ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ СУПУТНИКОВОЇ МЕРЕЖІ STARLINK ТА ЇЇ ВПЛИВ НА РОЗВИТОК ГЛОБАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Вячеслав ЄРКІН
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. ТСДМ-61
Вячеслав ЄРКІН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Юрій МЕЛЬНИК
д.т.н., професор *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Рецензент: _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Єркіну Вячеславу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження архітектури супутникової мережі Starlink та її вплив на розвиток глобальних телекомунікацій
керівник кваліфікаційної роботи Юрій МЕЛЬНИК, д.т.н., професор
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» 10. 2025 р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1. Архітектура супутникової мережі Starlink.
2. Пропускна здатність та затримка.
3. Термін служби.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Основні аспекти впровадження мережі Starlink.
2. Розгляд мережі Starlink.
3. Пропускна здатність та затримка.
4. Основні проблеми та термін служби.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: ___презентація на ____слайдах_____

6. Дата видачі завдання «___» _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури	14.10.2025	Викон.
2	Розробка першого розділу	24.10.2025	Викон.
3	Розробка другого розділу	04.11.2025	Викон.
4	Розробка третього розділу	14.11.2025	Викон.
5	Розробка четвертого розділу	24.11.2025	Викон.
6	Висновки, вступ, реферат	04.12.2025	Викон.
7	Розробка презентації	14.12.2025	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Вячеслав ЄРКІН
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Юрій МЕЛЬНИК
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Єркін В.О. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: «Дослідження архітектури супутникової мережі Starlink та її вплив на розвиток глобальних телекомунікацій»

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Єркін Вячеслав Олександрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Єркіна Вячеслава Олександровича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Юрій МЕЛЬНИК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Єркін В.О. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Єркіна Вячеслава Олександровича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Дослідження архітектури супутникової мережі Starlink та її вплив на розвиток глобальних телекомунікацій»

Актуальність.
Глобальна цифровізація потребує доступного високошвидкісного Інтернету навіть у віддалених регіонах, де наземні мережі є дорогими або технічно неможливими. Це поглиблює «цифровий розрив» і обмежує розвиток економік та критичної інфраструктури. Супутникова мережа Starlink, побудована на низькоорбітальних супутниках із малою затримкою сигналу, пропонує принципово новий підхід до глобального покриття. Її архітектура, міжсупутникові лазерні канали та масштабність роблять Starlink ключовою технологією нового покоління. Дослідження системи є важливим для розвитку сучасних телекомунікацій та оцінки перспектив глобальних мереж LEO.

Позитивні сторони.
1. У роботі окрему увагу приділено проблемам безпеки та космічного сміття.
2. У роботі використано реальні дані, дати запусків, регуляторні документи FCC та технічні специфікації.

Недоліки.
1. Практичні аспекти застосування Starlink в Україні описані поверхово й потребують розширення.
2. У роботі майже відсутній порівняльний аналіз із конкурентними системами (OneWeb, Kuiper).

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Єркін Вячеслав Олександрович заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.*

Рецензент _____ _____
науковий ступінь, вчене звання (підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 76 стор., 22 рис., 8 табл., 23 джерела.

Мета роботи – комплексний аналіз архітектури супутникової мережі Starlink, оцінка її технічних рішень, структури космічного та наземного сегментів, а також виявлення особливостей та перспектив використання системи для розвитку глобальних телекомунікаційних мереж.

Об’єкт дослідження – супутникова телекомунікаційна система Starlink як глобальна інфраструктура на основі низькоорбітальних супутників.

Предмет дослідження – технічні, архітектурні, організаційні та експлуатаційні особливості побудови та функціонування мережі Starlink, включаючи орбітальне угруповання, антенні системи, канали зв’язку та взаємодію космічного і наземного сегментів.

Короткий зміст роботи: у роботі розглянуто структуру космічного та наземного сегментів, особливості низькоорбітального угруповання, застосування фазованих антенних решіток і лазерних міжсупутникових каналів ISL, що забезпечують низькі затримки та глобальне покриття. Проаналізовано методи доступу до спектра та їхню роль у масштабованості мережі. Значну увагу приділено безпеці польотів і проблемі космічного сміття, що стало підставою для зниження орбіт і вдосконалення конструкції супутників Starlink. Окремо досліджено регуляторні аспекти, включаючи подання заявок до FCC та використання міжнародних юрисдикцій для закріплення орбітальних ресурсів. Показано, що Starlink суттєво змінює ринок супутникових комунікацій, стимулює конкуренцію й формує нові стандарти низьколатентного глобального інтернету.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: STARLINK, СУПУТНИКОВИЙ ІНТЕРНЕТ, НИЗЬКА НАВКОЛОЗЕМНА ОРБІТА, LEO, АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ, ГЛОБАЛЬНЕ ПОКРИТТЯ, НИЗЬКІ ЗАТРИМКИ, SPACEX, АБОНЕНТСЬКІ ТЕРМІНАЛИ, КОСМІЧНЕ СМІТТЯ, FCC, СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 76 pages, 22 figures, 8 table, 23 sources.

The purpose of the work is a comprehensive analysis of the architecture of the Starlink satellite network, an assessment of its technical solutions, the structure of the space and ground segments, as well as the identification of the features and prospects for using the system for the development of global telecommunication networks.

Object of the study is the Starlink satellite telecommunication system as a global infrastructure based on low-orbit satellites.

Subject of the study is the technical, architectural, organizational and operational features of the construction and operation of the Starlink network, including the orbital grouping, antenna systems, communication channels and the interaction of the space and ground segments.

Summary of the work: the work considers the structure of the space and ground segments, the features of the low-orbit grouping, the use of phased antenna arrays and laser inter-satellite ISL channels, which provide low delays and global coverage. Spectrum access methods and their role in network scalability are analyzed. Significant attention is paid to flight safety and the problem of space debris, which became the basis for lowering the orbits and improving the design of Starlink satellites. Regulatory aspects are separately studied, including filing applications with the FCC and using international jurisdictions to secure orbital resources. It is shown that Starlink significantly changes the satellite communications market, stimulates competition and forms new standards for low-latency global Internet.

KEYWORDS: STARLINK, SATELLITE INTERNET, LOW EARTH ORBIT, LEO, NETWORK ARCHITECTURE, GLOBAL COVERAGE, LOW LATENCY, SPACEX, SUBSCRIBER TERMINALS, SPACE DEBRIS, FCC, NEW GENERATION SATELLITE SYSTEMS

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕРЕЖІ STARLINK 11
1.1 Поява проєкту 11
1.2 Склад угруповання Starlink 20
1.3 Архітектура мережі Starlink 25
РОЗДІЛ 2 РОЗГЛЯД МЕРЕЖІ STARLINK 30
2.1 Апаратна частина 30
2.2 Ретрансляція сигналу 36
2.3 Технологія Space X 1584 та ШСЗ 40
РОЗДІЛ 3 ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ ТА ЗАТРИМКА 56
3.1 Пропускна спроможність мережі Starlink 56
3.2 StarLink та програма Rural Digital Opportunity Fund 57
3.3 Супутникова затримка у мережі SpaceX 60
РОЗДІЛ 4 ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ТА ТЕРМІН СЛУЖБИ 70
4.1 Проблема космічного сміття 70
4.2 Розрахунковий термін служби супутника Starlink 71
ВИСНОВКИ 75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 77
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 80

ВСТУП

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних технологій характеризується переходом від локальних рішень до глобальних інфраструктур, здатних забезпечити доступ до цифрових послуг у будь-якій точці планети. Інтернет став базовою складовою соціально-економічного розвитку, а проблема «цифрового розриву» між розвиненими країнами та віддаленими чи малонаселеними регіонами перетворилася на виклик світового масштабу. Традиційні засоби забезпечення зв'язку, зокрема наземні кабельні або волоконно-оптичні мережі, є надзвичайно ефективними у містах і промислово розвинених районах, проте залишаються економічно недоцільними в регіонах із низькою щільністю населення. Саме тому супутникові комунікації дедалі активніше розглядаються як універсальний інструмент забезпечення глобального підключення.

Серед новітніх ініціатив особливе місце посідає проєкт Starlink, започаткований компанією SpaceX. Його амбіційна мета полягає у створенні багатотисячного угруповання супутників на низькій навколоземній орбіті, яке забезпечить високошвидкісний доступ до Інтернету з низькими затримками сигналу. На відміну від традиційних геостаціонарних систем, що працюють на висоті близько 36 тис. км і мають обмежену швидкодію через великі затримки, Starlink використовує супутники на висоті 550 км. Це дозволяє досягати рівня затримок, співставного з наземними мережами, і робить систему конкурентною навіть у порівнянні з волоконно-оптичними каналами.

Важливою особливістю архітектури Starlink є поєднання космічного та наземного сегментів. Космічний сегмент складається з угруповання тисяч супутників, які взаємодіють між собою завдяки лазерним міжсупутниковим каналам (ISL), що значно підвищує ефективність маршрутизації даних. Наземний сегмент включає центри управління мережею, шлюзові станції та абонентські термінали, які утворюють цілісну інфраструктуру для взаємодії з глобальною мережею Інтернет та кінцевими користувачами.

Не менш важливим є і регуляторний аспект. Історія подання заявок до FCC у США та використання Норвегії як юрисдикції для закріплення прав на орбітальні ресурси свідчить про складність бюрократичних процедур і стратегічну гнучкість компанії SpaceX. Це підкреслює, що успіх подібних проєктів залежить не лише від інженерних рішень, але й від здатності ефективно взаємодіяти з міжнародними організаціями та національними регуляторами.

Актуальність теми дипломної роботи зумовлена тим, що супутникова мережа Starlink стала каталізатором нових тенденцій у сфері глобальних комунікацій. Вона стимулювала появу альтернативних проєктів (OneWeb, Amazon Kuiper, Telesat), а також поставила перед світовою спільнотою нові виклики, пов’язані з безпекою, управлінням орбітальним простором і мінімізацією ризиків космічного сміття.

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі архітектури супутникової мережі Starlink, вивченні її технічних, організаційних та регуляторних особливостей, а також визначенні її впливу на розвиток глобальних телекомунікацій. Для досягнення цієї мети у роботі поставлено такі завдання: дослідити структуру космічного та наземного сегментів системи, проаналізувати методи управління спектром і ресурсами, оцінити проблеми безпеки та регуляції, а також розглянути конкурентне середовище й перспективи розвитку аналогічних рішень.

Таким чином, вступна частина окреслює значущість теми та створює підґрунтя для подальшого глибокого вивчення архітектури Starlink як одного з найамбітніших і найвпливовіших телекомунікаційних проєктів сучасності, що має потенціал змінити майбутнє глобальних цифрових комунікацій і сприяти формуванню єдиного інформаційного простору для всього людства.

1 ОСНОВНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕРЕЖІ STARLINK

1.1 Поява проєкту

Якщо спробувати відшукати витоки цього проєкту, то логічною відправною точкою можна вважати 2007 рік. Саме тоді Грег Уайлер заснував компанію O3b Networks, до акціонерів якої увійшли провідні світові гравці: супутниковий оператор SES (йому належало 49,5% акцій), технологічний гігант Google, фінансовий інститут HSBC та інвестиційний фонд Liberty Global. Такий склад акціонерів одразу свідчив про амбіційність і масштабність задуму, а також про те, що ринок супутникових технологій і глобальної інтернет-інфраструктури вже тоді вважався стратегічно важливим.

У 2016 році компанія SES викупила частки в інших акціонерів O3b Networks, чим фактично закріпила за собою контроль над проєктом. Цей крок став своєрідним визнанням одразу кількох факторів: успіху самої компанії, управлінських здібностей Грега Уайлера як стратегічного керівника та високого потенціалу подальшого розвитку обраного бізнес-напряму. Варто нагадати, що абревіатура O3b походить від англійського виразу *Other 3 billion* («інші три мільярди»). Вона символізувала масштабну мету — надати доступ до Інтернету тим трьом мільярдам людей на планеті, які у 2007 році залишалися поза глобальною мережею.

Головна ідея полягала у створенні орбітального угруповання супутників на висоті близько 8000 км над екватором. Така інфраструктура мала забезпечити широкосмуговий доступ до мережі населенню в зоні між 45° північної та 45° південної широти. По суті, це охоплювало значну частину земної кулі, включно з густонаселеними регіонами Азії, Африки та Латинської Америки.

Водночас у проєкту були й очевидні обмеження. Для підключення потрібен був спеціальний комплекс із двох великих антен діаметром 2,4 м, вартість якого сягала $120 тис. Наявність саме двох антен пояснювалася технічними особливостями: одна мала безперервно відстежувати рухомий супутник і приймати сигнал, тоді як

інша одночасно налаштовувалася на наступний апарат, щоб уникнути переривань зв’язку, коли перший виходив за межі горизонту.

Попри високу вартість обладнання, сервіс отримав доволі позитивний відгук і швидко знайшов свою нішу. Ним активно зацікавилися уряди та телекомунікаційні компанії в країнах Африки, острівних державах Тихого океану, а також військові структури, зокрема Пентагон, який використовував технологію для забезпечення своїх зарубіжних баз. Таким чином, бізнес виявився успішним, а ресурси мережі були повністю розподілені між клієнтами.

Однак існувала серйозна проблема — через надзвичайно високу ціну обладнання сервіс залишався недоступним для пересічних користувачів, особливо для мешканців сільських регіонів Африки та інших віддалених районів світу. Це створювало потребу в новому підході — у створенні проєкту «персонального супутникового інтернету», який би базувався на супутниках на низьких орбітах і дозволяв би користувачам підключатися значно простішими та дешевшими засобами.

Саме в цей час у компанії Google розпочалася робота над новим амбітним напрямом. У 2013 році до команди приєднався Марк Кребс, і саме там поступово сформувалася концепція більш масового та доступного супутникового інтернету, який мав змінити уявлення про глобальну комунікаційну інфраструктуру.

30 вересня 2014 року компанія Google офіційно подала заявку на патент, що стосувався створення нової супутникової системи для забезпечення глобального широкосмугового доступу до Інтернету. Концепція передбачала використання угруповання супутників, об’єднаних міжсупутниковими каналами зв’язку, а також мережу наземних шлюзових станцій, які мали забезпечувати ефективну взаємодію космічного сегмента із земною інфраструктурою. Серед винахідників у патентній заявці значився Марк Кребс, що підтверджувало його активну участь у розробці та інженерному обґрунтуванні ідеї.

У 2017 році заявка була схвалена, і патент було офіційно видано. У ньому описувалася структура супутникового угруповання, принципи його функціонування та технічні параметри, які мали забезпечити стабільність і високу

якість сервісу. По суті, цей документ став підтвердженням того, що вже на початку 2010-х років Google працювала над масштабним проєктом, покликаним радикально змінити підхід до організації глобального інтернет-доступу.

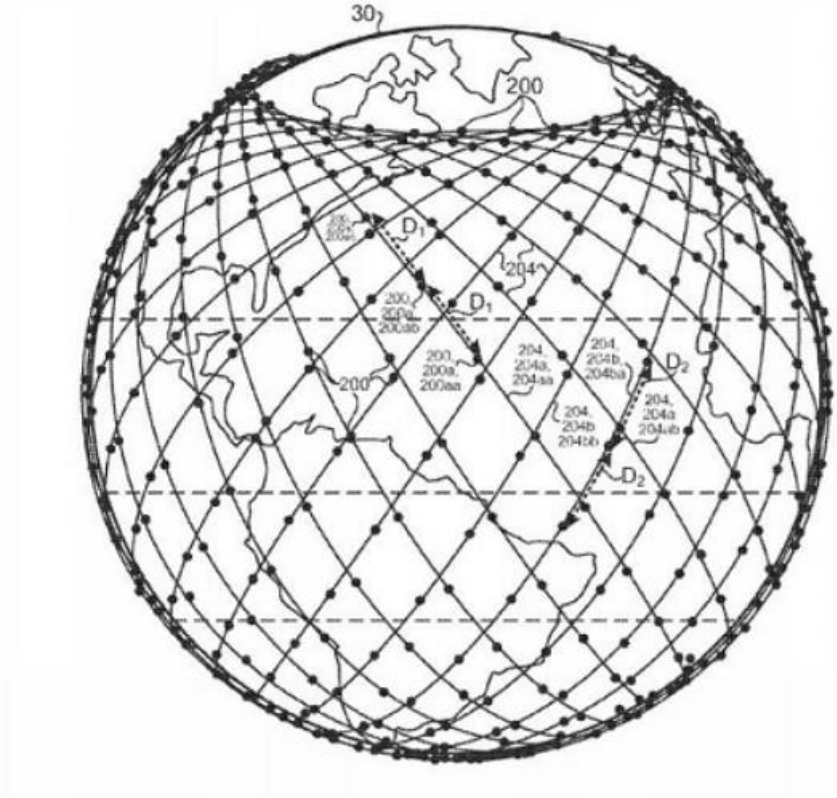


Рис. 1.1 Затверджений концепт структури супутникового угруповання

Таким чином, можна впевнено стверджувати, що у 2013–2014 роках у стінах Google тривала інтенсивна робота над супутниковими проєктами, спрямованими на надання широкосмугового доступу до мережі у всьому світі. Головними фігурами, які просували цей напрям, були Марк Кребс і Грег Уайлер. Саме Уайлер вирішив долучити до ініціативи Ілона Маска, який у той час лише закладав фундамент майбутнього успіху своєї компанії SpaceX. На той момент Маск працював над переходом до версії 1.1 ракети Falcon 9 і вже здійснював стикування вантажового корабля Dragon з Міжнародною космічною станцією. У цьому проєкті йому відводилася роль не лише «космічного перевізника», який доставляв би супутники на орбіту, але й виробника інфраструктурних рішень для їх серійного виготовлення.

Не менш показовими та символічними для розуміння динаміки розвитку ринку супутникового зв’язку є події того ж року, які наочно відобразили рівень конкуренції та боротьби за орбітальні ресурси. Відомо, що 27 червня 2014 року до

Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ) була подана масштабна заявка на створення глобальної супутникової системи під назвою STEAM, яка передбачала розгортання в космосі 4257 космічних апаратів. Заявка подавалася від імені норвезького регулятора у сфері зв'язку, що вже саме по собі було доволі нетиповим рішенням і вказувало на продуману стратегію ініціаторів.

Проєкт складався з двох окремих, але взаємопов'язаних угруповань:

- **STEAM-1** — передбачав роботу в Ku-діапазоні (11/14 ГГц), який традиційно використовується для супутникового телебачення та широкосмугових сервісів;
- **STEAM-2** — у діапазоні Ka (18/30 ГГц), що відкриває ширші можливості для надання високошвидкісних інтернет-послуг, але водночас потребує складнішого обладнання та більшого захисту від впливу атмосферних явищ.

