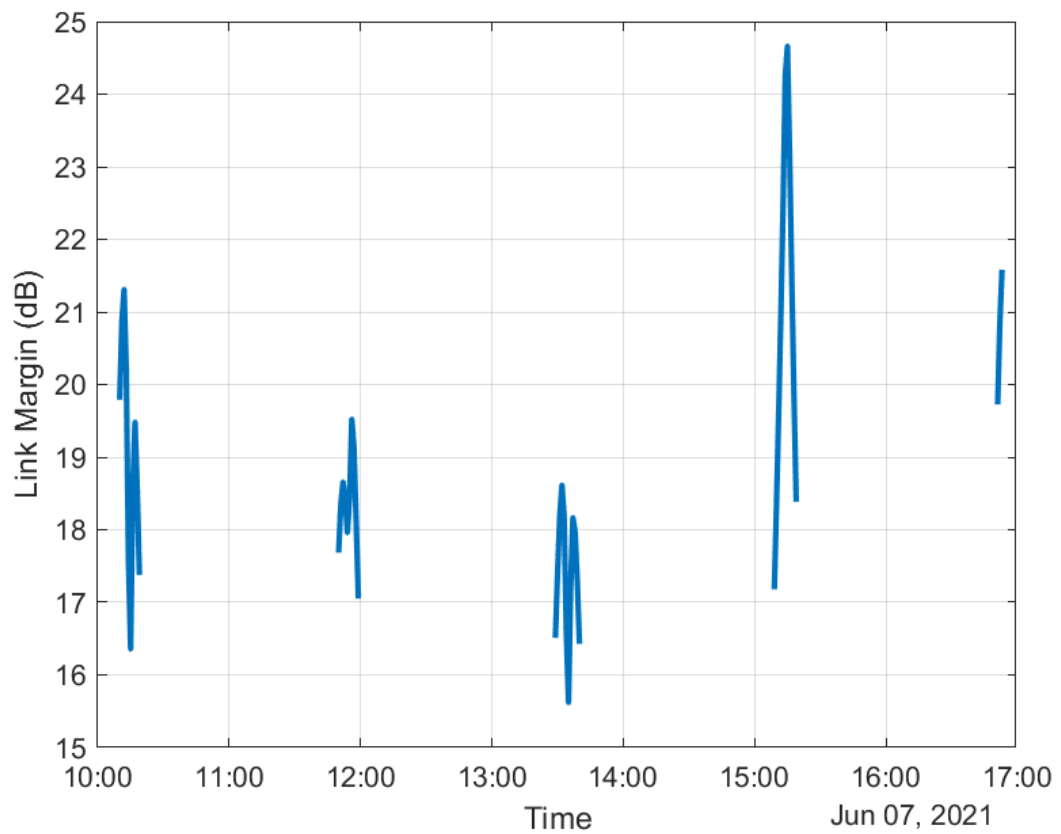


Рис. 3.7 – вихідний графік

### 3.3 Бізнес-моделі та архітектура проекту Starlink.

Для прибутковості Starlink необхідно як найменше знизити витрати на будівництво і експлуатацію. Запуск геостаціонарного супутника зв'язку вимагає капіталовкладень та 5 років його збірки.

Для реалізації такого проекту традиційним супутниковим компаніям доводиться обслуговувати приватних клієнтів та підвищувати тарифи на передачу даних.

Більшість супутників Starlink, плануються запускатися на Starship. Еволюція Starlink, як показують оновлені звіти в ФКС, дає певне уявлення про те, як, в міру втілення в життя ідеї Starship, розвивалася внутрішня архітектура проекту. Загальна кількість супутників в угрупованні зросла з 1 584 до 2 825, потім до 7 518 і, нарешті, до 45 000. Мінімальна кількість супутників для першого етапу розробки, щоб проект був життєздатний, - це 60 штук на 6 орбітах (всього 360), тоді як для повного покриття в межах 53 градусів від екватора потрібно 24 орбіти по 60 супутників (всього 1440).