Супутники планувалося розподілити по 43 орбітальних площинах, що робило систему не лише масштабною, але й технічно надзвичайно складною з точки зору синхронізації та управління. Такий підхід дозволяв забезпечити максимально рівномірне покриття території Землі та створити глобальну інфраструктуру, здатну конкурувати з найбільшими гравцями ринку.

Ініціатором подання заявки виступила компанія Steam Systems, яка була створена в тому ж 2014 році відомою норвезькою юридичною фірмою Schjødt. Сам факт заснування компанії юридичною структурою, а не класичним телекомунікаційним оператором чи виробником обладнання, викликав жвавий інтерес експертів. Це свідчило про те, що основна мета на початковому етапі полягала не стільки в безпосередньому створенні супутникової інфраструктури, скільки у стратегічному закріпленні прав на орбітальні позиції та частотний спектр.

У 2018 році відбулися суттєві зміни в реєстрі власників Steam Systems — 100% акцій компанії перейшли у власність SpaceX. Цей крок став надзвичайно важливим для Ілона Маска та його команди, оскільки фактично дозволив їм легально закріпити за собою права на частину цінних орбітальних ресурсів, які є обмеженими й перебувають під суворим контролем МСЕ.

Особливої уваги заслуговує вибір саме Норвегії як юрисдикції для подання заявки. Це було зроблено з цілком прагматичних міркувань: на відміну від США, де за аналогічну заявку регулятор Federal Communications Commission (FCC) вимагав сплати значного збору (приблизно $1 млн), а також створював серйозні бюрократичні перепони, процедура в Норвегії була набагато простішою, швидшою та дешевшою. Це дало змогу уникнути тривалих судових і адміністративних процесів та отримати міжнародне визнання заявки в максимально короткі терміни.

Для порівняння, заявка SpaceX, подана безпосередньо до FCC у 2016 році, розглядалася регулятором майже два роки. За цей час комісія ретельно аналізувала кожну деталь, розглядала численні скарги й зауваження від конкурентів, а також проводила додаткові перевірки технічних характеристик майбутньої системи. Це яскраво показує, наскільки складним і конкурентним є ринок космічних комунікацій, де навіть найбільші гравці змушені долати значні бар'єри, перш ніж отримати дозвіл на реалізацію власних амбітних проєктів.

Таким чином, історія з проектом STEAM демонструє не лише зростання глобальної конкуренції, а й стратегічне мислення SpaceX, яка завдяки грамотному використанню міжнародних правових механізмів змогла забезпечити собі важливу перевагу на ринку ще до фактичного розгортання мегасузір'я Starlink.

Основні події проєкту Starlink

1. Січень 2015 р. — відкриття офісу в Редмонді, штат Вашингтон, створеного спеціально для розвитку проєкту Starlink.
2. 15 листопада 2016 р. — подання заявки до FCC на використання частотного спектра діапазонів Ku та Ka для супутникового угруповання з 4425 апаратів.
3. 1 березня 2017 р. — подання заявки на використання спектра V-діапазону для угруповання з 7518 апаратів.
4. 30 березня 2018 р. — отримано схвалення FCC на заявку від листопада 2016 року для мережі з 4425 супутників.
5. 22 лютого 2018 р. — ракетою Falcon 9 як попутний вантаж виведено два тестові супутники (Microsat-2a і Microsat-2b), які згодом були перейменовані у Tintin-A та Tintin-B.

6. Жовтень 2018 р. — реорганізація офісу в Редмонді з відстороненням семи співробітників, включно з двома топ-менеджерами проєкту Starlink. Серед них — віцепрезидент із супутникового напрямку Раджив Бадьял і головний конструктор Марк Кребс, який раніше працював над супутниковим інтернетом у Google. Ілон Маск поставив новому керівництву завдання розпочати запуски супутників у середині 2019 р.
7. 8 листопада 2018 р. — подання заявки до FCC на внесення змін у заявку на мережу Ku та Ka (4425 супутників): перший етап у складі 1600 апаратів із пониженням висоти орбіти з 1100 км до 550 км.
8. 15 листопада 2018 р. — отримано схвалення FCC на мережу за заявкою від 1 березня 2017 р. з 7518 супутників у V-діапазоні.
9. 20 грудня 2018 р. — Відділ стратегічного розвитку та експериментів ВПС США уклав контракт зі SpaceX на $28 млн для випробувань використання сервісу Starlink у військових цілях протягом трьох років.
10. 1 лютого 2019 р. — SpaceX подала заявку до FCC на реєстрацію й експлуатацію 1 мільйона абонентських терміналів.
11. 8 квітня 2019 р. — схвалена заявка SpaceX на ліцензію для приватної системи дистанційного зондування Землі (зйомка власних супутників і Землі з низьким розділенням). Дозвіл охоплював 60 апаратів на круговій орбіті з нахилом 53°.
12. 26 квітня 2019 р. — FCC схвалила зміну параметрів раніше поданої мережі у Ku-діапазоні: 1584 супутники на висоті 550 км (замість 1150 км) з нахилом 53°.
13. Травень 2019 р. — у мережі з’являються відео «Starlink train»: колони супутників, що виглядали як рухомий потяг у нічному небі. Це викликало захоплення публіки та обурення астрономів, започаткувавши конфлікт між SpaceX і науковим середовищем.
14. 23 травня 2019 р. — запуск 60 супутників Starlink версії v0.9 (фідерна лінія Земля–космос у Ku-діапазоні). Опубліковані перші фото апаратів під обтічником ракети Falcon 9.

15. 28 червня 2019 р. — SpaceX повідомила FCC про початок тестування наземних терміналів (близько 200 із фазованою решіткою та 10 із параболічною антеною).
16. 30 серпня 2019 р. — подання до FCC оновленої заявки: перший етап мережі складатиметься з 72 орбітальних площин замість 24, по 22 супутники в кожній (раніше — 66).
17. 7 жовтня 2019 р. — SpaceX попросила FCC подати 20 заявок до МСЕ на розгортання 30 тис. супутників на низькій орбіті.
18. 11 листопада 2019 р. — запуск 60 супутників Starlink версії 1.0. Висота відділення від ракети — 280 км (нижча, ніж у першому пуску).
19. 20 листопада 2019 р. — на конференції WRC МСЕ встановила правила розгортання супутникових мереж: 10% апаратів у перші 2 роки, 50% — за 5 років і повна угруповання — за 7 років, інакше заявка скорочується.
20. 7 січня 2020 р. — третій запуск 60 супутників Starlink (другий запуск версії 1.0).
21. 29 січня 2020 р. — четвертий запуск 60 супутників Starlink (третій запуск версії 1.0).
22. 4 лютого 2020 р. — австралійський телеком-регулятор дозволив SpaceX отримати ліцензію на надання послуг у країні.
23. 17 лютого 2020 р. — п’ятий запуск 60 супутників Starlink (четвертий запуск версії 1.0).
24. 18 березня 2020 р. — шостий запуск 60 супутників Starlink (п’ятий запуск версії 1.0).
25. 17 квітня 2020 р. — SpaceX направила до FCC заявку на зміну архітектури мережі Ku/Ka: усі супутники працюватимуть на висотах 540–570 км.
26. 22 квітня 2020 р. — сьомий запуск 60 супутників Starlink (шостий запуск версії 1.0).
27. 23 квітня 2020 р. — Ілон Маск оголосив у Twitter про старт закритого бета-тесту приблизно через 3 місяці та публічного — через пів року.

28. 17 травня 2020 р. — опубліковані перші фото абонентського термінала Starlink, зроблені на гейтвеї в місті Меррілан, Вісконсин.
29. 20 травня 2020 р. — SpaceX подала заявку на ліцензію BITS у Канаді.
30. 1 червня 2020 р. — SpaceX подала заявку до FCC на друге покоління мережі Starlink із 30 тис. супутників на орбітах 328–614 км.
31. 4 червня 2020 р. — восьмий запуск 60 супутників Starlink (сьомий запуск версії 1.0). Один із супутників оснащений козирком VisorSat.
32. 13 червня 2020 р. — дев'ятий запуск 58 супутників Starlink (восьмий запуск версії 1.0) + 3 апарати SkySat.
33. 14 червня 2020 р. — на сайті www.starlink.com відкрита реєстрація для охочих брати участь у бета-тестуванні.
34. 21 червня 2020 р. — з'явилася інформація про Wi-Fi маршрутизатор для термінала Starlink, який отримав сертифікат FCC та виробляється на Тайвані.
35. 1 серпня 2020 р. — у мережі опубліковані результати перших тестів Starlink: швидкість до 60 Мбіт/с, затримка — від 31 мс.
36. 4 серпня 2020 р. — SpaceX звернулася до FCC з проханням збільшити ліміт абонентських терміналів із 1 млн до 5 млн через великий попит (700 тис. заявок на тестування).
37. 7 серпня 2020 р. — десятий запуск 57 супутників Starlink (дев'ятий запуск версії 1.0) + 2 супутники BlackSky.
38. 18 серпня 2020 р. — одинадцятий запуск 58 супутників Starlink (десятий запуск версії 1.0) + 3 апарати SkySat.
39. 3 вересня 2020 р. — дванадцятий запуск 60 супутників Starlink (одинадцятий запуск версії 1.0).
40. 3 вересня 2020 р. — SpaceX повідомила про успішні випробування лазерного каналу між двома супутниками Starlink.
41. 6 жовтня 2020 р. — тринадцятий запуск 60 супутників Starlink (дванадцятий запуск версії 1.0).
42. 15 жовтня 2020 р. — телеком-регулятор CRTC Канади надав SpaceX ліцензію BITS.

43. 18 жовтня 2020 р. — чотирнадцятий запуск 60 супутників Starlink (тринадцятий запуск версії 1.0).
44. 24 жовтня 2020 р. — п’ятнадцятий запуск 60 супутників Starlink (чотирнадцятий запуск версії 1.0).
45. 27 жовтня 2020 р. — старт відкритого бета-тесту під гаслом «Better Than Nothing». Термінали — $499, абонплата — $99/міс.
46. 1 листопада 2020 р. — SpaceX отримала дозвіл від ISED Канади на використання частот.
47. 14 листопада 2020 р. — старт доставки терміналів бета-тестувальникам у Канаді.
48. 25 листопада 2020 р. — шістнадцятий запуск 60 супутників Starlink (п’ятнадцятий запуск версії 1.0).
49. 2 грудня 2020 р. — отримано дозвіл на використання частот у Аргентині.
50. 18 грудня 2020 р. — отримано дозвіл на використання частот у Німеччині.
51. Друга половина грудня 2020 р. — початок розсилки терміналів тестувальникам у Великій Британії.
52. 10 січня 2021 р. — Starlink отримав дозвіл на роботу у Великій Британії, Німеччині, Греції та Австралії.
53. 20 січня 2021 р. — сімнадцятий запуск 60 супутників Starlink (шістнадцятий запуск версії 1.0).
54. 24 січня 2021 р. — перший запуск 10 супутників Starlink версії 1.0 на полярну орбіту.
55. 24 січня 2021 р. — опубліковані фото обладнання InterSatellite Link для місії Transporter-1.
56. 28 січня 2021 р. — у документі для FCC зазначено, що кількість терміналів Starlink сягнула 10 000.
57. 4 лютого 2021 р. — вісімнадцятий запуск 60 супутників Starlink (сімнадцятий запуск версії 1.0).

1.2 Склад угруповання Starlink

Розглядаючи склад і розвиток низькоорбітального угруповання Starlink, яке активно розгортає компанія SpaceX, варто наголосити, що дана система з самого початку не замислювалася як єдина монолітна мережа. Вона має багаторівневу структуру і фактично складається щонайменше з двох окремих супутникових систем, що реалізуються поетапно, з урахуванням технічних можливостей, економічної доцільності та вимог регуляторних органів.

Перший етап цього масштабного проєкту бере свій початок ще у 2016 році. 15 листопада 2016 року компанія SpaceX подала до Федеральної комісії зі зв'язку США (FCC) офіційну заявку, у якій було запропоновано створити на низькій навколоземній орбіті угруповання, що включало б 4425 супутників. Метою було формування глобальної інфраструктури для забезпечення високошвидкісного доступу до Інтернету по всій планеті, включно з найвіддаленішими та важкодоступними регіонами, де традиційні наземні телекомунікаційні технології є малоефективними або економічно невиправданими.

Ця заявка пройшла тривалий і багаторівневий процес аналізу. Фахівці FCC оцінювали не лише технічну сторону реалізації проєкту, але й питання, пов'язані з безпекою використання орбіт, впливом на космічне середовище, можливими ризиками зіткнень, а також спектральну сумісність з іншими системами супутникового та наземного зв'язку. У результаті проведеного аналізу, 29 березня 2018 року FCC надала своє схвалення, фактично відкривши для SpaceX зелене світло на практичну реалізацію одного з найбільш амбітних проєктів у сфері космічних телекомунікацій.

Важливо підкреслити, що саме ця перша заявка і її подальше схвалення стали відправною точкою у створенні глобальної супутникової інфраструктури Starlink. Від цього моменту компанія отримала змогу переходити від концептуального планування до конкретних інженерних розробок, тестування технологій та запуску перших апаратів. Фактично ця подія заклала фундамент для подальших етапів

розширення угруповання, внесення змін у його архітектуру, модернізації супутникових платформ і вдосконалення технологій передачі даних.

Таким чином, історія формування Starlink не обмежується лише ідеєю створення масового супутникового інтернету. Це поступовий процес, у якому кожен новий етап – від подачі заявок і отримання дозволів до запусків перших прототипів та розгортання комерційних партій супутників – відіграє критично важливу роль. Саме завдяки такому підходу Starlink поступово перетворився з інженерної концепції на реальну глобальну систему, що змінює сучасний ландшафт телекомунікацій та відкриває нові перспективи для розвитку інформаційного суспільства.

Таблиця 1.1

Параметри мережі із 4425 супутників

Висота орбіти, км	**Нахил орбіти, градусів**	**Кількість орбіт/площин з даним нахилом**	**Кількість супутників у кожній площині**
1150	53	32	50
1110	53,8	32	50
1130	74	8	50
1275	81	5	75
1325	70	6	75

Виглядати це мало так:

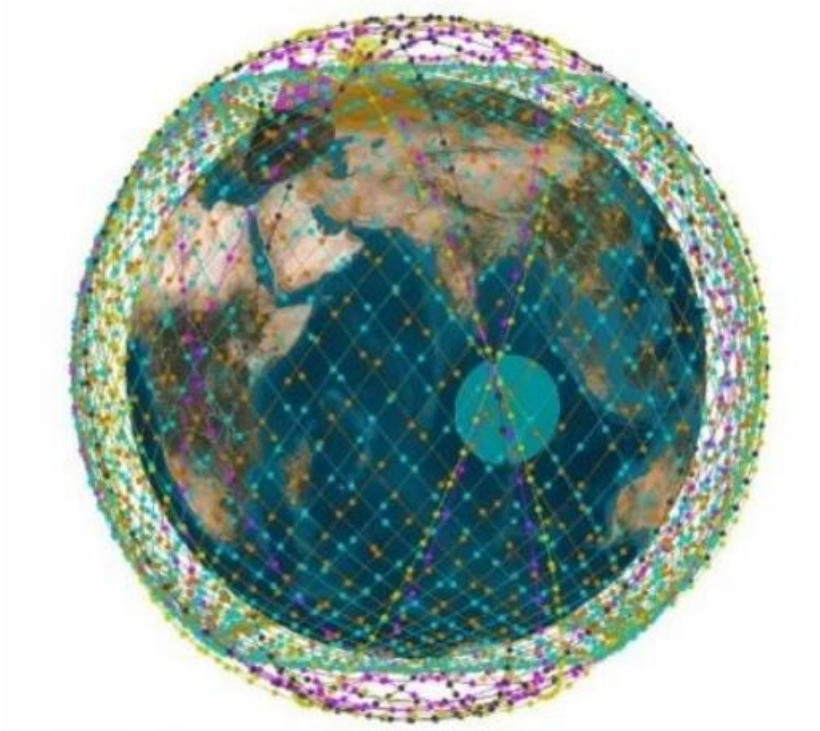


Рис. 1.2 Приблизне моделювання системи із 4425 супутників

Угруповання VLEO системи Starlink.

Таблиця 1.2

Параметри угруповання VLEO

Параметр	**1-й блок**	**2-й блок**	**3-й блок**
Кількість супутників на орбіті	2 547	2 478	2 493
Висота орбіти, км	345,6	340,8	335,9
Нахил орбіти, град.	53	48	42

У подальшому розвитку проєкту, а саме у 2018 році, компанія SpaceX ухвалила рішення внести низку суттєвих змін до початкової конфігурації своєї глобальної низькоорбітальної системи Starlink. Одним із ключових кроків стало зниження висоти орбітального розташування супутників до 550 км. Це рішення мало стратегічний характер і ґрунтувалося як на технічних, так і на

експлуатаційних міркуваннях. Зокрема, нижчі орбіти дозволяли значно зменшити затримки сигналу (latency) під час передачі даних, що є критично важливим для сучасних сервісів, таких як відеоконференції, онлайн-ігри, хмарні обчислення та фінансові операції в реальному часі. Крім того, розташування супутників на такій висоті дало можливість оптимізувати покриття поверхні Землі, зменшити енергоспоживання апаратів та полегшити процес їх утилізації після завершення терміну експлуатації, адже супутники на низькій орбіті швидше сходять з неї й згорають в атмосфері, не створюючи довготривалого космічного сміття.

У наступні роки SpaceX зосередилася на масштабуванні та поетапному нарощуванні угруповання, перетворюючи його з експериментальної системи на повноцінну глобальну телекомунікаційну інфраструктуру. Перші партії супутників Starlink 1.0 стали своєрідним випробувальним майданчиком для перевірки працездатності обраної архітектури, вдосконалення механізмів орбітального розгортання та тестування взаємодії апаратів у реальних умовах експлуатації. Водночас компанія продовжувала активно працювати над вдосконаленням конструкційних матеріалів, антенних систем фазованих решіток, а також над інтеграцією технологій лазерного міжсупутникового зв’язку, що забезпечує більш стійку та гнучку роботу мережі.

Важливо підкреслити, що саме цей етап розвитку Starlink позначився переходом від концептуальної ідеї до створення системи світового масштабу, здатної конкурувати з традиційними кабельними та мобільними операторами. Для SpaceX це також стало підтвердженням спроможності одночасно управляти тисячами апаратів у космосі, синхронізувати їхні орбіти та забезпечувати безперервність сервісів у глобальному масштабі.

Особливу увагу привертає факт, що 17 квітня 2020 року компанія SpaceX подала до Федеральної комісії зі зв’язку США (FCC) нову заявку, яка містила детальний опис оновленої архітектури угруповання. У цьому документі були визначені параметри орбіт, кількість супутників на різних висотах та площинах, а також функціональні завдання, які вони мали виконувати у складі єдиної мережі. Однак на момент подання заявка ще не була остаточно схвалена FCC, що залишало

простір для внесення подальших уточнень і коректив. Це свідчить про динамічний характер розвитку проєкту, який постійно адаптується до технічних інновацій та міжнародних вимог із забезпечення безпеки космічної діяльності.

У таблиці нижче наведено структурований опис складу низькоорбітальної групи супутників Starlink згідно з заявкою SpaceX 2020 року. Вона містить інформацію про кількість апаратів, їхні орбітальні параметри та функціональне призначення. Представлені дані дозволяють оцінити не лише масштабність і складність системи, а й рівень технічної продуманості, що стоїть за її реалізацією. Завдяки цьому можна побачити, що Starlink — це не просто мережа супутників, а комплексна екосистема, яка інтегрує орбітальну інфраструктуру, наземні термінали та глобальну систему управління.

Таблиця 1.3

Склад угруповання, згідно з останньою заявкою SpaceX в FCC

Кількість орбіт з даним нахилом	**72**	**72**	**36**	**6**	**4**
Кількість супутників в кожній площині	22	22	20	58	43
Висота орбіти, км	550	540	570	560	560
Нахиг, град.	53	53,2	70	97,6	97,6

Проте в рамках даної роботи уваг убуло зосереджено на детальному аналізі першого етапу супутникової мережі Starlink у Ku/Ka-діапазонах, який наразі активно розгортається і має реальні шанси розпочати надання високошвидкісного інтернет-доступу користувачам у найближчі місяці, орієнтовно до кінця 2020 року. Цей етап є ключовим для тестування працездатності мережі та оцінки її потенціалу щодо покриття різних регіонів Землі.

На поточний момент компанія SpaceX планує організацію першого етапу мережі у вигляді 72 орбітальних площин з нахилом 53 градуси. Кожна площина містить по 22 супутники, які розташовані на висоті 550 км над поверхнею Землі. Важливо зазначити, що наведені параметри ще можуть коригуватися, оскільки

мережа продовжує проходити етапи тестування та уточнення технічної конфігурації.

Таким чином, загальна архітектура першого етапу мережі передбачає щільне розташування супутників у кількох орбітальних площинах для забезпечення безперервного покриття і мінімізації затримок сигналу, що є критично важливим для якісного надання інтернет-послуг у віддалених та малонаселених регіонах. Виглядає ця конфігурація наступним чином:



Рис. 1.3 Остаточний варіант супутникової системи. 72 орбітальні площини з нахилом 53 градуси по 22 супутники в кожній на висоті 550 кілометрів

1.3 Архітектура мережі Starlink

На представленому рисунку показано архітектуру глобальної супутникової мережі Starlink та її ключові компоненти, які забезпечують комплексне функціонування системи і надання високошвидкісного інтернет-доступу користувачам практично в будь-якій точці світу. Структура мережі побудована за принципом тісної інтеграції космічного та наземного сегментів, що дає змогу досягати високої продуктивності та масштабованості.

Космічний сегмент становить основу системи і включає велику кількість супутників, які перебувають на низькій навколоземній орбіті (LEO). На першому етапі реалізації проєкту передбачалося розгортання 1600 супутників на висоті 550 км з нахилом 53°, що дозволило сформувати початковий «кістяк» угруповання. В подальшому мережа планувалася до поступового розширення до десятків тисяч апаратів. Супутники розміщені у кількох орбітальних площинах, завдяки чому утворюється щільна глобальна сітка покриття, що гарантує постійне перекриття зон видимості та мінімізує ризик виникнення «мертвих зон».

Особливо важливою інновацією є використання технології лазерного міжсупутникового зв'язку (Inter-Satellite Links, ISL), яка дозволяє передавати інформацію напряму між супутниками без залучення наземних шлюзів. Це дає змогу прокладати маршрути передачі даних найкоротшими шляхами, обходити проблемні регіони (наприклад, океани чи зони стихійних лих) та значно скорочувати час затримки сигналу. У поєднанні з низькою орбітою це робить Starlink конкурентом не лише для традиційних супутникових систем, а й для наземних оптоволоконних мереж.

Наземний сегмент виконує не менш важливу роль, адже саме він забезпечує взаємодію космічного угруповання з глобальною мережею та кінцевими користувачами. До його складу входять:

- **Центр управління мережею (Network Management System, NMS)** — спеціалізована інфраструктура для моніторингу та управління усіма елементами системи. Він здійснює контроль за орбітальними параметрами супутників, відстежує навантаження на канали зв'язку, виконує балансування трафіку та гарантує стабільність роботи мережі. Завдяки інтеграції алгоритмів машинного навчання управління мережею має високий ступінь автоматизації.
- **Шлюзові станції (Gateway)** — наземні об'єкти, що забезпечують обмін даними між супутниками та глобальною інтернет-інфраструктурою. Саме через них відбувається інтеграція супутникової системи із backbone-мережами провайдерів та дата-центрами. Кожна шлюзова станція має

потужне обладнання, здатне обробляти величезні обсяги інформації, що забезпечує масштабованість системи.

- **Абонентські термінали (User Terminals)** — кінцеві пристрої, відомі як «тарілки Starlink». Це компактні фазовані антени, які здатні автоматично змінювати напрям випромінювання, відслідковуючи супутники, що рухаються на небі. Вони підключаються до локальної мережі користувача (наприклад, через Wi-Fi) і забезпечують стабільний та швидкий інтернет навіть у найвіддаленіших регіонах, де традиційні телекомунікаційні технології є недоступними або економічно невигідними.

Завдяки такій структурі, система Starlink є унікальною інноваційною мережею, яка поєднує переваги космічних технологій із наземною інфраструктурою. Вона дозволяє забезпечити глобальний рівень доступу до інтернету, зокрема в регіонах із низькою щільністю населення, у сільській місцевості, у зонах стихійних лих чи військових конфліктів. Таким чином, Starlink позиціонується не лише як комерційний проєкт, але й як стратегічна технологія, здатна змінити підхід до надання цифрових послуг у масштабах усієї планети.

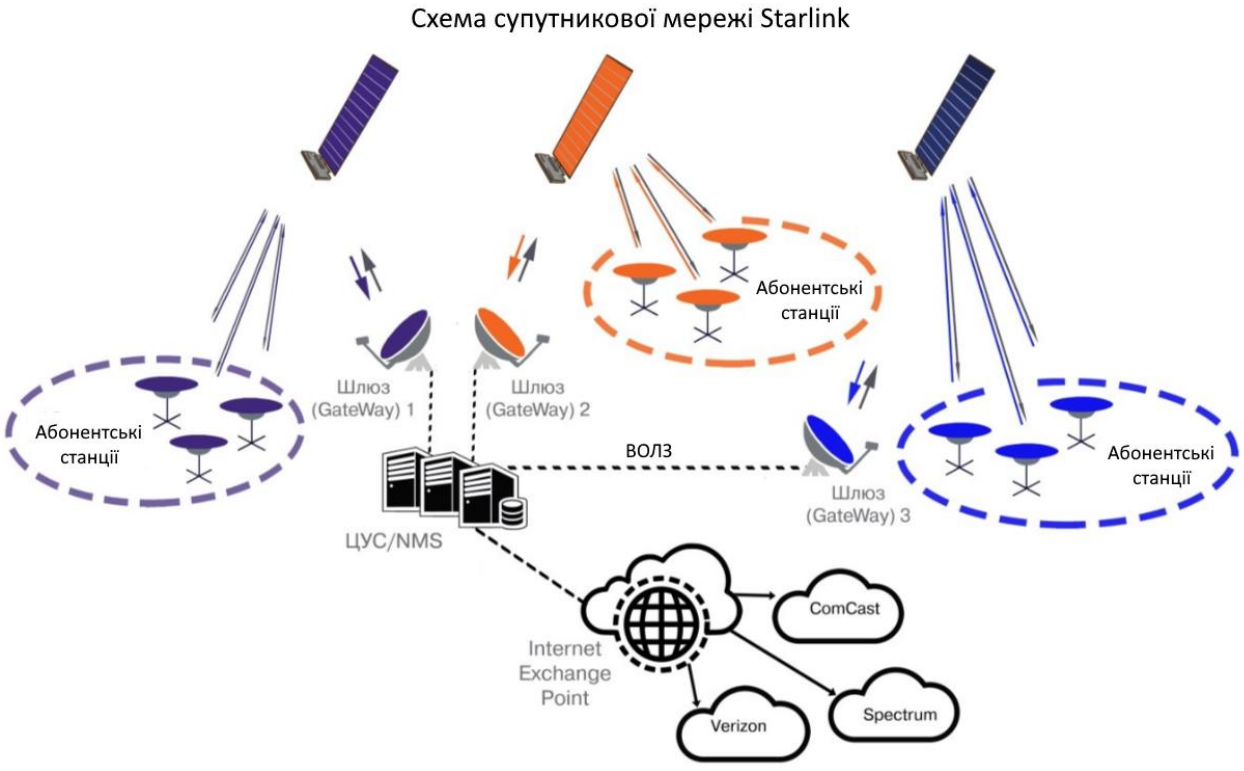


Рис. 1.4 Схема супутникової мережі Starlink

Що стосується наземної інфраструктури мережі Starlink, то її будівництво по суті базується на мережевих потужностях компанії Google. Для власних потреб SpaceX зареєстровано дві автономні системи — AS14593 та AS27277. Остання, ймовірно, призначена для внутрішньої IT-мережі SpaceX, що дозволяє компанії ефективно керувати власними сервісами та забезпечувати безпеку корпоративного трафіку.

За наявними даними, трафік абонентів Starlink буде маршрутизуватися через орендовані волоконно-оптичні лінії, при цьому у пріоритеті використання — власна інфраструктура Google, де це можливо. Основні вузли обміну трафіком розташовані у ключових містах США, серед яких LAX (Лос-Анджелес), SEA (Сіетл), ORD (Орландо), LGA (Нью-Йорк), SJC (Сан-Хосе), DFW (Даллас), IAD (Вашингтон). У своєму твіті від 2 жовтня 2020 року Ілон Маск повідомив, що компанія прагнутиме розміщувати шлюзові станції безпосередньо на будівлях, де розташовані серверні та центри обміну інтернет-трафіком, що дозволить скоротити затримки та підвищити ефективність обробки даних.

Станом на 2 листопада 2020 року у SpaceX є зареєстровані IP-адреси для кількох країн: Австралії, Нової Зеландії, Канади, Великобританії, Німеччини та Іспанії. Вони зареєстровані в автономних системах (AS — автономна система, яка фактично є ідентифікатором провайдера, під яким оформлені IP-адреси). Автономна система AS36492 використовується компанією Google під назвою «GOOGLEWIFI» для створення загальнодоступних Wi-Fi точок доступу, однак також застосовується Starlink для власних IP-адрес.

Для Австралії та Нової Зеландії виділено два основні діапазони адрес:

IPv4:

- 103.152.126.0/24 — Starlink Sydney PoP 1, користувацькі адреси (Нова Зеландія)
- 103.152.127.0/24 — Starlink Sydney PoP 2, користувацькі адреси

IPv6:

- 2406:2d40:1000::/36 — Starlink Sydney PoP 2, користувацькі адреси
- 2406:2d40::/36 — Starlink Sydney PoP 1, користувацькі адреси (Нова Зеландія)

Для Канади:

- 143.131.2.0/24 — SpaceX Canada Corp.
- 143.131.3.0/24 — SpaceX Canada Corp.
- 143.131.4.0/24 — SpaceX Canada Corp.
- 143.131.5.0/24 — SpaceX Canada Corp.
- 143.131.6.0/24 — SpaceX Canada Corp.
- 143.131.7.0/24 — SpaceX Canada Corp.

Для Європи:

- 162.43.192.0/24 — SpaceX Services, Inc. (Іспанія, Мадрид)
- 162.43.193.0/24 — SpaceX Services, Inc. (Іспанія, Мадрид)
- 176.116.124.0/24 — SpaceX Services, Inc. (Великобританія, Лондон)
- 176.116.125.0/24 — SpaceX Services, Inc. (Великобританія, Лондон)
- 188.95.144.0/24 — SpaceX Services, Inc. (Німеччина, Франкфурт)
- 188.95.145.0/24 — SpaceX Services, Inc. (Німеччина, Франкфурт)

Таким чином, наземна мережа Starlink інтегрує високоефективну інфраструктуру Google з власними ресурсами SpaceX, що дозволяє забезпечувати глобальне покриття, стабільність передачі даних та високу якість інтернет-послуг у різних регіонах світу.

2 РОЗГЛЯД МЕРЕЖІ STARLINK

2.1 Апаратна частина

Космічні апарати Starlink були спеціально спроектовані для ефективного масового запуску та оптимального розміщення в ракеті-носії Falcon 9. Для цього супутники групуються по 30 штук у дві стопки, які поміщаються під обтічником ракети, що дозволяє одночасно виводити в космос значну кількість апаратів і скорочувати витрати на запуски.

Щодо габаритів кожного супутника, то вони становлять приблизно: довжина — 3,2 метри, ширина — 1,6 метра та висота — 0,2 метра. Ці значення отримані шляхом аналізу доступних фотографій та відкритих зображень супутників Starlink, що дає уявлення про компактність і водночас технологічну складність апаратів. Завдяки такому дизайну кожен супутник оптимально використовує простір під обтічником, що забезпечує ефективне розгортання мережі з великою кількістю супутників на низькій навколоземній орбіті.



Рис. 2.1 Укладання супутників Starlink під обтічником ракети Falcon 9

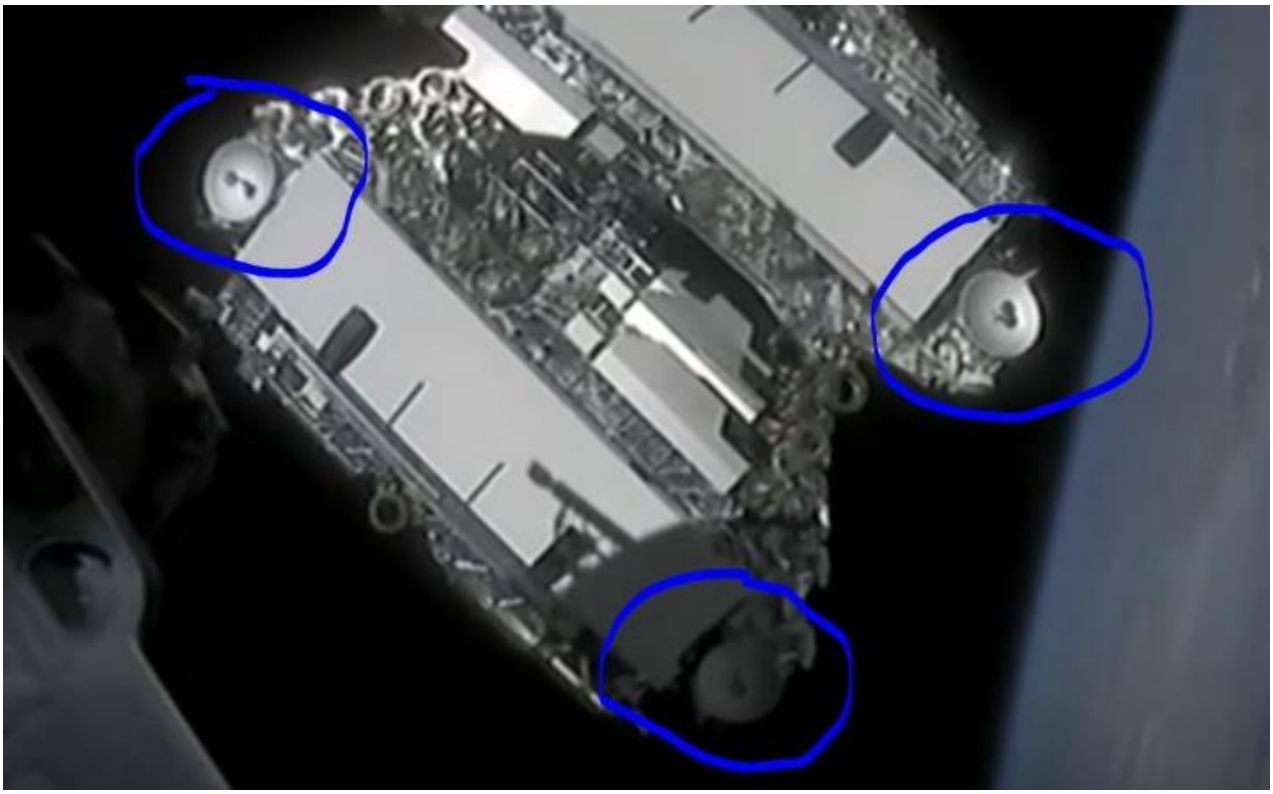


Рис. 2.2 Супутники Starlink в момент відокремлення від другого ступеня ракети Falcon 9

Сині контури позначають параболічні антени, які використовуються для фідерного зв’язку з гейтвеями в Ka-діапазоні.

Після виведення групи супутників на опорну орбіту, яка зазвичай розташована на висоті близько 280 км, кожен апарат розгортає свої сонячні батареї, встановлює стабільний зв’язок із наземним Центром управління та проходить комплексну перевірку на працездатність. Під час цієї перевірки оцінюють, чи не виникли пошкодження при відокремленні супутника від ракети-носія. Лише після успішного завершення цих процедур супутники активують електроракетні двигуни на криптоні (ЕРД) та починають поступовий підйом на робочу орбіту, що зазвичай триває 2–3 місяці.