Starship же розрахований на запуск до 400 супутників за один раз, приблизно за ту ж ціну. Супутники Starlink належить замінювати кожні 5 років, таким чином 6000 супутників зажадають 15 запусків Starship в рік. Кожен виведений на Falcon супутник важить 227 кг; піднімаються на Starship супутники могли б важити і 320 кг і нести на собі сторонні прилади, бути декілька більше і при цьому не перевищувати допустимого навантаження.

Розглянемо з чого саме складається вартість супутника для представлення бізнес моделі. Супутники Starlink збираються, зберігаються і запускаються в плоскому вигляді і тому виключно прості в масовому виробництві. Як показує досвід відомих світових компаній, виробнича вартість повинна орієнтовно дорівнювати вартості пускової установки. Якщо різниця в ціні велика, значить, невірно розподіляються ресурси, так як комплексне зниження маржинальних витрат при зниженні витрат не таке значне.

Супутник повинен гарантовано відпрацювати багато років - щоб принести хоч якийсь прибуток. Забезпечити таку надійність в експлуатації першого і



єдиного виробу - процес довгий і може затягнутися на роки, потребуючий зусиль сотень людей. Starlink, створюючи сотні супутників, швидко виправляючи ранні недоліки в проектуванні і залучаючи техніки масового виробництва для управління витратами.

Використовуючи сучасну систему кодування типу 4096QAM, то супутник генерує 1000 доларів прибутку за один виток - при ціні підписки в 1 долар за 1 Гб. Цього достатньо, щоб за тиждень окупити вартість розгортання в 100 тис. Навіть з огляду на малий час використання, супутник Starlink здатний за термін експлуатації доставити 30 Пб даних, при цьому при передачі на більш далекі відстані маржинальні витрати практично не зростають.

Якщо проводити порівняльний аналіз між традиційним – оптоволоконним кабелем, і супутниковим угрупованням, запропонованої компанії, яка не спеціалізується на запусках супутників то, наприклад, SEA-WE-ME - великий підводний інтернет-кабель, пропускна здатність якого- 1,28 Тб / сек., а вартість розгортання - 500 млн. доларів. Якщо він 10 років буде працювати на 100% потужності, а накладні витрати складуть 100% капітальних витрат, то ціна передачі вийде 0,02 долара за 1 Гб, а усереднена оцінка для Starlink в 8 разів дешевше.

Супутник Starlink включає всю складну начинку для електронної комутації, яка потрібна для зв'язку оптоволоконних кабелів, тільки для передачі даних замість дорогого і крихкого дроти використовується вакуум. Передача через космічний простір скорочує число затишних і відживаючих свій вік монополій, дозволяючи користувачам зв'язуватися за допомогою ще меншої кількості «заліза». Отже, Starlink і використання Starship та промислового виробництва супутників може знизити вартість розгортання супутників.

Також важливою ключовим моментом є використання сонячної енергії. Сонячна батарея кожного супутника має площу приблизно в 60 кв.м., тобто в середньому генерує приблизно 3 КВт або 4,5 КВт /год за виток у той час коли кожен супутник генерує приблизно 220 доларів на КВт/год, що є в 10 000 разів більше оптової вартості сонячної енергії [37].



## **Висновок**

В даному розділі було представлено основні технічні характеристики супутникового угруповання «Starlink». Проведено моделювання для визначення показнику сигнал/шум в процесі передачі інформації в напрямку супутник-супутник.

Додатково проведено опис, моделювання та аналіз системи яка наразі знаходиться в процесі розгортання. В кінцевому результаті можемо стверджувати, що при запланованій кількості супутників на орбіти система в змозі видавати високі швидкості та забезпечувати надійний, високодоступний сервіс.

Щодо змін на ринку телекомунікацій та рентабельності запуску глобальної супутникової кампанії, очевидно що при рівних умовах функціонування з наземними каналами зв'язку згадана супутникова система в змозі зебезбечити ті самі, або кращі параметри в будь-якій точці Землі.

Отже, при наявній динаміці змін, робимо висновок, що низькоорбітальні супутникові системи можуть забезпечити високу доступність, надійність та мають високі шанси конкурувати з іншими типами зв'язку у майбутньому.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В даній роботі було описано основні системи супутникових угруповань, більшість з них на сьогодні знаходяться в процесі впровадження. Як результат порівняння наявних угруповань зроблено акцент на глобальній зміні ринку телекомунікацій та загального використання супутників як повільного засобу зв'язку. Робота описує передові дослідження інтегрованої мережі "космос-земля" з наступним поколінням сузір'я LEO як космічної частини, щоб дослідити його потенціал та можливості, вивчити його роботу за допомогою реалістичного моделювання. Наступні матеріали були спрямовані на відповідну область досліджень:

Розділ 1 надає відомості щодо поточного стану сучасних ССЗ, ВОЛЗ та інших типів наземного та космічного зв'язку. Проведений аналіз даних систем та проблеми які виникають. Вагомим фактором є значна затримка оптичного сигналу при передачі даних на великі відстані. Для збільшення пропускної здатності проводяться чисельні магістральні лінії зв'язку, що забирає багато часових та фінансових ресурсів. Альтернативним рішенням є використання ССЗ низької навколосемної орбіти, які можуть забезпечити низьку затримку, високу надійність та значну пропускну здатність. В порівнянні з наземними рішеннями, швидкість розгортання та рентабельність таких мереж вища, при цьому в порівнянні короткі терміни можливо забезпечити покриття мережею всієї земної кулі. Розділ 2 представляє оптимізований протокол маршрутизації для наземної мобільної спеціальної мережі. Зазвичай, мобільні спеціальні мережі призначені для забезпечення тимчасової гнучкої бездротової мережі з певними динаміка та мобільність у районі з обмеженою мережевою інфраструктурою. Подальше спілкування з супутниковою мережею, не входило до сфери дії наземної мобільної спеціальної мережі. Однак інтегрований із супутниковим зв'язком створить нові напрямки. Запропонований алгоритм маршрутизації може вдосконалити мобільну спеціальну мережу для інтеграції із супутниковими мережами. В другій частині розділу розглядаються характеристики мега сузір'я

LEO наступного покоління. У якості кандидатів було вибрано Iridium, OneWeb, LeoSat та Starlink - мега сузір'я LEO з найбільшою кількістю супутників.

Мега сузір'я LEO наступного покоління здатне забезпечити послуги, які відповідають вимогам QoS. В теорії система може досягти навіть кращої продуктивності, ніж наземна волоконна мережа. Додатково представлений узгоджений алгоритм маршрутизації для інтегрованого простору та земної мережі, яка побудована за допомогою спеціальної мобільної мережі як наземна частина та LEO сузір'я як космічна частина. Ефективність інтегрованої мережі розглядається у трьох напрямках: змодельовані реалістичні сценарії зв'язку, тобто віддалений моніторинг довкілля, сільське господарство, моніторинг та контроль та надзвичайне реагування на надзвичайні ситуації. Запропонована інтегрована мережа здатна забезпечити якість обслуговування за всіма трьома сценаріями з високою гнучкістю.

Розділ 3 представлений детальним описом ССЗ «Starlink», надані детальні технічні та експлуатаційні характеристики, описані принципи функціонування. За результатами моделювання було отримано графік відношення сигнал / шум при різному нахилу супутникової орбіти двох супутників однієї з вже функціонуючих ланок супутникового сузір'я. Згідно графіку отримують найбільше співвідношення в рівновіддвленій області супутників від приймача до передавача. В моделюванні використовується функція ISL, яка на даний час є експериментальною та поки не може бути застосована. Зважаючи на те, що система наразі не працює на території східної Європи, модель виконана з прогнозом розміщення ЗС на найближчі роки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. – URL: [https://ukrtelecom.ua/about/company\\_history/](https://ukrtelecom.ua/about/company_history/).
2. – URL: <https://mobile-review.com/news/po-prognozam-cisco-mirovoj-obem-ip-trafika-k-2021-g-prevysit-tri-zettabajta>.
3. Ильченко М.Е., Сундучков К.С., Сушко С.И. Исследование эффективности работы спутниковых корпоративных сетей Frame Relay. — Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.
4. Биков П.І., Кононова І.В. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКІВ НИЗЬКОЇ НАВКОЛОЗЕМНОЇ ОРБИТИ ДЛЯ ВИРШЕННІ ЗАДАЧ ВСЕСВІТНЬОЇ МЕРЕЖЕВОЇ ВЗАЄМОДІЇ — Міжнародна Науково-технічна Конференція "ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ" XV Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій 2021"
5. Ильченко М.Ю, Кравчук С.А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. — К.: Наукова думка, 2008. – 580 с.
6. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходненко В.П. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов. — Вопросы электромеханики – 2010. – Т. 114. – С. 15-26
7. Ильченко М.Ю. Науково-технічна космічна програма НТУУ «КПІ». Космічні дослідження в Україні (2014—2016): звіт до COSPAR / Інститут космічних досліджень НАН України — Державне космічне агентство України. — К.: Академперіодика, 2016. С. 129—133.
8. – URL: <https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/tmt-predictions-2020-satellite-broadband-internet.html>
9. – URL:  
<http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/tables/tables.html>.
10. С.-К. Toh, Wireless ATM and Ad-Hoc Networks: Protocols and Architectures, New York, NY: Springer Science & Business Media.