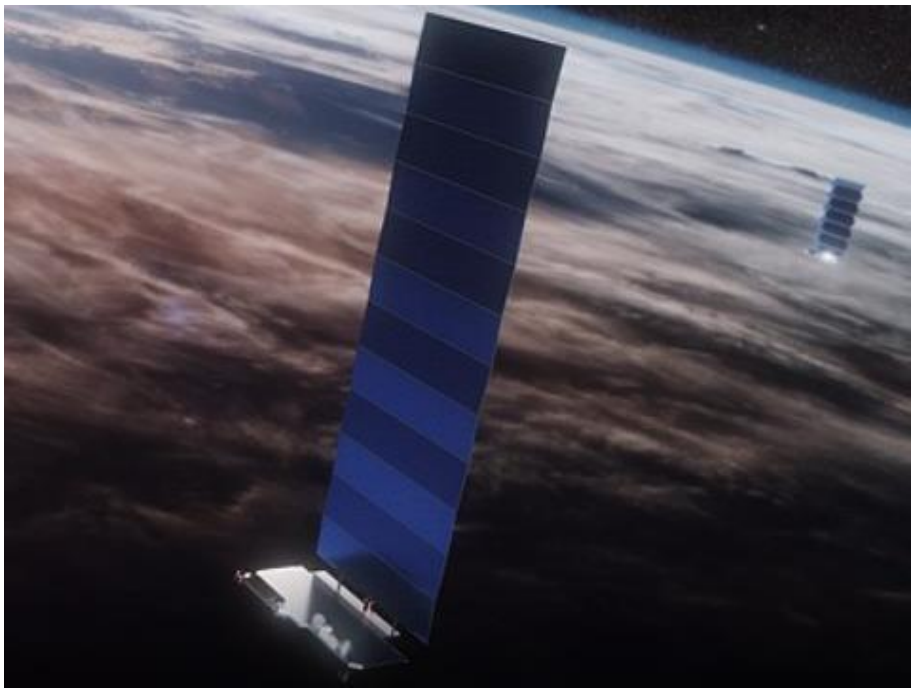


Рис. 2.3 Зображення сонячних панелей

Сонячні батареї супутників Starlink на момент запуску складені у вигляді «гармошки» та складаються з 12 сегментів. Довга сторона кожного сегмента відповідає ширині супутника, яка становить 3,2 метра. Аналіз фотографій та наявних схем дозволяє оцінити розміри одного сегмента приблизно в 3 м × 0,8 м. Таким чином, загальна площа сонячної батареї складає 12 × 3 × 0,8 = 28,8 м². З урахуванням технологічних втрат між окремими сонячними елементами та по краях панелей (коефіцієнт заповнення приблизно 0,9) реальна ефективна площа батареї становить близько 26 м².

Приймаючи щільність сонячного потоку на рівні 1300 Вт/м² та ефективність перетворення панелей у 18 %, можна оцінити, що максимальна (пікова) електрична потужність, яку може виробляти батарея одного супутника, складає близько 6 кВт. Для порівняння, супутники серії «Експрес» на платформі «Експрес-1000» вагою 1450 кг мають сонячні батареї потужністю близько 3 кВт (можливо, це середнє значення).

Слід зазначити, що реальна потужність сонячних батарей залежить від орієнтації панелей щодо Сонця. Оптимальна продуктивність досягається, коли сонячні промені падають на поверхню панелі під прямим кутом, що забезпечує максимальне поглинання енергії та стабільну генерацію електроенергії для

живлення всіх систем супутника, включаючи комунікаційні модулі та електроракетні двигуни. Завдяки такому технічному рішенню супутники Starlink здатні ефективно функціонувати протягом усього часу переходу на робочу орбіту та подальшої експлуатації в космосі.

Для переведення супутника з опорної орбіти на висоті приблизно 280 км на робочу орбіту 550 км, а також для його подальшого стабільного утримання на цій орбіті, застосовуються плазмові двигуни або електроракетні двигуни (ЕРД). Якщо брати за приклад ЕРД, які використовуються для малих супутників, таких як російські СПД-100 або зарубіжні BHT-1500, їхня споживана електрична потужність становить близько 1,5 кВт, а тяга — приблизно 100 мН. Питомий імпульс таких двигунів коливається в межах 1700–1800 секунд, що дозволяє ефективно змінювати швидкість та орбітальні параметри супутника при невеликих витратах палива.

ЕРД мають компактні габарити — приблизно 20 × 20 × 15 см (див. рисунок нижче), що забезпечує можливість інтеграції в невеликі супутники без значного збільшення їхньої маси та габаритів. Для роботи двигуна використовується криптон, запас якого становить орієнтовно 5–10 кг і зберігається у високонапірних балонах.

Цього запасу палива достатньо для кількох ключових етапів: по-перше, для переведення супутника на кругову робочу орбіту на висоті 550 км; по-друге, для утримання супутника на цій орбіті протягом приблизно п’яти років, забезпечуючи стабільну роботу всіх систем; по-третє, для планового виведення супутника з експлуатації шляхом зміни орбіти з кругової на еліптичну. При цьому перигей еліптичної орбіти може бути знижений, наприклад, до 250 км, де за рахунок опору залишків атмосфери супутник поступово уповільниться і згорить, що гарантує безпечне знищення апарату без загрози для інших космічних об’єктів.

Таким чином, застосування ЕРД із запасом криптону забезпечує не лише ефективний перехід на робочу орбіту і підтримку супутника на ній протягом усього терміну експлуатації, а й контрольований та безпечний процес завершення життєвого циклу апарату, що є критично важливим для сучасних низькоорбітальних супутникових мереж.

Основним корисним навантаженням супутника Starlink є два спеціалізовані антени комплекси, які забезпечують зв’язок із наземними шлюзовими станціями (гейтвеями) та абонентськими терміналами користувачів. Ці комплекси є ключовими елементами системи, оскільки саме вони відповідають за високошвидкісну передачу даних між космічним сегментом мережі та наземною інфраструктурою.

Антений комплекс для зв’язку з гейтвеями, який також називають фідерною лінією, складається з параболічних антен. Під час польоту супутник автоматично орієнтує ці антени на конкретну точку на Землі, де розташована шлюзова станція, забезпечуючи точну спрямованість сигналу та мінімізацію втрат. Фідерна лінія працює в Ka-діапазоні (18–30 ГГц), що дозволяє передавати великі обсяги даних із високою швидкістю та стабільністю.

Таблиця 2.1

Характеристики пропускної здатності

Тип каналу зв’язку	**Діапазон частот, ГГц**	**Дотупно МГц в одній поляризації**
Послуга: Вниз на абонентський термінал	10,7 – 12,7	2000
Послуга: Вниз на гейтвей	17,8 – 18,6 18,8 – 19,3	800 500
Послуга: Вверх від абонентського пристрою	14,0 – 14,5	500
Послуга: Вверх від гейтвея	27,5 – 29,1 29,5 – 30,0	1600 500
Телеметрія та керування донизу	12,15 – 12,25 18,55 – 18,60	100 50
Телеметрія та керування доверху	13,85 – 14,00	150

Згідно з наданою інформацією, пропускна здатність супутника у напрямку від гейтвея до супутника становить 2100 МГц, а у зворотному напрямку — 1300 МГц. Якщо використовувати обидві поляризації сигналу (ліву та праву, у випадку кругової поляризації), то максимальна пропускна здатність може досягати 4200 МГц у напрямку від наземного гейтвея до супутника та 2600 МГц у зворотному напрямку.

Такий рівень пропускної здатності забезпечує ефективну організацію передачі трафіку, дозволяє обробляти значні обсяги даних і підтримувати високошвидкісний інтернет-зв’язок для численних користувачів одночасно. Крім того, система забезпечує гнучкість у управлінні ресурсами спектру та дозволяє ефективно використовувати доступний частотний діапазон, що особливо важливо для мереж низькоорбітальних супутників, де обмежені ресурси частот та необхідно уникати перешкод і втрат сигналу.

На борту супутника Starlink також встановлено чотири плоскі квадратні антени з фазованою решіткою, які виконують критично важливу роль у забезпеченні зв’язку з абонентськими терміналами. Три з цих антен призначені для передачі інформації від супутника до користувача, тоді як одна антена відповідає за прийом сигналу від абонентського терміналу. Завдяки фазованій решітці ці антени можуть точно формувати спрямований сигнал, підвищуючи ефективність передачі даних і мінімізуючи перешкоди.

На ілюстрації наведено вид чотирьох квадратних антен Ku-діапазону до нанесення спеціального покриття, яке знижує їхню помітність із Землі, та після його нанесення. Це покриття дозволяє зробити супутники менш помітними для наземних спостережень, зменшуючи ризики виявлення і покращуючи загальну стелс-ефективність космічного апарата.

Зв’язок між супутником і абонентським терміналом здійснюється в Ku-діапазоні. Пропускна здатність у напрямку від супутника до терміналу становить 2000 МГц, тоді як у зворотному напрямку — від терміналу до супутника — 500 МГц. Використання двох поляризацій сигналу дозволяє ефективно подвоїти пропускну здатність: у напрямку «вниз» можна передавати до 4000 МГц, а у

напрямку «вгору» — 1000 МГц. Це забезпечує достатній запас частот для високошвидкісного обміну даними навіть при великій кількості одночасних користувачів.

Крім основних антенних систем, на борту супутника розміщено комплекс обладнання для командної радіолінії та передачі телеметричних даних. Ця система використовує по 150 МГц у Ka- та Ku-діапазонах відповідно, що забезпечує надійний обмін командами управління та телеметричною інформацією між супутником і наземним Центром управління. Завдяки цьому супутник може не лише підтримувати стабільний зв’язок із користувачами, а й своєчасно отримувати команди управління, контролювати власні системи та безпечно виконувати маневри на орбіті.

В цілому, така архітектура антенної системи дозволяє супутникам Starlink ефективно взаємодіяти з наземною інфраструктурою та користувачами, забезпечуючи високу швидкість передачі даних, стабільність сигналу та надійність роботи мережі навіть у складних умовах низькоорбітальної експлуатації.

2.2 Ретрансляція сигналу

Супутник Starlink виконує ключову функцію ретрансляції сигналу і не займається складною обробкою даних безпосередньо на борту. Його основне завдання полягає в тому, щоб приймати сигнал від наземної інфраструктури або абонентських терміналів, здійснювати зміну частоти та підсилення сигналу, а потім передавати його далі. Такий підхід дозволяє зменшити обчислювальні потреби на борту та підвищити надійність системи, оскільки апарат концентрується на стабільній передачі даних без додаткових операцій обробки. Важливо зазначити, що супутники першого покоління не обладнані міжсупутниковим зв’язком (ISL – Inter Satellite Link), тому вони не можуть обмінюватися даними один з одним і взаємодіють виключно із наземною інфраструктурою.

Для забезпечення управління, контролю та збору телеметричної інформації використовується система TT&C (Telemetry, Tracking & Command). У рамках

першого етапу розгортання мережі Starlink було заявлено чотири такі станції, зокрема телепорт Брюстнер у штаті Вашингтон. Супутник перебуває в зоні видимості цих станцій не більше п’яти хвилин, але навіть за цей короткий час здійснюється збір значного обсягу даних. Станом на червень 2020 року обсяг інформації, який надходить з усієї групи супутників, складав близько 5 Тбайт на добу, що відповідає мінімум 10 Гбайт з одного супутника на день. Це дозволяє наземному Центру управління отримувати повну інформацію про стан апаратів, контроль над орбітальними маневрами та моніторинг усіх систем супутника.

На борту кожного супутника встановлено близько 70 окремих процесорів під управлінням операційної системи Linux та приблизно 10 мікроконтролерів. Завдяки цьому забезпечується комплексне керування всіма системами апарату, обробка сигналів, управління антенними комплексами, виконання команд з Центру управління та контроль за станом енергетичних і навігаційних систем. Така апаратна архітектура дозволяє підтримувати високий рівень надійності та автономності супутника під час його перебування на орбіті.

Перебуваючи на робочій орбіті на висоті 550 км, супутник здатний покривати своїм сигналом значну ділянку поверхні Землі з радіусом приблизно 950 км (діаметром близько 1900 км), за умови, що кут місця для абонентського терміналу не менше 25°. Для максимально ефективної роботи антен із плоскою фазованою решіткою оптимальний кут місця повинен бути 40° і вище. Це забезпечує стабільну передачу сигналу, мінімізує втрати та перешкоди, а також підтримує високошвидкісну комунікацію навіть при великій кількості одночасних користувачів.

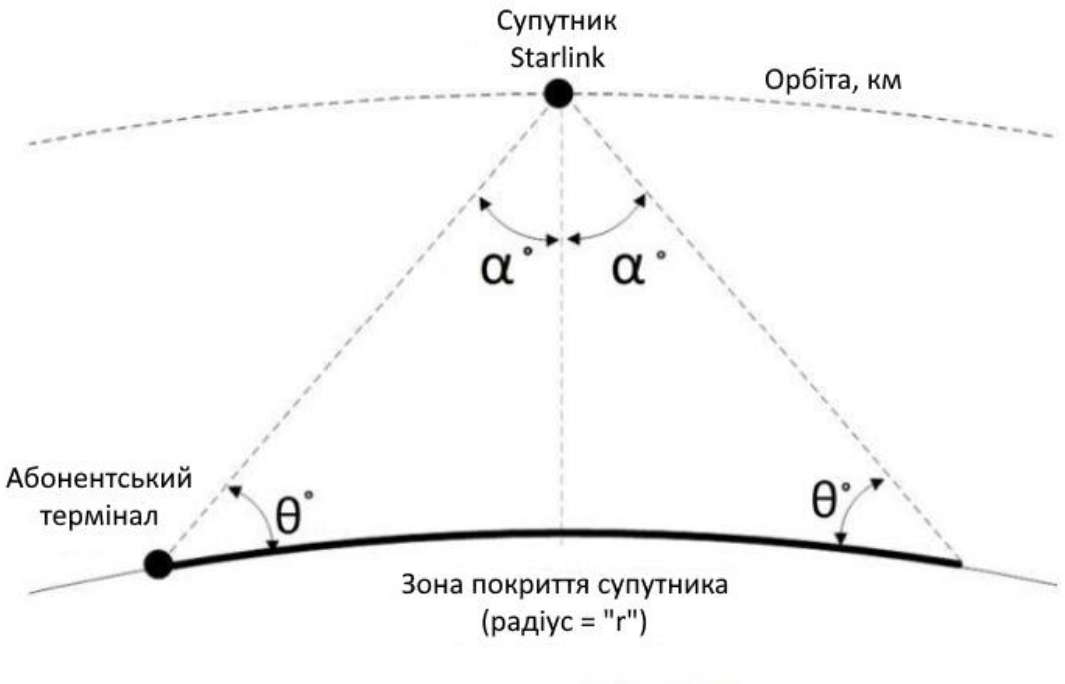


Рис. 2.4 Радіус зони видимості супутника під кутом 25 градусів залежно від його висоти

Таблиця 2.2

Параметри зони покриття

Орбіта «a», км	540	560	570
Макс. кут відхилення α, °	56,7	56,4	56,3
Зона покриття «r», км	926,8	954,6	968,4

Можна досить легко оцінити, скільки супутників необхідно для забезпечення повного покриття Землі між північною та південною 50-ю паралелями, якщо виходити з того, що сигнал кожного супутника поширюється на всю видиму зону його покриття на поверхні планети. Площа поверхні Землі, яка знаходиться між цими паралелями, становить приблизно 300,4 млн км², що є значною частиною від загальної площі земної кулі у 510 млн км². Це підкреслює масштаб завдання, адже йдеться про покриття майже 60% площі планети з урахуванням важливих житлових і економічних регіонів.

Щоб досягти 100% покриття без «білих плям», зони видимості супутників повинні частково перекривати одна одну. Для спрощеного аналізу використовується методика, яка розглядає круглу зону покриття кожного супутника як вписаний квадрат. Сторона такого квадрата обчислюється за формулою $L = \frac{D}{\sqrt{2}}$, де D — діаметр зони покриття супутника. Це дозволяє оцінити реальну площу, яку може забезпечити один супутник, враховуючи ефективність розподілу сигналу по поверхні.

У нашому прикладі сторона квадрата становить L=1356L = 1356L=1356 км, що відповідає площі покриття одного супутника близько 1,84 млн км². Виходячи з цього, для того щоб забезпечити повне покриття Землі між північною та південною 50-ю паралелями, необхідно приблизно 164 супутники. Це число демонструє, що навіть відносно невелика кількість космічних апаратів у правильній орбітальній конфігурації може покрити величезні території, включаючи густонаселені регіони і економічно значущі зони.

Такий підхід показує ефективність використання низькоорбітальних супутникових мереж, таких як Starlink. Точне планування орбітальних площин і зон видимості дозволяє мінімізувати необхідну кількість супутників для глобального або регіонального покриття, при цьому забезпечуючи безперервну і стабільну передачу даних для користувачів. Використання накладення зон видимості не лише гарантує відсутність «білих плям», але й підвищує надійність роботи мережі у випадку тимчасового недоступності окремих супутників, погодних перешкод або технічних обмежень.

Крім того, такий розрахунок дає змогу оцінити масштаб необхідної інфраструктури та ресурсів для побудови глобальної мережі інтернет-покриття. Він підкреслює, що низькоорбітальні супутники, завдяки своїй мобільності та можливості точного управління орбітами, можуть забезпечити високоякісне, швидкісне і надійне з’єднання для великої кількості користувачів одночасно, що є ключовим фактором у розвитку сучасних комунікаційних систем.

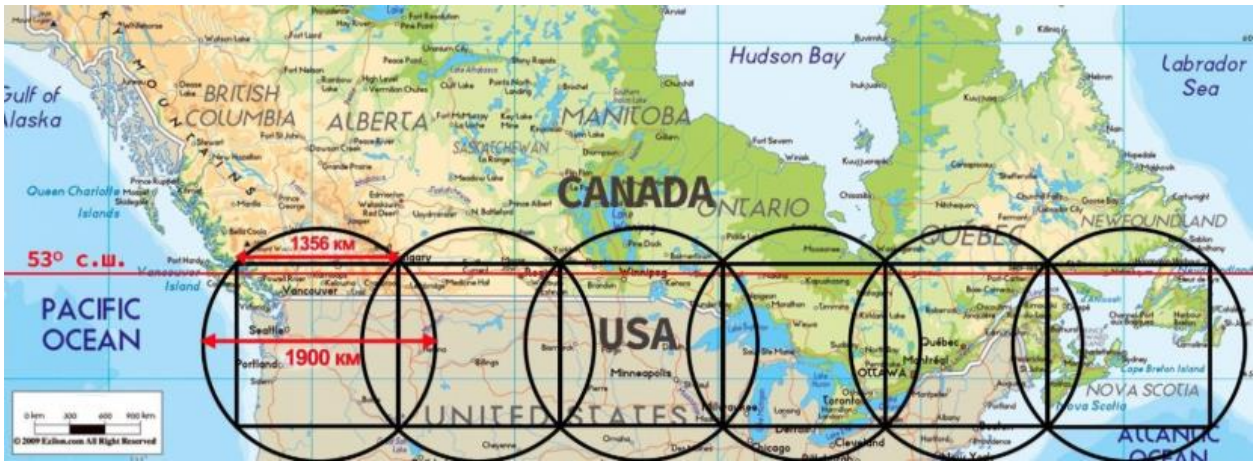


Рис. 2.5 Оцінка масштабу необхідної архітектури

Як наслідок, навіть базовий розрахунок кількості супутників демонструє стратегічну ефективність і економічну доцільність використання низькоорбітальних мереж для надання доступу до інтернету у глобальному масштабі, особливо в регіонах, де будівництво наземної інфраструктури є складним або економічно невигідним.