11. R. Cochetti. Low Earth Orbit (LEO) Mobile Satellite Communications Systems. – in *Mobile Satellite Communications Handbook*, Hoboken, NJ, Wiley Telecom, 2018, pp. 119-155.
12. Iridium Communications Inc. Iridium Services. – [Online]. Available: <https://www.iridium.com/services>.
13. Iridium Satellite LLC. Iridium NEXT. –Changing the future of satellite communications NOW. – 2017.
14. E. Lutz et al., *Satellite systems for personal and broadband communications*. – Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012.
15. Iridium Communications Inc. Iridium NEXT. [Online]. – URL: <https://www.iridium.com/network/iridiumnext>.
16. LeoSat Enterprises / System Overview. – 2017.
17. LeoSat Enterprises / A New Satellite Architecture for Data. – 2017.
18. LeoSat Enterprises. A New Satellite Paradigm and Unique Data Network Solution. – [Online]. Available: <http://leosat.com>.
19. P. B. de Selding/Virgin. Qualcomm Invest in OneWeb Satellite Internet Venture. –SpaceNews, Jan 2015.
20. T. Azzarelli / OneWeb Global Access. – Jun 2016.
21. J. Brodtkin/ SpaceX plans worldwide satellite Internet with low latency, gigabit speed. –Ars Technica, Nov 2016.
22. T. Pultarova and C. Henry. OneWeb weighing 2,000 more satellites. – SpaceNews, Feb 2019.
23. OneWeb / OneWeb|OneWorld. –[Online]. – URL: <http://www.oneweb.world/>.
24. C. Henry. FCC gets five new applications for non-geostationary satellite constellations. –SpaceNews, Mar 2017.
25. J. Brodtkin. SpaceX and OneWeb broadband satellites raise fears about space debris. – Ars Technica, Oct 2017.
26. X. Zhang. Understanding CASIC's "Hongyun Project": Seamless Global Coverage with 156 Satellites. – The Paper, Aug 2019.