2.3 Технологія Space X 1584 та ШСЗ

І тут ми повинні поговорити про такий параметр будь-якої антенної системи, як діаграма спрямованості антени.

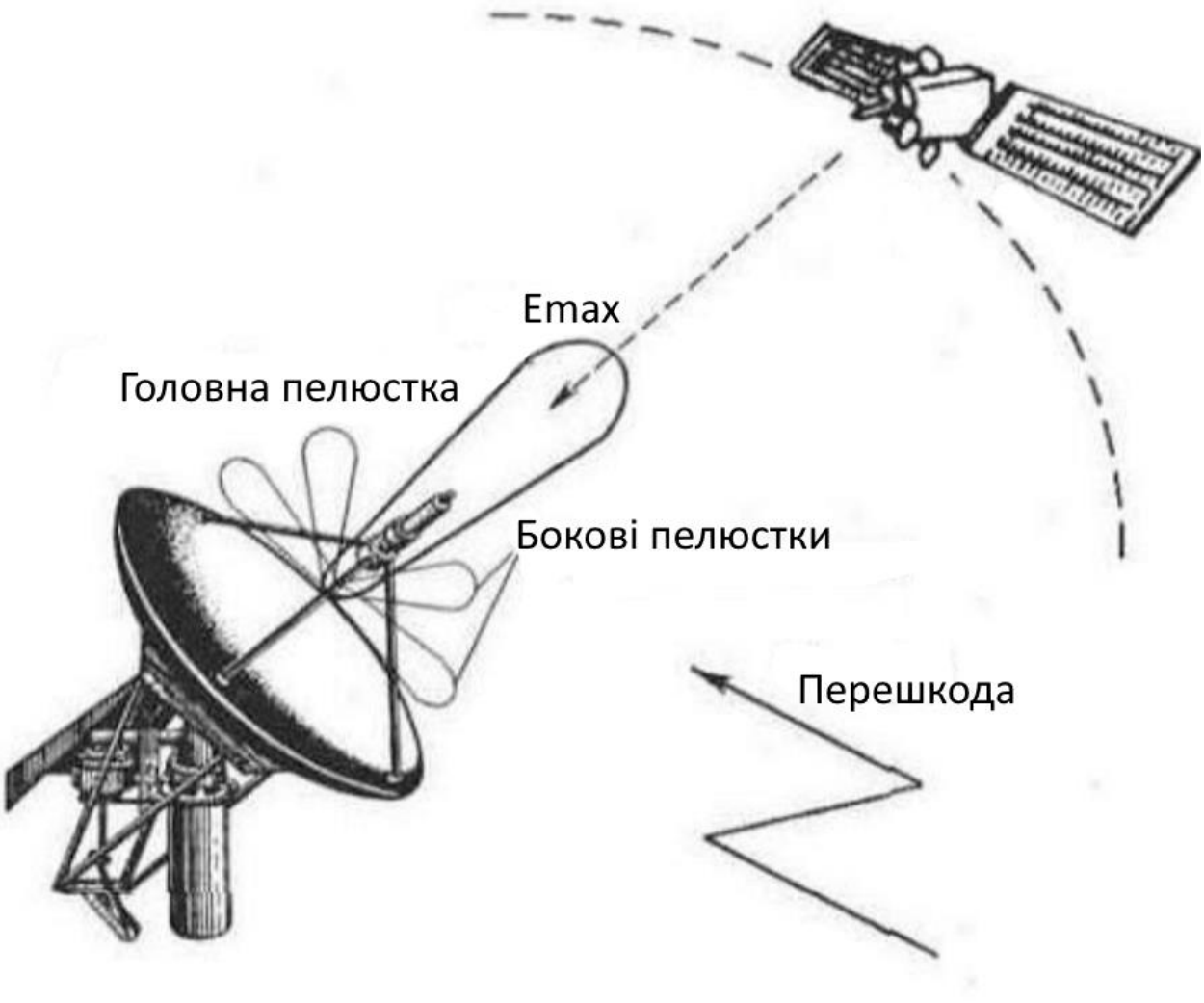


Рис. 2.6 Діаграма направленості

Діаграма спрямованості антени є одним із найважливіших параметрів будь-якої антенної системи, оскільки вона визначає, як енергія сигналу розподіляється у просторі навколо антени. Цей параметр дозволяє оцінити ефективність передачі та прийому сигналу в різних напрямках. Основним критерієм у цьому випадку є кут спрямованості, при якому потужність сигналу зменшується вдвічі від свого максимального значення.

У термінах децибелів (дБ) таке зменшення відповідає падінню потужності на 3 дБ. Іншими словами, діаграма спрямованості показує область простору, у якій антена передає або приймає сигнал із потужністю, що є близькою до максимальної. За межами цього кута потужність швидко знижується, що впливає на якість зв’язку та ефективність використання антени.

Розуміння діаграми спрямованості є критично важливим при проєктуванні супутникових систем, таких як Starlink, оскільки вона визначає, яку площу на Землі покриває сигнал супутника, як формуються зони видимості та як уникнути перехрещення чи втрат сигналу між сусідніми супутниками. Крім того, знання діаграми спрямованості дозволяє оптимізувати положення антен і кути їх нахилу для забезпечення стабільного і високоякісного зв'язку з абонентськими терміналами та наземними гейтвеями.

Таким чином, діаграма спрямованості антени є фундаментальним інструментом у плануванні ефективних комунікаційних мереж і визначає не лише технічні характеристики сигналу, але й загальну продуктивність супутникової системи зв'язку.

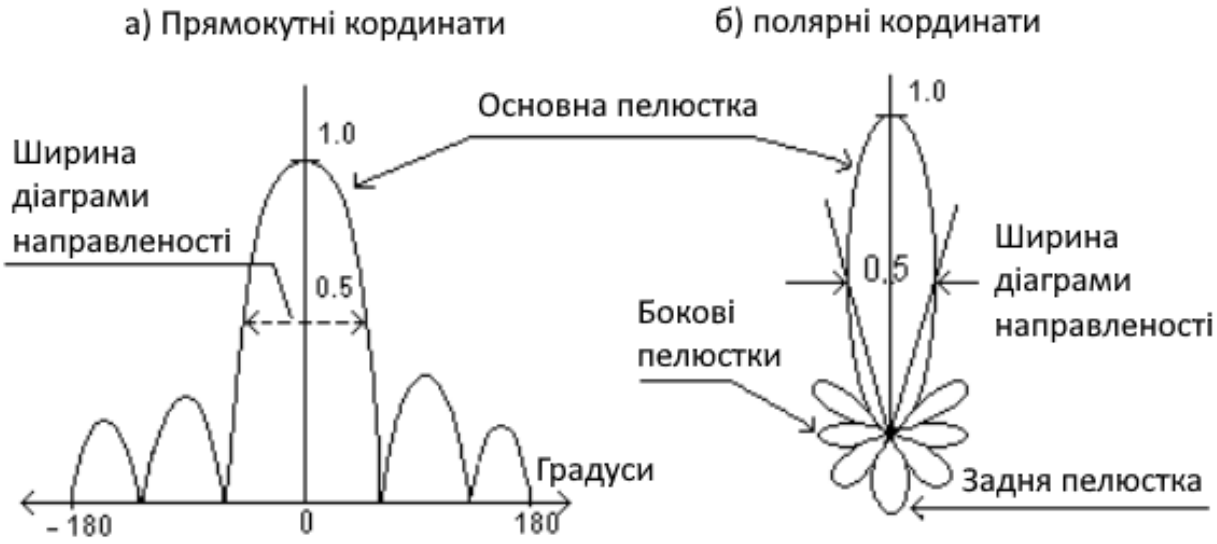


Рис. 2.7 Діаграма направленості антени

Ширина головного пелюстка (ШГП) діаграми спрямованості антени є одним із найважливіших параметрів, що визначають ефективність роботи будь-якої антенної системи. Цей параметр прямо залежить від фізичних розмірів антени, а саме від її діаметра або площі робочої поверхні, від коефіцієнта використання поверхні (КВП) та від частоти сигналу, що передається або приймається. КВП характеризує, наскільки ефективно використовується доступна площа антени для випромінювання або прийому сигналу і визначається такими факторами, як розподіл амплітуди електромагнітного поля по робочій поверхні, втрати енергії

через витоки потужності за краї дзеркала антени, а також інші технологічні та конструктивні втрати. Чим більш рівномірний розподіл поля та вищий КВП, тим ефективніше антена концентрує енергію у потрібному напрямку, що підвищує продуктивність всієї системи.

Діаграма спрямованості не обмежується лише головним пелюстком. Вона також включає бічні пелюстки та задній пелюсток, які є побічними компонентами розподілу енергії антени. Ці пелюстки забирають частину енергії від головного пучка, що зменшує ефективність передачі сигналу у заданому напрямку. Під час проектування антени основною метою є максимізація співвідношення енергії головного пелюстка до енергії першого (найбільшого) бічного пелюстка, що дозволяє сконцентрувати якомога більше потужності у напрямку сигналу та мінімізувати втрати енергії у небажаних напрямках.

Чим більший діаметр або площа антени, тим вужчим стає кут головного пелюстка її діаграми спрямованості. Вужчий кут спрямованості означає більш сконцентрований сигнал у потрібному напрямку, що підвищує коефіцієнт підсилення антени (Кус). Високий Кус дозволяє передавати сигнал на великі відстані з мінімальними втратами, підвищує якість прийому, забезпечує стабільність з’єднання та зменшує вплив перешкод з бічних напрямків.

Особливо важливим цей параметр є для супутникових систем зв’язку, таких як Starlink. Тут правильне визначення діаметра антени, оптимізація КВП і контроль побічних пелюстків дозволяють максимально ефективно спрямовувати сигнал на наземні термінали або гейтвеї, покращуючи покриття та стабільність зв’язку. Крім того, завдяки високому Кус антена може працювати ефективно навіть при значних відстанях до користувачів і за умов наявності космічних перешкод або атмосферних впливів.

Узагальнюючи, можна сказати, що ширина головного пелюстка і вся діаграма спрямованості антени безпосередньо впливають на продуктивність і надійність комунікаційної системи. Вони визначають, яка частина енергії сигналу буде ефективно використана для передачі даних у потрібному напрямку, наскільки точним буде покриття території, і наскільки стійким буде зв’язок до впливу

зовнішніх факторів. Врахування цих параметрів на етапі проектування і оптимізації антенної системи дозволяє створювати високоефективні, надійні і технологічно досконалі системи зв’язку, що забезпечують стабільний і швидкий обмін інформацією у будь-яких умовах.

Якщо взяти за основу згаданий вище діаметр світлової плями променя на поверхні Землі, який становить 45 км, то це відповідає куту діаграми спрямованості променя супутника, спрямованого з космосу на Землю, приблизно 4,5 градуса. При цьому слід враховувати, що при відхиленні від прямої надиру кут може змінюватися: ймовірно, він коливається в межах від 3 до 5 градусів. Чим далі від точки надиру, тим ширший кут спрямованості променя, що обумовлено геометрією розсіювання сигналу та особливостями роботи антенної системи.

Це значення добре корелює з параметрами плоскої фазованої антени відповідних розмірів, яка встановлена на супутниках Starlink. Така антена здатна формувати вузький спрямований пучок сигналу, що дозволяє концентрувати енергію на потрібну ділянку земної поверхні, підвищуючи інтенсивність сигналу та якість зв’язку для користувачів.

У первинній заявці SpaceX до Федеральної комісії зі зв’язку США (FCC) від 15 листопада 2016 року було зазначено, що діаметр променя складатиме 45 км (сторінка 80, Додаток А, Технічна частина заявки). Це підтверджує, що компанія від початку планувала створення супутникової мережі з високою точністю спрямованості сигналу, що дозволяє забезпечити стабільне покриття і мінімізувати перехресні завади між сусідніми променями.

Для оцінки та наочної візуалізації зони покриття супутникової мережі Starlink можна припустити, що кут діаграми спрямованості антени з фазованою решіткою (ФАР) на борту супутника змінюється від 2,5 градуса у точці надиру до приблизно 4 градусів на краю зони покриття. Така зміна кута обумовлена геометрією променя і особливостями роботи антени, адже чим далі від прямої надиру, тим ширшим стає пучок сигналу, що забезпечує повне покриття заданої ділянки земної поверхні.

На основі цих даних можна провести розрахунок діаметра зони покриття: для кута ДН у 2,5 градуса, який відповідає зоні безпосередньо під супутником, діаметр

променя складе близько 24 км. Це означає, що сигнал від одного супутника концентрується на відносно невеликій ділянці земної поверхні, що підвищує інтенсивність та якість зв’язку для користувачів, розташованих у межах цього променя.

Нижче наведено умовне зображення зони покриття одного променя, яке було використано у репортажі SpaceX під час запуску штучного супутника Землі Starlink у листопаді 2020 року. На ньому показано, як вузький спрямований пучок формує конкретну ділянку покриття на поверхні Землі, демонструючи принцип дії фазованої антени та її здатність ефективно передавати сигнал на велику відстань при високій концентрації енергії.

Такі оцінки і візуалізації є ключовими для планування орбітальних конфігурацій супутників, визначення зон покриття та мінімізації накладень променів від сусідніх супутників. Вони дозволяють передбачити ефективність роботи мережі, забезпечити стабільне і безперервне інтернет-покриття та оптимізувати розташування абонентських терміналів і наземних гейтвеїв.

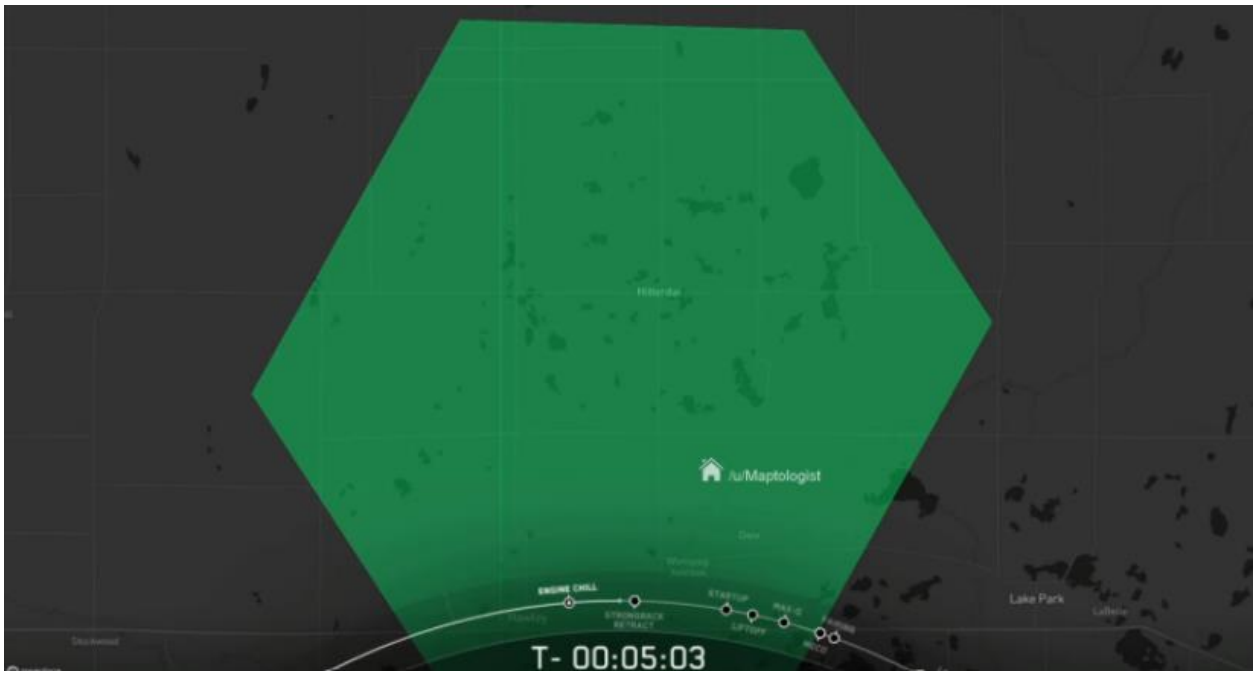


Рис. 2.8 Наочна візуалізація зони покриття супутникової мережі

У міру того, як промінь супутникового сигналу відхиляється від лінії надиру, кут діаграми спрямованості антени збільшується. Це означає, що чим далі від прямого під супутником напрямку, тим ширший стає пучок сигналу. Згідно з

даними SpaceX, наведеними у таблиці вище, для краю зони покриття кут досягає приблизно 4 градусів.

Одночасно з цим діаметр зони покриття одного променя на поверхні Землі збільшується, досягаючи на периферії зони видимості супутника близько 80 км. Така зміна діаметра обумовлена геометрією розсіювання сигналу та конструктивними особливостями фазованої антени (ФАР), яка встановлена на супутнику. Вузький пучок сигналу під надиром концентрує енергію на невеликій ділянці земної поверхні, забезпечуючи високу інтенсивність та стабільність сигналу, а на краю зони пучок розширюється, що дозволяє покривати більшу територію, зберігаючи безперервність зв’язку між сусідніми променями.

Виходячи з цієї геометрії та особливостей антен супутника Starlink, проекція променів на поверхню Землі формує систему зон покриття, де центральна частина променя має максимальну потужність, а по краях — поступове зменшення інтенсивності. Така конфігурація дозволяє забезпечити оптимальне покриття, уникнути «прогалин» між променями сусідніх супутників і мінімізувати накладення сигналів, що особливо важливо для підтримки високої швидкості та стабільності інтернет-з’єднання.

У результаті, планування орбітальних позицій супутників та спрямованості їх антен стає критично важливим етапом у побудові глобальної мережі Starlink, оскільки від цього залежить як щільність покриття, так і якість передачі даних, а також ефективність використання спектра частот і енергії сигналу на всіх етапах роботи мережі.