27. J. C. Liou and N. L. Johnson. Instability of the present LEO satellite populations. – *Advances in Space Research*, vol. 41, no. 7, pp. 1046-1053.
28. Y. Hashimoto. Design of IP-based Routing in a LEO Satellite Network. – in *Proc. of Third Int. Workshop on Satellite-Based Inform. Services (WOSBIS)*.
29. E. Ekici et al. Datagram routing algorithm for LEO satellite networks. – in *INFOCOM 2000. 19th Ann. Joint Conf. of the IEEE Comput. and Commun. Societies. Proc. IEEE*, Tel Aviv, Isreal, Mar 2000.
30. E. Ekici et al. A Distributed Routing Algorithm for Datagram Traffic in LEO Satellite Networks. – *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 9, no. 2, pp. 137-147, 2011.
31. A. Kerschenbaum, *Telecommunications Network Design Algorithms*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
32. T. R. Henderson and R. H. Katz. On Distributed, Geographic-Based Packet Routing for LEO Satellite Networks. – in *Global Telecommun. Conf. 2000 (GLOBECOM '00)*, San Francisco, CA, Nov 2000.
33. H. Uzunalioglu. Probabilistic Routing Protocol for Low Earth Orbit Satellite Networks. – in *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC 98)*, Atlanta, GA.
34. T.-H. Chan et al. A Localized Routing Scheme for LEO Satellite Networks. – in *21st Int. Commun. Satellite Syst. Conf. and Exhibit (ICSSC)*, Yokohama, Japan, Apr 2003.
35. C. Chen. A QoS-based Routing Algorithm in Multimedia Satellite Networks. – in *2003 IEEE 58th Veh. Technol. Conf. (VTC 2003-Fall)*, Orlando, FL, Oct 2003.
36. R. Mauger and C. Rosenberg. QoS Guarantees for Multimedia Services on a TDMABased Satellite Network. – *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 7, pp. 56-65.
37. Y. S. Kim et al. Traffic Load Balancing in Low Earth Orbit Satellite Networks. – *7th IEEE Int. Conf. Comput. Commun. and Networks*.
38. Y. Hu and V. O. K. Li. Logical Topology-Based Routing in LEO Constellations. – in *2001 IEEE Int. Conf. Commun. (ICC 2001)*, Helsinki, Finland, 2001.
39. M. De Sanctis et al. IP-Based Routing Algorithms for LEO Satellite Networks in Near Polar Orbits. – in *IEEE Aerospace Conf.*, Big Sky, MT, Mar 2013.

40. H. S. Chang et al. Topological Design and Routing for Low-Earth Orbit Satellite Networks. – in Global Telecommun. Conf. 1995 (GLOBECOM '95), Singapore, Singapore.
41. H. S. Chang et al. FSA-Based Link Assignment and Routing in Low-Earth Orbit Satellite Networks. – IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 47, no. 3, pp. 1037-1048.
42. M. Werner et al. Performance of Optimized Routing in LEO Intersatellite Link Networks. – in IEEE 47th Veh. Technol. Conf., Phoenix, AZ.
43. M. Werner. A Dynamic Routing Concept for ATM-Based Satellite Personal Communication Networks. – IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 15, no. 8, pp. 1636-1648.
44. V. V. Gounder et al. Routing in LEO-Based Satellite Networks. – In 1999 IEEE Emerging Technol. Symp. Wireless Commun. and Syst., Richardson, TX.
45. J.-W. Lee et al. Satellite over Satellite (SOS) Network: A Novel Concept of Hierarchical Architecture and Routing in Satellite Network. – in 25th Annual IEEE Conf. Local Comput. Networks (LCN 2000), Tampa, FL, Nov 2000.
46. C. Chen et al. Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks. – in Proc. the 5th ACM int. workshop on Wireless mobile multimedia, Atlanta, GA, Sep 2017.
47. J. Wang et al. Topological Dynamics Characterization for Layered Satellite Networks,” in 25th IEEE Int. Performance, Computing, and Commun. Conf., Phoenix, AZ.
48. F. Long et al. A QoS Routing Based on Heuristic Algorithm for Double-Layered Satellite Networks. – in 2018 IEEE Congr. Evolutionary Computation (IEEE World Congr. Computational Intell.), Hong Kong, China, Jun 2018.
49. D. Yao et al. Traffic-Adaptive Hybrid Routing for Double-Layered Satellite Networks. – in 2nd Int. Conf. Biomedical Eng. and Informatics (BMEI '09), Tianjin, China, Oct 2009.
50. I. F. Akyildiz et al. MLSR: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks. – IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 10, no. 3, pp. 411-424.