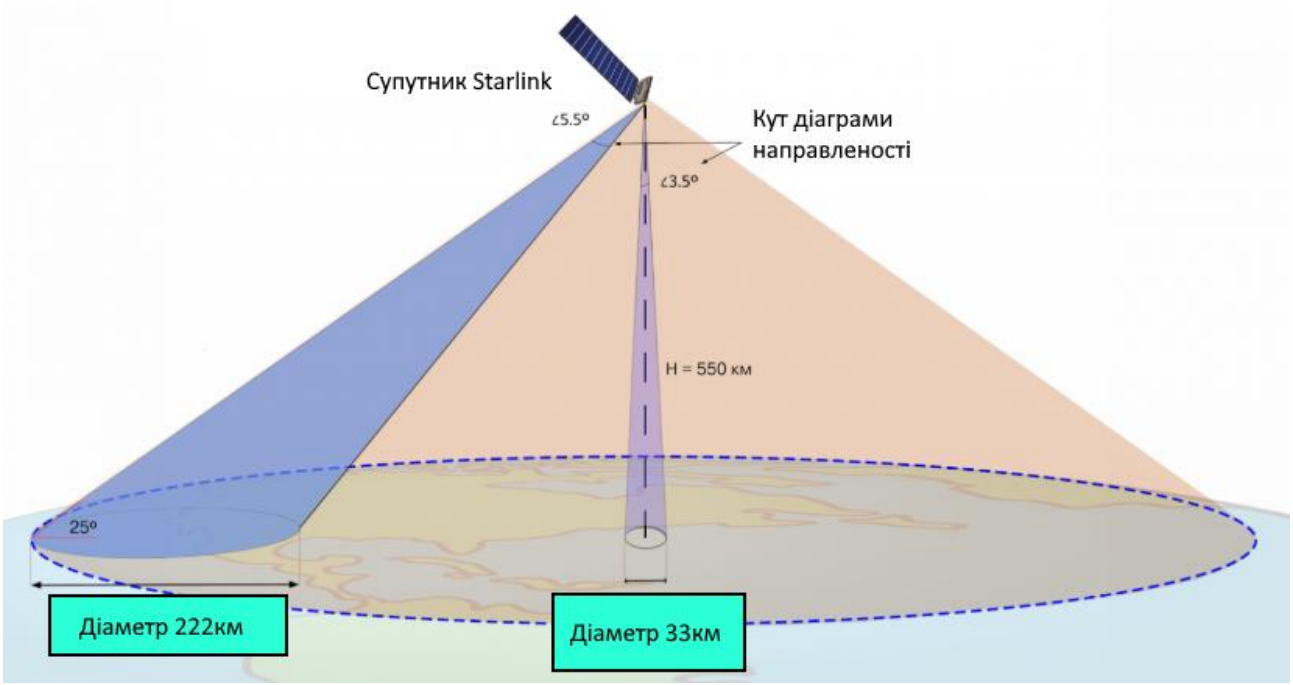


Рис. 2.9 Проєкція променів на Землю

Таким чином, один супутник Starlink теоретично здатний формувати до 300 окремих променів (beam) у межах своєї зони обслуговування. Кожен з цих променів відповідає вузькій ділянці земної поверхні, на яку супутник спрямовує сигнал, забезпечуючи високу концентрацію енергії та стабільність зв’язку для користувачів, розташованих у межах цього променя.

Нижче наведено умовну проекцію з боку супутника на його зону видимості, де показано, як абонентські термінали сприймають супутник. У цій зоні термінали бачать супутник під кутом місця 25 градусів, що є мінімальним кутом для ефективного прийому сигналу від плоских фазованих антен супутника. Така конфігурація дозволяє оптимально розподіляти потужність сигналу між різними променями, уникати перехрещень і накладень між сусідніми променями та забезпечувати безперервне покриття на всій території обслуговування.

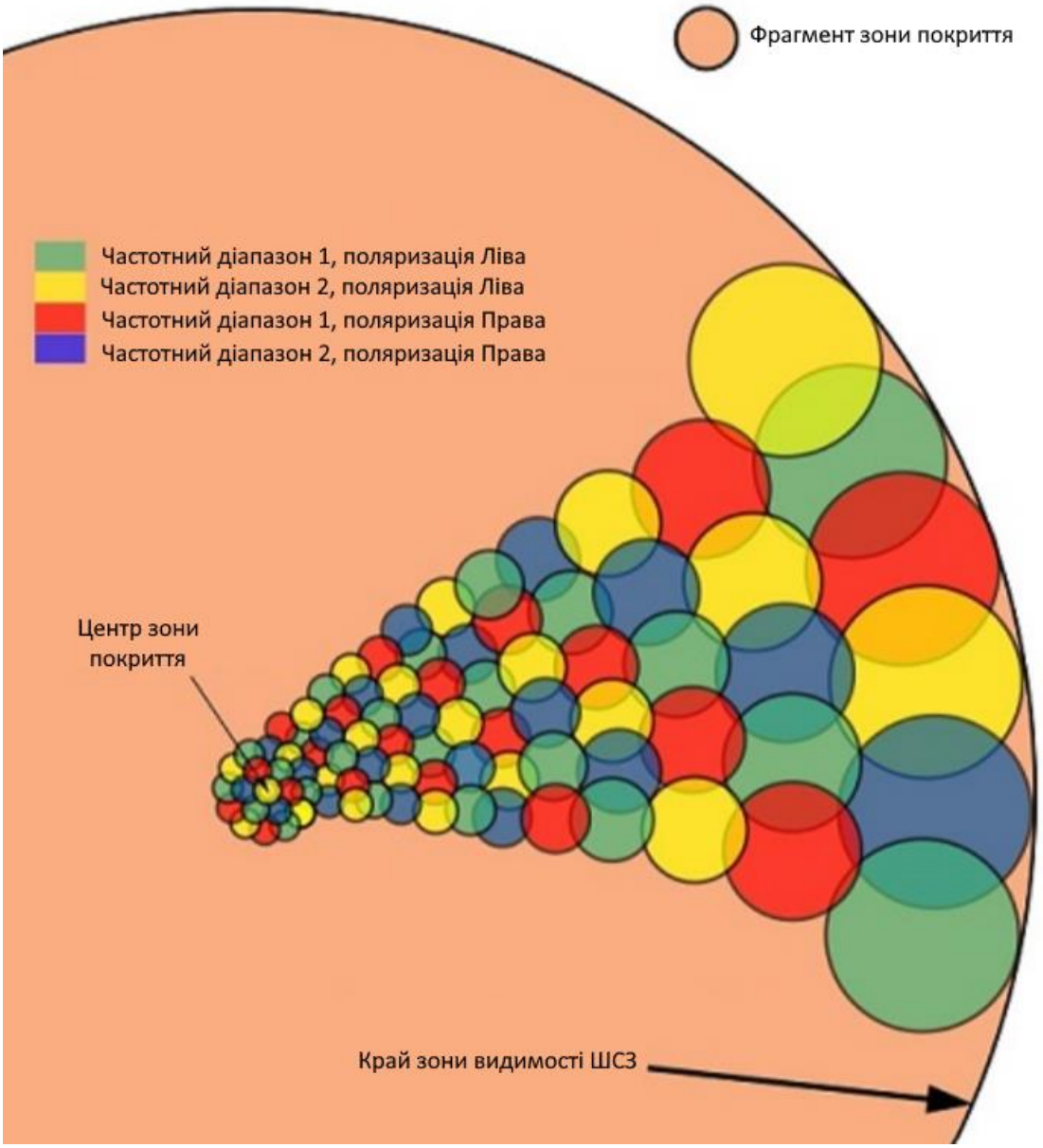


Рис. 2.10 Схематична проєкція зони видимості

Завдяки наявності великої кількості променів один супутник може одночасно обслуговувати велику кількість користувачів, ефективно розподіляючи ресурс частоти та підтримуючи високу швидкість передачі даних. Така багатопроменева архітектура є ключовою особливістю системи Starlink, яка дозволяє забезпечувати масштабне глобальне покриття та високу надійність інтернет-з’єднання навіть у віддалених або малонаселених районах.

З наявних документів SpaceX не можна точно визначити, скільки променів (beam) організовано на кожному супутнику Starlink. Проте можна зробити оцінку максимальної кількості променів, здатних одночасно функціонувати у зоні

видимості одного супутника, виходячи з обмежень частотного ресурсу. У Ку-діапазоні неможливо задіяти більше мегагерц для передачі даних від супутника до абонентського терміналу, ніж у Ка-діапазоні для фідерної лінії від гейтвею до супутника. Це обмеження становить максимум 4200 МГц при використанні обох поляризацій, що дозволяє оцінити верхню межу кількості променів, які можна одночасно активувати.

Для проведення таких оцінок ми виходимо з припущення, що супутники Starlink належать до типу «bent pipe», тобто вони не обробляють інформацію на борту. Іншими словами, супутник виконує роль ретранслятора: він лише приймає сигнал, змінює його частоту і передає далі, без демодуляції радіосигналу в IP-пакети та їх маршрутизації. Цей принцип роботи характерний для багатьох сучасних супутників зв'язку, особливо великих і ресурсомістких систем. На сьогодні немає підтверджених даних, що супутники першого покоління Starlink здійснюють обробку даних на борту, і всі функції маршрутизації та управління трафіком виконуються на наземних гейтвеях.

Таке припущення має велике значення для аналізу та моделювання роботи мережі, оскільки воно визначає, що супутник виступає виключно як ефективний ретранслятор сигналу, концентруючи його на потрібній ділянці земної поверхні та забезпечуючи високу швидкість передачі даних, низькі затримки та надійність покриття. Крім того, воно дозволяє планувати кількість променів, зон покриття та їх розташування для досягнення оптимального балансу між щільністю сигналу, розподілом трафіку та мінімізацією перехрещень між сусідніми променями.

Як випливає з таблиці параметрів абонентського терміналу (див. розділ Абонентський термінал Starlink), супутниковий канал від супутника до абонентського терміналу має максимальну смугу пропускання 240 МГц у напрямку «вниз» (тобто від супутника до користувача) та 60 МГц у напрямку «вгору» (від користувача до супутника). Це означає, що пропускна здатність каналу в напрямку до користувача значно вища, ніж у зворотному напрямку, що відповідає типовим потребам системи для забезпечення швидкого доступу до інтернету та передачі великих обсягів даних.

У такій конфігурації, яка вважається оптимальною з точки зору ефективного використання частотного ресурсу, у зоні покриття одного супутника може одночасно функціонувати не більше 16 променів (beam). Ці промені дозволяють повністю використовувати доступний частотний ресурс у Ку-діапазоні — 4000 МГц, враховуючи захисні інтервали та частоти, виділені для командної радіолінії та передачі телеметрії. При цьому застосовуються обидві поляризації сигналу, що дозволяє максимально ефективно розподіляти частоти між променями та забезпечує високу щільність покриття.

Кожен промінь супутника відповідає за обслуговування певної ділянки земної поверхні та групи абонентських терміналів. Таким чином, обмеження на 16 променів визначає максимальну щільність покриття та пропускну здатність одного супутника. Оптимізація числа променів та їхніх зон покриття дозволяє уникнути перехрещень сигналів між сусідніми променями, зменшити втрати енергії, підвищити стабільність зв’язку і забезпечити максимальну швидкість передачі даних для всіх користувачів у зоні обслуговування супутника.

Крім того, таке планування променів дозволяє ефективно розподіляти мережеве навантаження між різними супутниками і підтримувати безперервне покриття навіть у регіонах із високою концентрацією користувачів. Це є ключовим аспектом архітектури мережі Starlink, яка покликана забезпечити глобальне інтернет-покриття з високою надійністю та низькими затримками, одночасно оптимізуючи використання обмежених ресурсів частотного спектру.

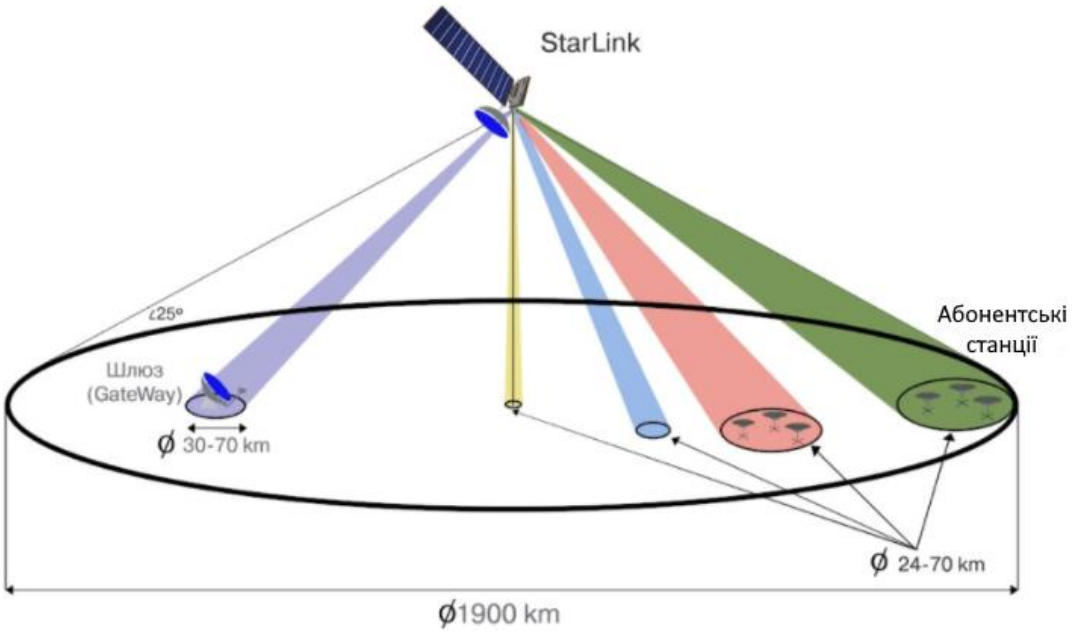


Рис. 2.11 Діаметр зони видимості ШСЗ з кутом місця до 25 градусів при висоті ШСЗ 550 км становить приблизно 1900 км, площа цієї зони 2 835 294 кв. км

У таблиці нижче наведено розраховану кількість променів на супутнику, необхідних для повного покриття зони, видимої зі супутника, на поверхні Землі в межах кута місця понад 25 градусів. Для розрахунків прийнято, що діаметр антени абонентського терміналу складає 48 см.

Таблиця 2.3

Розрахована кількість променів на супутнику

Кут місця, градуси	**Діаметр зони променя, км**	**Площа зони променя, км²**	**Кількість променів для повного покриття зони**	**Ефективна площа антени, м²**
80	40	1 257	2 256	0,178
70	50	1 964	1 444	0,170
60	60	2 827	1 003	0,157
50	80	5 027	564	0,138
40	130	13 273	214	0,116
30	210	34 636	82	0,090

Однак тут постає важливе питання: якщо супутник Starlink обладнаний лише 16 променями, кожен з яких має діаметр приблизно від 5 до 40 км, то як компанії SpaceX вдалося забезпечити практично суцільне покриття території північної частини США вздовж 50-ї паралелі? Адже на перший погляд, такої кількості променів для покриття великої площі явно недостатньо.

Уявімо, що поверхня Землі поділена на невеликі ділянки однакового розміру, кожна з яких має діаметр близько 30 км. У такому випадку один промінь супутника може надзвичайно швидко «стрибати» між цими ділянками, переключаючись кожні 5 мікросекунд. Завдяки цьому фізично обмежений промінь фактично охоплює значно більшу площу, ніж його статичний діаметр, і забезпечує практично безперервне покриття у межах видимості супутника.

Ця технологія дозволяє супутникам першого покоління Starlink ефективно обслуговувати велику кількість абонентських терміналів, навіть якщо кількість фізичних променів обмежена. Динамічне перенаправлення променів у поєднанні з високошвидкісним електронним скануванням забезпечує суцільне покриття, високу швидкість передачі даних та стабільність сигналу.

Таким чином, навіть при обмеженій кількості променів один супутник Starlink здатен оптимально використовувати частотний ресурс і створювати безперервне покриття на великих територіях, що пояснює ефективну роботу мережі на півночі США та інших регіонах з високою щільністю користувачів.

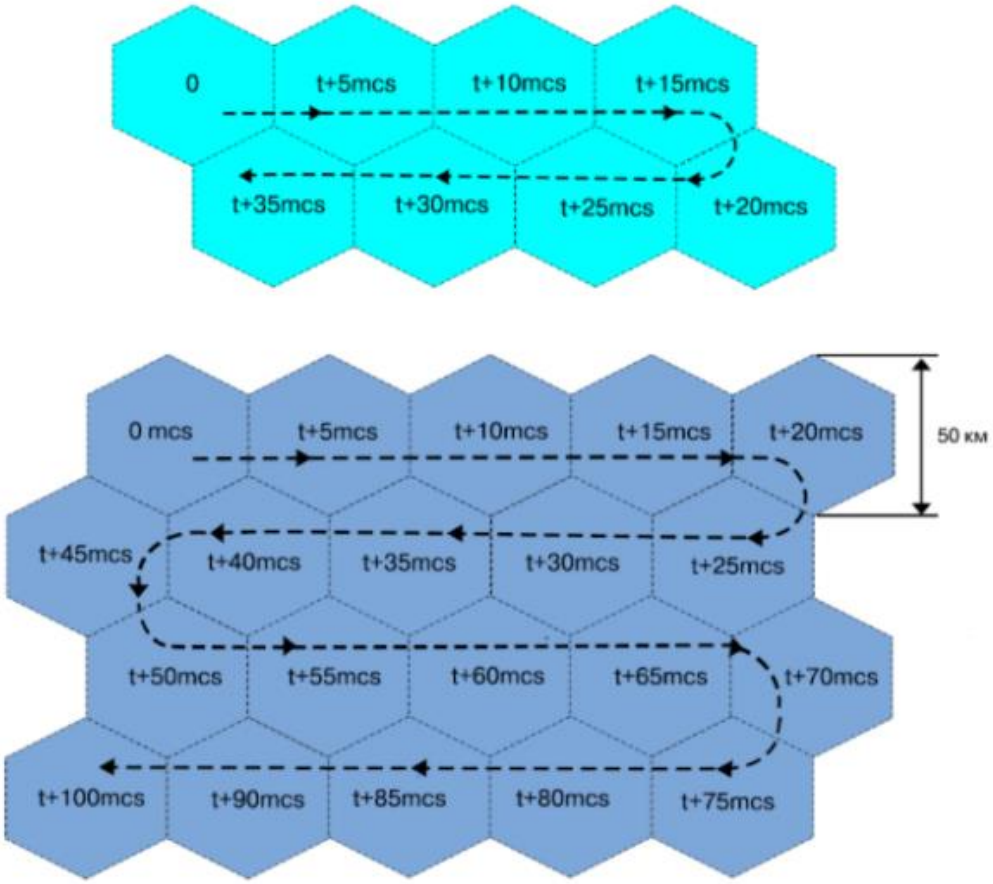


Рис. 2.12 Промінь зі Starlink "стрибає", перемикаючись, кожні 5 мікросекунд

У попередньому прикладі показано розбиття поверхні Землі на 8 та 20 фрагментів, причому промінь супутника переміщується між ними, обмінюючись інформацією з терміналами, розташованими в кожному конкретному фрагменті. Слід зазначити, що чим більше фрагментів має обслуговувати промінь, тим менша реальна швидкість, яку сприймає абонентський термінал та програма Speedtest, і тим більша затримка передачі даних.

З цього випливає, що зменшення розмірів груп абонентських терміналів дозволяє значно скоротити затримку та підвищити швидкість передачі даних приблизно у 2,5 рази. Такий ефект досягається, якщо скоротити кількість зон, які обслуговує один промінь, з 20 до 8. Це зменшує час одного циклу обслуговування і підвищує загальну ефективну швидкість передачі інформації для кожного фрагмента.

Тестування Starlink показує, що співвідношення сигнал/шум (SNR) перебуває на рівні 11–12 дБ, що дозволяє реалізувати спектральну ефективність близько 3

біт/Гц (16 APSK ⅚). У каналі шириною 240 МГц це дозволяє передавати до 720 Мбіт. Якщо один промінь обслуговує 20 фрагментів, швидкість для кожного з них не перевищує 36 Мбіт; при 8 фрагментах — до 90 Мбіт; а якщо промінь обслуговує лише 2 фрагменти, швидкість досягає максимально можливих 360 Мбіт.

Це демонструє, чому SpaceX потрібна велика кількість супутників: чим їх більше, тим вищий рівень сервісу для абонента. На початковому етапі пріоритетом є забезпечення повного покриття території.

Для фідерного променя у Ка-діапазоні, який забезпечує підйом інтернет-трафіку на борт супутника, застосовується параболічна антена. Щоб досягти максимальної пропускної здатності при обмеженій смузі частот, необхідно підтримувати високе співвідношення сигнал/шум, що досягається через збільшення потужності сигналу та сузьке спрямування променя на Землю. У сучасних системах з HTS-супутниками діаметр зони фідерного променя становить близько 100 км. Оскільки супутники Starlink перебувають на набагато меншій висоті, діаметр зони може бути ще меншим. Вузький промінь також дозволяє зменшити перешкоди для інших систем, що працюють у Ка-діапазоні.

Фазована антена супутника керує напрямком променя, може спрямовувати його у будь-яку точку (steerable beam) і, як зазначено в заявці SpaceX до FCC, навіть змінювати його форму (shapeable).

На висоті 550 км супутник рухається з такою швидкістю, що перебування в зоні видимості абонентського термінала триває близько 4,1 хвилини (приблизно 250 секунд). Якщо у системі реалізована стратегія максимального часу сеансу супутника з групою терміналів у межах одного району та мінімальної кількості перемикань (handover), супутник ефективно обслуговує термінали протягом усього циклу.

Малий запас променів на борту супутника ускладнює забезпечення 100% покриття, що пояснює необхідність запуску великої кількості супутників. Цей фактор також пояснює, чому SpaceX довелося зменшити мінімальний кут місця з 40° до 25°, навіть за умови зниження ефективності антени з фазованою решіткою.

Для максимального покриття ефективніше спрямовувати промені не в надир, а на периферію зони видимості, навіть якщо там ефективна площа антени і її пропускна здатність значно зменшуються.

Механізм повороту антени в абонентському терміналі Starlink забезпечує оптимальний кут між фазованою решіткою та супутником (ідеально 90°), що гарантує стабільне та ефективне приймання сигналу.

Центр управління мережею координує роботу всіх супутників, гейтвеїв і абонентських терміналів. Це найменш видима, але ключова частина системи Starlink.

Термін служби супутника на орбіті 550 км — близько 5 років. Після закінчення запасу робочого тіла (криптону) супутник або за командою виконує зниження орбіти, або, при втраті зв’язку з Землею, поступово гальмується атмосферою і згорає.

Супутники Starlink виробляються практично серійно у великих обсягах. Виробничі потужності SpaceX дозволяють випускати до 120 супутників на місяць, тоді як середній термін виготовлення одного супутника для геостаціонарної орбіти становить 2–3 роки.

Такий темп виробництва скорочує цикл випробувань. Для економії коштів використовуються дешевші комплектуючі, наприклад, замість ксенону застосовується дешевший криптон для ЕРД. Це впливає на ресурс та надійність супутників, конструкція яких доопрацьовується під час космічних випробувань.

3 ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ ТА ЗАТРИМКА

3.1 Пропускна спроможність мережі Starlink

У першій заявці, поданій компанією SpaceX до FCC (Федеральної комісії зі зв'язку США), було зазначено, що пропускна здатність одного супутника складе від 17 до 23 Гбіт/с, при цьому усереднене значення приймалося рівним 20 Гбіт/с. Пізніше, у публічних повідомленнях компанії, вказувалося, що кожен запуск 60 супутників версії Starlink 1.0 додає до мережі приблизно 1 Тбіт/с пропускної здатності. З огляду на це, реальна пропускна здатність одного супутника становить близько 16–17 Гбіт/с.

Важливо відзначити, що у документах SpaceX не уточнювалося, чи це значення є сумарним у обох напрямках (вниз та вгору), або ж воно відображає тільки передачу даних з мережі Інтернет до абонента. У будь-якому випадку, оцінювати пропускну здатність всієї глобальної мережі Starlink не має сенсу, адже вона не може бути повністю реалізована: близько 70% поверхні Землі покрито океанами та морями, а попит на доступ до Інтернету у віддалених регіонах, таких як пустелі Сахара чи Гімалаї, значно нижчий, ніж у густонаселених районах. Тому доцільніше говорити про пропускну здатність окремого супутника та визначати, скільки абонентів він здатен обслуговувати.

Розглянемо пропускну здатність супутника Starlink окремо у Ку- та Ка-діапазонах:

- Ка-діапазон (фідерна лінія): сумарна доступна смуга становить 4200 МГц у двох поляризаціях. З урахуванням заявлених модулів кодування 64QAM (6 біт/Гц), радіолінійний бюджет показує, що така спектральна ефективність є досяжною. Тобто оцінка пропускної здатності 20 Гбіт/с на лінії «Земля → супутник» є реальною та обґрунтованою.
- Лінія «Супутник → Абонент» у Ку-діапазоні: для сучасного варіанту абонентського термінала спектральна ефективність складає лише 1,5 біт/Гц, що дає пропускну здатність близько 6 Гбіт/с, тобто трохи менше однієї

третини початково заявлених 17–20 Гбіт/с. Водночас, якщо використовувати більш потужні термінали типів C та D з антеною 1,2 або 2,4 м, пропускна здатність мережі може досягати заявлених значень 17–20 Гбіт/с.

На основі цих даних можна оцінити максимальну кількість абонентів, яких здатен обслуговувати один супутник Starlink. При пропускній здатності 6 Гбіт/с у напрямку «Інтернет → абонент» та враховуючи, що середнє споживання одного домогосподарства США по оптиці складає 281 Гбайт на місяць (еквівалентно 0,9 Мбіт/с при рівномірному розподілі трафіку), а пікове та середньомісячне навантаження співвідносяться як 1:3–4, отримуємо, що один супутник може обслуговувати приблизно 1500–2000 абонентів.

Якщо ж встановити тарифні обмеження, наприклад 150 Гбайт на місяць, один супутник здатен обслуговувати до 3–4 тисяч абонентів. Ці розрахунки базуються на використанні групових методів множинного доступу (CDMA/TDMA/FDMA) для оптимального розподілу частотного ресурсу супутника, а не на виділених каналах типу SCPC.

Для оцінки покриття території США (близько 10 млн км², або 2% поверхні Землі), з урахуванням «прибережних» зон, можна припустити, що 3% супутників першого етапу надають сервіс у межах США. Таким чином, з групування 1584 супутників першого етапу, над США будуть активні не більше 45–48 супутників, що дозволяє обслуговувати 150–200 тисяч абонентів.

З тарифом $80 на місяць це принесе SpaceX $150–200 млн на рік, а з тарифом $100 на місяць — $200–250 млн на рік, що значно нижче прогнозів бізнес-плану компанії 2016 року.

3.2 StarLink та програма Rural Digital Opportunity Fund

Надання телекомунікаційних послуг у сільських районах є економічно невигідним для більшості операторів зв’язку, оскільки витрати на будівництво та підтримку інфраструктури в перерахунку на одного абонента значно перевищують витрати у міських умовах. Це спостерігається у всіх країнах світу й є

загальноприйнятою закономірністю. В таких умовах держави та оператори змушені шукати баланс між економічною доцільністю та забезпеченням соціально важливого доступу до послуг.

Існує два основних підходи до вирішення проблеми доступності послуг у сільській місцевості:

1. Монополістичний підхід, коли один оператор отримує право на надання послуг по всій країні і зобов'язаний обслуговувати всіх громадян, включаючи мешканців віддалених та малонаселених районів. При цьому вартість послуг у містах фактично компенсує витрати на обслуговування сільських районів. Прикладом такого підходу є поштові та телекомунікаційні служби в деяких країнах, де держава гарантує універсальне обслуговування.

2. Багатооператорська система з державним регулюванням, коли визначаються переліки обов'язкових послуг, які повинні надаватися всім громадянам, незалежно від місця проживання. Такі послуги зазвичай називаються універсальними послугами, і держава компенсує витрати операторів через спеціальні фонди. Компенсації можуть надходити безпосередньо з державного бюджету або через створення спеціального фонду, який фінансується часткою доходів всіх операторів країни. Аналогічна система діє в США. Оператори сплачують внески на користь Federal Communications Commission (FCC), яка, використовуючи ці кошти, залучає операторів до розширення доступу до Інтернету у сільських районах. Таким чином, держава стимулює операторів до розвитку інфраструктури там, де без державної підтримки її будівництво було б економічно недоцільним.

Однією з ключових ініціатив у цьому напрямку є програма RDOF (Rural Digital Opportunity Fund), яка стартувала у 2019 році. Це грант у розмірі 16 мільярдів доларів США, призначений для покращення доступу до високошвидкісного Інтернету в сільській місцевості протягом наступних 10 років. Кошти програми розподіляються через конкурсні аукціони серед операторів, які здатні забезпечити найвищу швидкість доступу та обсяг трафіку у тих регіонах, де наявна швидкість Інтернету менша за 25 Мбіт/с.

Отримувачі гранту RDOF зобов’язані надавати абонентам мінімум одну голосову та одну широкосмугову послугу на комерційній основі. При цьому послуги мають відповідати державним вимогам та покривати всю виграну територію у визначені терміни:

- 40% необхідної кількості точок доступу у штаті — до кінця третього року;
- ще 20% додатково — до кінця четвертого та п’ятого року.

Цей підхід дозволяє збалансувати економічну доцільність та соціальну справедливість, забезпечуючи рівний доступ до сучасних телекомунікаційних послуг навіть у найвіддаленіших регіонах. Програма стимулює операторів ефективно використовувати наявні технології, у тому числі супутникові системи зв’язку, для покриття важкодоступних місцевостей.

Важливо відзначити, що супутникові системи, такі як Starlink від SpaceX, ідеально підходять для покриття малонаселених і віддалених територій. Завдяки низькій орбіті та високій маневровості супутників можна забезпечити швидкий доступ до Інтернету навіть там, де будівництво наземної інфраструктури економічно невигідне. При цьому супутникова технологія дозволяє гнучко масштабувати покриття, додаючи нові супутники до групування та оптимізуючи маршрути передачі даних.

Таким чином, державна підтримка, конкуренція між операторами та інноваційні супутникові технології у комплексі забезпечують економічно ефективний та соціально справедливий доступ до Інтернету у сільських районах. Це створює передумови для цифрової інклюзії, дозволяє зменшити розрив між містом і селом та стимулює розвиток економіки віддалених регіонів за рахунок доступу до сучасних інформаційних технологій.

Для визначення переможця передбачено систему оцінки з урахуванням штрафних балів, що залежить від технічних характеристик Інтернет-сервісу. Швидкість з’єднання при цьому поділяється на чотири категорії.

Performance Tier	Speed	Usage Allowance	Weight
Minimum	≥ 25/3 Mbps	≥ 250 GB or U.S. average, whichever is higher	50
Baseline	≥ 50/5 Mbps	≥ 250 GB or U.S. median, whichever is higher	35
Above Baseline	≥ 100/20 Mbps	≥ 2 TB	20
Gigabit	≥ 1 Gbps/500 Mbps	≥ 2 TB	0

Рис. 3.1 Система оцінки

Що стосується супутникових технологій, правила розроблені строго та однакові для всіх операторів супутникового зв'язку. Кожен оператор отримує штрафні бали за невиконання встановлених критеріїв.

Ідеальною є пропозиція оператора, який забезпечує швидкість 1 Гбіт/с: у нього 0 штрафних балів, а затримка менше 100 мс практично гарантує перемогу та отримання гранту.

Водночас вимоги до затримки ставлять під сумнів ефективність існуючих сервісів операторів ViaSat та Hughes Network Systems, що працюють із супутниками на геостаціонарній орбіті.

3.3 Супутникова затримка у мережі SpaceX

Час затримки (англ. *latency*), або пінг, є одним із ключових показників ефективності супутникових мереж, і він особливо важливий для мереж на низькій орбіті (LEO). На відміну від геостаціонарних супутників (ГСО, 36 000 км над Землею), низькоорбітальні супутники знаходяться значно ближче до поверхні, що дозволяє істотно скоротити час, який потрібно сигналу для передачі від користувача до супутника і назад.

У мережах ГСО час затримки визначається відстанню, яку долає радіосигнал до супутника і назад на Землю. Затримка в одному напрямку зазвичай становить

300–400 мс, а пінг — тобто час для проходження сигналу до веб-сайту або сервера та повернення назад — досягає 600–800 мс, оскільки пінг фактично дорівнює подвоєному часу затримки. Така велика затримка негативно впливає на критично важливі інтернет-додатки, включаючи VPN-тунелі, віддалений робочий стіл, телефонні та відеоконференції, а також онлайн-ігри, де будь-яка додаткова мілісекунда може призвести до втрати ефективності та комфорту користувача.

Крім того, висока затримка істотно обмежує реальну швидкість передачі даних по IP-протоколу, навіть якщо фізична пропускна здатність каналу висока. Це відбувається через необхідність повторних підтверджень пакетів, затримки у встановленні з’єднань і додаткові алгоритми контролю помилок, які збільшують загальний час доставки даних.

Супутники на низькій орбіті (LEO), такі як Starlink, розташовані всього на 550–1200 км над Землею, що дозволяє скоротити час затримки в десятки разів — до десятків мілісекунд, порівняно з сотнями мілісекунд у ГСО. Це забезпечує можливість реального часу взаємодії для користувачів, дозволяє комфортно працювати з онлайн-іграми, відеоконференціями, додатками для віддаленого доступу та іншими сервісами, які чутливі до затримок.

Завдяки низькій орбіті LEO-супутники роблять інтернет більш стабільним та швидким, підвищують якість обслуговування користувачів у віддалених і малонаселених районах, де традиційні наземні мережі часто не можуть забезпечити високу швидкість і низькі затримки. Таким чином, низька орбіта стає вирішальним фактором у конкурентоспроможності сучасних супутникових інтернет-сервісів і дозволяє забезпечити користувачам відчутно кращий досвід, ніж у мережах на геостаціонарній орбіті.

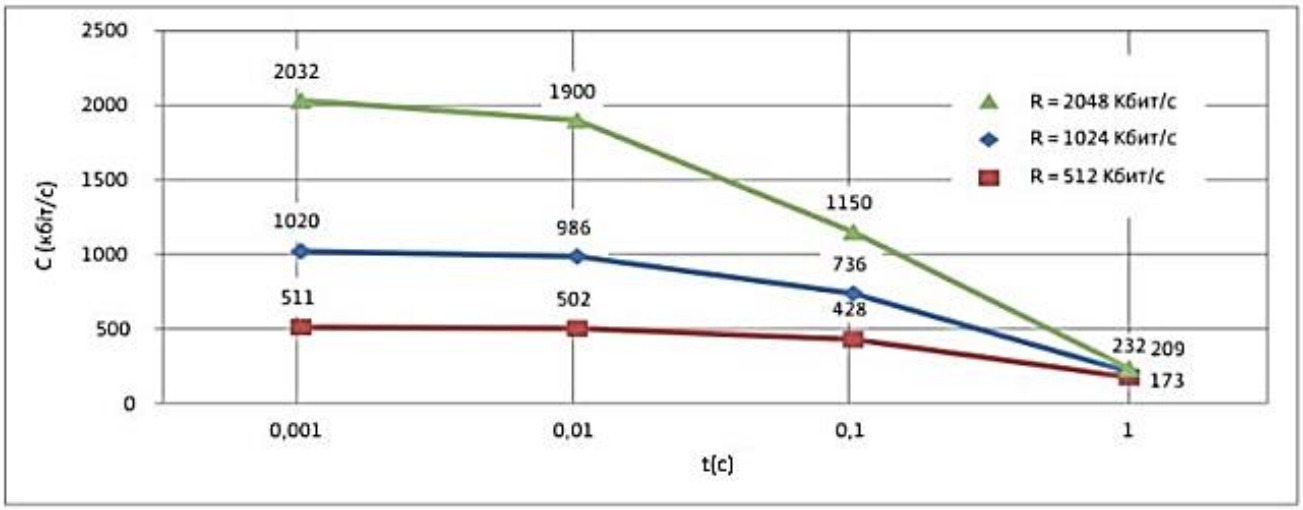


Рис. 3.2 Швидкість передачі інформації IP протоколу залежно від часу затримки для каналів різної пропускної спроможності

Саме низький рівень затримки (пінг) є ключовим фактором ефективності низькоорбітальних супутникових мереж і визначає їх основну перевагу перед мережами на геостаціонарній орбіті. Для SpaceX критично важливо забезпечити пінг менше 100 мс, адже саме цей показник виступає основним критерієм для Федеральної Комісії зі зв'язку США (FCC) при оцінці заявок на гранти програми Rural Digital Opportunity Fund (RDOF), спрямованої на забезпечення доступу до інтернету у віддалених та сільських регіонах. Якщо пінг перевищує цей поріг, отримати грант практично неможливо, а отже, досягнення низької затримки стає стратегічним завданням для оператора.

Затримка, яку спостерігає абонент, формується з двох основних компонентів:

1. Супутниковий сегмент — час передачі сигналу між гейтвеєм та абонентським терміналом.
2. Наземний сегмент — час маршрутизації даних від гейтвея до Центру управління мережею Starlink (ЦУС), який виконує функцію координації, обміну трафіком і доставки даних до необхідного абоненту ресурсу або сайту.

У супутниковому сегменті затримка включає три основні складові:

- Затримка у космосі — час проходження сигналу через космічний простір між супутником і Землею, який становить близько 3–4 мс.

- Апаратна затримка — час обробки сигналу під час модуляції та демодуляції IP-трафіку в радіосигнал, що зазвичай становить 5–20 мс, і залежить від швидкодії процесорів та якості електронних компонентів на борту супутника та гейтвея.
- Затримка у призначенні місця у кадрі (суперфреймі) — час, який витрачається на виділення слотів для передачі трафіку від гейтвея або абонентського терміналу. У режимі виділеного каналу ця затримка може бути мінімальною або нульовою, а при використанні режимів множественного доступу з поділом по часу (TDM) затримка може досягати десятків мілісекунд, оскільки один і той самий промінь супутника обслуговує кілька абонентських груп.