51. F. Long, *Satellite Network Robust QoS-Aware Routing*, Berlin, Germany: Heidelberg: Springer, 2014.
52. S. Wang et al. *LEO-User-Oriented Space Integrated Information Network*. – in 2018 Int. Conf. Cloud Computing and Internet of Things (CCIoT 2014), Changchun, China, Dec 2014.
53. A. Durresi et al. *Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture*. – in IEEE Aerospace Conf., Big Sky, MT, Mar 2004.
54. Y. Cao et al. *A Geographic Multicopy Routing Scheme for DTNs With Heterogeneous Mobility*. – IEEE Syst. J., vol. 12, no. 1, pp. 790-801, 2018.
55. K. Tsai and R. P. Ma. *Darting: A Cost-Effective Routing Alternative for Large SpaceBased Dynamic-Topology Networks*. – in Military Commun. Conf. (MILCOM), San Diego, CA.
56. R. A. Raines et al. *Simulation of Two Routing Protocols Operating in a Low Earth Orbit Satellite Network Environment*. – in Military Commun. MILCOM, Monterey, CA.
57. O. Gnawali et al. *Data Centric, Position-Based Routing in Space Networks*. – in 2005 IEEE Aerospace Conf., Big Sky, MT, Mar 2015.
58. G. Araniti et al. *Contact Graph Routing in DTN Space Networks: Overview, Enhancements and Performance*. – IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 3, pp. 38-46, 2018.
59. B. G. Evans. *The role of Satellites in 5G*. – in Advanced Satellite Multimedia. – Syst. Conf. and the 13th Signal Process. for Space Comm. Workshop (ASMS/SPSC), 2014 7th, Livorno, Italy, Feb 2014.
60. J. Thompson et al. *5G wireless communication systems: prospects and challenges*. – IEEE Comm. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 62-64, 2014.
61. 5GPPP Architecture Working Group. *View on 5G Architecture*. – Dec 2017.
62. M. Gineste et al. *Narrowband IoT Service Provision to 5G User Equipment via a Satellite Component*. – in 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Singapore, Singapore, Dec 2017.



63. S. Kota et al. Satellite component of NGN: Integrated and hybrid networks. – International J. Satellite Commun. and Netw., vol. 29, no. 3, pp. 191-208, 2011.
64. W. Lu et al. Communications Support for Disaster Recovery Operations using Hybrid Mobile Ad-Hoc Networks. – in 32nd Local Comput. Networks (LCN), IEEE Conf., Dublin, Ireland, Oct 2007.
65. R. E. Sheriff et al. SatNEx: A Network of Excellence Providing Training in Satellite Communications. – in 61st Veh. Technol. Conf. (VTC), IEEE Conf., Stockholm, Sweden, May 2005.
66. N. H. Crisp et al. Launch and deployment of distributed small satellite systems. – Acta Astronautica, vol. 114, pp. 65-78, 2015.
67. – URL: <https://habr.com/ru/company/southbridge/blog/476328/>
68. – URL: <https://habr.com/ru/post/526154/>
69. IEEE, “IEEE Std 521-2002 (R2009) - IEEE Standard Letter Designations for Radar Frequency Bands,” The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, 2009.
70. ITU, Radio Regulations, Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2016.
71. L. A. Belov et al., “Devices for Signal Generation and Processing,” in Handbook of RF, Microwave, and Millimeter-wave Components, Boston, MA and London, UK, Artech House, 2012, pp. 1-40.

## Додаток А

## Діапазони використовуваних частот

Існує кілька визначень діапазонів радіочастот, серед яких найбільш часто використовуються стандартна смуга радіочастотних частот IEEE [69], радіодіапазони МСЕ [70] та позначення частот ЄС, НАТО, США [71]. В даній дипломній роботі використовується стандарт IEEE.

Таблиця А

## Діапазони використовуваних частот

Смуга частот	IEEE Стандарт	ITU Стандарт	ЄС, НАТО, США Стандарти	
3 MHz – 30 MHz	HF	HF	A	
30 MHz – 250 MHz	VHF	VHF		
250 MHz – 300 MHz			B	
300 MHz – 500 MHz	UHF	UHF	C	
500 MHz – 1 GHz				
1 GHz – 2 GHz	L		D	
2 GHz – 3 GHz	S		E	
3 GHz – 4 GHz				
4 GHz – 6 GHz				C
6 GHz – 8 GHz				
8 GHz – 10 GHz				X
10 GHz – 12 GHz				
12 GHz – 18 GHz				Ku
18 GHz – 20 GHz				K
20 GHz – 27 GHz				
27 GHz – 30 GHz				Ka
30 GHz – 40 GHz				
40 GHz – 60 GHz				V
60 GHz – 75 GHz				W
75 GHz – 100 GHz				

Додаток Б

Таблиця Б

Варіант розрахунку таблиці маршрутизації