Таким чином, навіть невеликі додаткові затримки у будь-якому з цих сегментів безпосередньо впливають на реальний пінг, що відчуває абонент, а отже, на загальну якість послуг та ефективність мережі. Саме тому для Starlink критично важливо оптимізувати роботу променів супутника та алгоритми маршрутизації, щоб звести до мінімуму сумарну затримку між абонентським терміналом і кінцевим ресурсом у мережі Інтернет.

29 вересня 2020 року компанія SpaceX надіслала до Федеральної комісії зі зв’язку США (FCC) офіційний лист, у якому були представлені результати закритого бета-тестування абонентських терміналів, проведеного протягом серпня та вересня 2020 року. У цьому листі наводиться детальний графік тижневого тестування невеликої групи з 30 терміналів, під час якого передача файлів здійснювалася короткими сесіями тривалістю по 15 секунд. В рамках цього експерименту було виконано понад 1 мільйон вимірювань часу затримки сигналу (latency), що дозволило SpaceX оцінити стабільність та ефективність роботи мережі Starlink у реальних умовах. Дані вимірювань охоплюють різні сценарії використання, включаючи типові навантаження на інтернет-з’єднання, і дозволяють зробити висновки щодо продуктивності системи для кінцевого користувача в умовах низької орбіти. Такий обсяг тестів дав змогу не лише перевірити відповідність заявленим характеристикам, але й виявити потенційні

вузькі місця в роботі мережі та оптимізувати конфігурацію абонентських терміналів для подальшого розгортання.

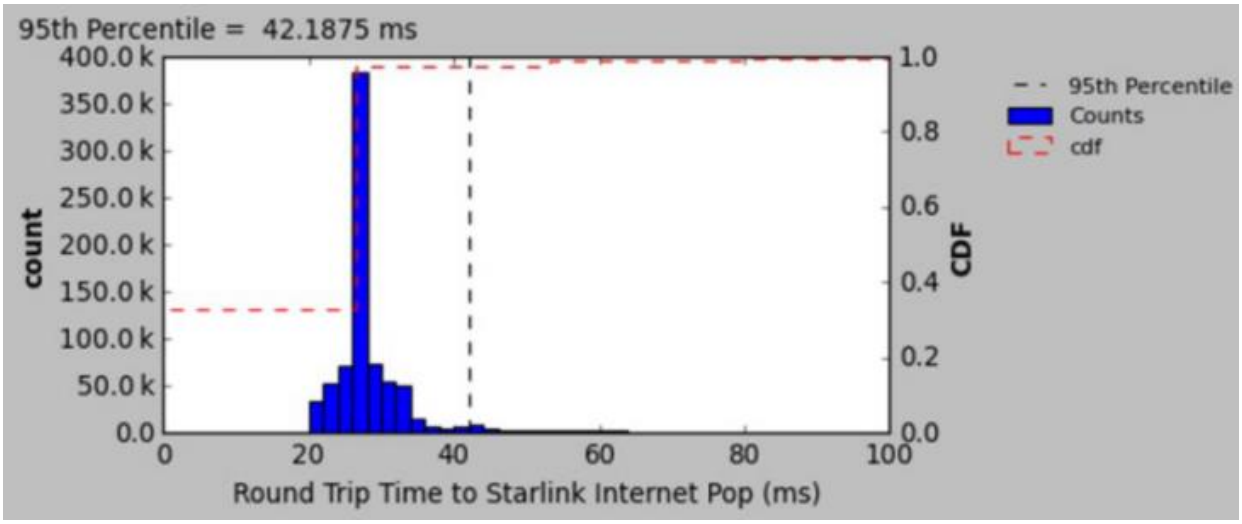


Рис. 3.3 Затримка сигналу

Як видно з графіка, у 95% випадків затримка сигналу становила менше 42 мс, а у 50% випадків – менше 30 мс, що цілком відповідає вимогам програми RDOF для підключення абонентів у сільській місцевості. Водночас такі показники, ймовірно, недостатні для організації високочастотної біржової торгівлі (high-frequency trading), де критично важлива затримка на рівні декількох мілісекунд. Тобто, хоча мережа Starlink демонструє чудові результати для загального користування та забезпечення широкосмугового інтернету у віддалених районах, її параметри поки не дозволяють конкурувати з наземними оптоволоконними каналами у специфічних фінансових застосунках.

Методи доступу до радіочастотного спектру

Серед існуючих методів доступу абонентських терміналів до радіочастотного спектра на супутниках виділяють два основні підходи:

1. Закріплення смуги частот за терміналом.
2. Доступ за запитом (Demand Assigned Multiple Access, DAMA).

Перший метод характеризується відносною простотою реалізації на апаратному рівні. Кожному терміналу виділяється фіксована частина частотного спектра супутника, яка використовується виключно ним. Такий підхід дозволяє спростити управління ресурсами частот, забезпечує передбачуваність параметрів

передачі та зменшує потребу в складних алгоритмах динамічного розподілу спектра.

Однак цей метод менш гнучкий, оскільки не враховує коливання трафіку та пікові навантаження мережі. Наприклад, якщо один термінал активно передає великі обсяги даних, а інші термінали в цей час малоактивні, виділена смуга частот може використовуватися неефективно. Тому закріплена смуга частот добре підходить для стабільних сценаріїв з передбачуваним навантаженням, але менш ефективна у динамічних умовах, коли трафік різко змінюється або кількість активних користувачів коливається.

Метод DAMA, навпаки, дозволяє більш ефективно розподіляти спектр між абонентами в реальному часі, адаптуючись до поточної потреби в пропускній здатності. Це забезпечує більш гнучке використання ресурсів супутника, але вимагає складнішого апаратного та програмного забезпечення.



Рис. 3.4 Спектрограма використання частотного ресурсу як виділеного каналу типу SCPC – Single Channel per Carrier

Метод закріплення смуги частот за окремим абонентським терміналом має свою головну перевагу — швидке встановлення зв’язку. Як тільки антена термінала наводиться на супутник, відразу може розпочатися передача даних на гейтвей без додаткових процедур синхронізації або узгодження ресурсів. Проте такий підхід

має серйозний недолік: супутниковий сегмент використовується нераціонально, оскільки більшість часу термінал не передає дані. У результаті ефективність такого каналу (ступінь використання виділеної смуги) рідко перевищує 5%. Наприклад, якщо сервісний план мережі Starlink передбачає швидкість передачі 100/40 Мбіт/с, то при використанні режиму виділеного каналу один супутник може обслуговувати максимум 60 абонентів (6 Гбіт ÷ 100 Мбіт), що робить таку схему економічно неефективною, особливо при масштабуванні мережі на сотні тисяч користувачів.

Другий підхід полягає у спільному використанні одного частотного каналу кількома абонентами, із застосуванням тимчасового або частотного поділу ресурсів. Це реалізується за допомогою методів групового доступу, таких як TDMA (Time Division Multiple Access) — розподіл по часу, та FDMA (Frequency Division Multiple Access) — розподіл по частоті.

Хоча ці методи значно складніші в реалізації та потребують високого рівня синхронізації між терміналами для коректної передачі пакетів, вони дозволяють використовувати частотний спектр супутника в десятки разів ефективніше, ніж метод виділеної смуги. Це означає, що обсяг переданої інформації та кількість обслуговуваних абонентів зростає пропорційно кількості часу та частоти, які вивільняються завдяки груповому доступу.

Застосування методів TDMA і FDMA стає ключовим елементом у побудові масових супутникових мереж, таких як Starlink, де від ефективності використання частотного ресурсу залежить загальна пропускна здатність мережі та якість обслуговування користувачів. Крім того, такий підхід дозволяє значно зменшити затримки, підвищити стабільність з’єднання та забезпечити більш рівномірний розподіл пропускної здатності між великою кількістю абонентів у різних регіонах обслуговування.

У результаті можна стверджувати, що груповий доступ є економічно та технічно ефективним рішенням, яке дозволяє супутниковим мережам одночасно масштабуватися, збільшувати пропускну здатність і підвищувати якість обслуговування, що робить його незамінним у сучасних системах глобального інтернет-покриття.

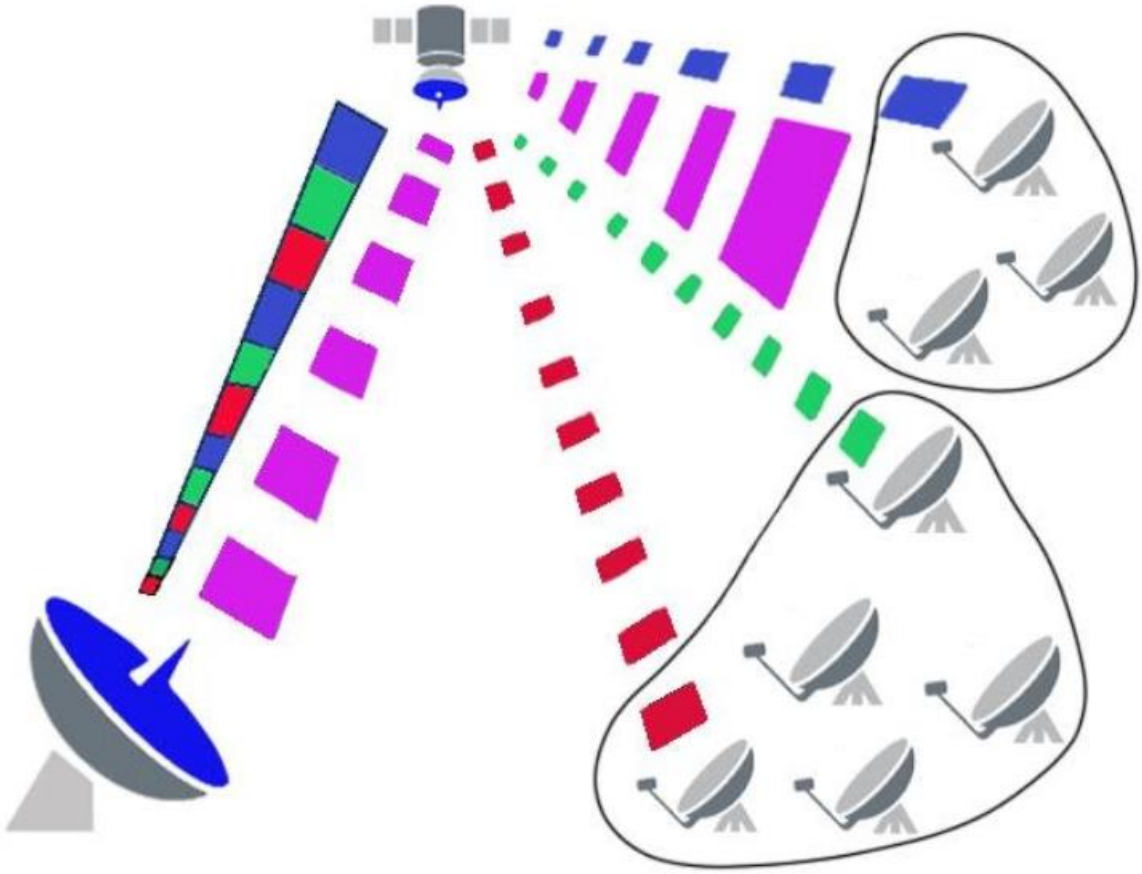


Рис. 3.5 Схема доступу до частотного ресурсу супутника під час використання групового доступу TDM/TDMA

Також важливо відзначити, що системи з груповим доступом та динамічним розподілом ресурсів мають ще одну суттєву перевагу – вони дозволяють регулювати швидкість передачі даних для окремих абонентських терміналів у значно ширшому діапазоні, ніж це можливо при виділених каналах. Іншими словами, практично вся пропускна здатність шлюзової станції може бути спрямована на один термінал у конкретний момент часу, що дозволяє оптимізувати користувацький досвід для окремих споживачів або груп користувачів із високими вимогами до швидкості.

Проте така гнучкість має суттєвий «ціну» у вигляді збільшеної затримки передачі, оскільки вся координація та призначення часу і місця в кадрі для відправки пакета здійснюється Центром управління мережею (ЦУС). Тобто, перед тим як термінал зможе передати дані, інформація про його намір підключитися до Інтернету спершу повинна надійти до ЦУС, бути оброблена, визначено наявність

вільних слотів у кадрі на найближчому супутнику, а у разі його повного завантаження — на іншому супутнику. Далі дані про доступні частоти передаються на гейтвей, а потім — безпосередньо до абонентського термінала.

Тільки після завершення цих процедур термінал може почати передачу, причому використовує частоту лише протягом перебування в межах конкретного міні-променя із певною поляризацією та набором частот, зазвичай не більше 6–7 секунд, після чого термінал потрапляє в зону іншого міні-променя з новими частотами та/або поляризацією. Оптимально, коли обсяг трафіку, який планує використати абонент, заздалегідь повідомлений ЦУС. Це дозволяє забронювати слоти у кадрі для термінала у всіх міні-променях, через які він проходитиме під час руху супутника, забезпечуючи безшовну передачу даних і безперервний перегляд відео онлайн.

Природно, що такий підхід значно ускладнює архітектуру гейтвеїв, абонентських терміналів і всієї мережі, оскільки вимагає постійного централізованого управління, синхронізації роботи всіх елементів мережі та моніторингу стану каналів у режимі реального часу.

З практичної точки зору, виділений канал більше підходить для спеціалізованих застосувань, таких як військові або урядові комунікації, де важлива надійність і стабільність. Натомість системи з груповим доступом і динамічним розподілом ресурсів оптимальні для комерційних користувачів, що дозволяє значно ефективніше використовувати частотний спектр і збільшити пропускну здатність мережі.

На даний момент немає точних даних про те, який саме метод доступу до космічного сегмента буде використовуватися у Starlink, проте можна припустити, що протоколи доступу запозичені з рішень компанії Broadcom, яка брала участь у стартовій розробці і має значний досвід у наземних ШПД і 5G.

29 вересня 2020 року SpaceX надіслала до FCC офіційний лист, у якому парирувала зауваження компанії ViaSat щодо заявки на зміни в мережі Starlink. У цьому листі вперше було надано детальні дані про формат супутникового каналу для

абонентських терміналів, що дозволило краще зрозуміти, як організована передача даних і як забезпечується ефективне використання супутникового спектра.

Як наслідок, система Starlink демонструє, що правильне поєднання динамічного розподілу ресурсів, централізованого управління та адаптивного керування променями супутникових антен дозволяє значно підвищити ефективність мережі, зменшити затримки для користувачів та забезпечити практично безшовний доступ до високошвидкісного Інтернету навіть у віддалених і малонаселених районах.

4 ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ТА ТЕРМІН СЛУЖБИ

4.1 Проблема космічного сміття

Проблема космічного сміття набула особливої гостроти після кількох інцидентів, які спричинили утворення великої кількості уламків на низьких орбітах Землі, ставлячи під загрозу безпеку інших супутників і роботу майбутніх космічних систем.

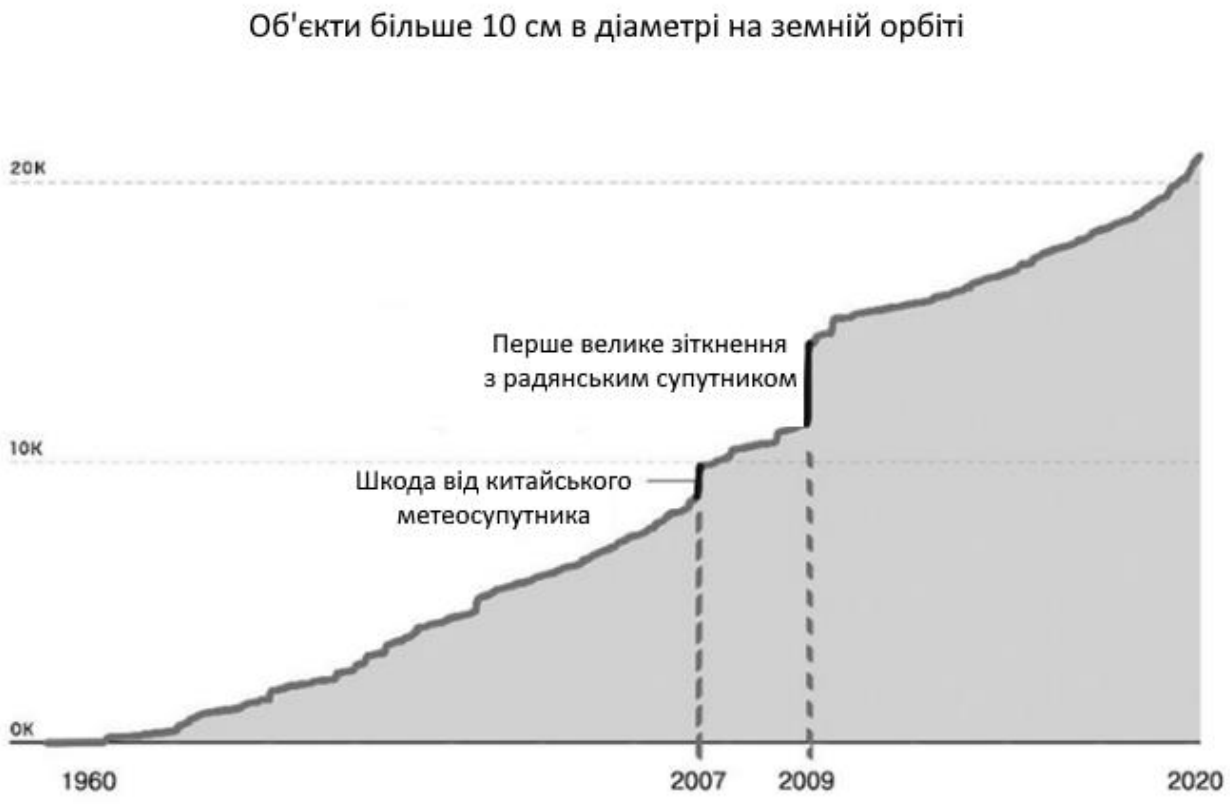


Рис. 4.1 Об’єкти більше 10 см в діаметрі на земній орбіті

11 січня 2007 року Китай провів успішне випробування протисупутникової зброї, під час якого метеоспутник FY-1C серії Fengyun, що перебував на полярній орбіті на висоті 865 км, був уражений прямим попаданням ракети. Ракета перехопила супутник на зустрічному курсі, і в результаті цього зіткнення утворилося щонайменше 2317 великих і середніх уламків космічного сміття, розмір яких варіювався від кількох сантиметрів і більше. Ця подія стала яскравим

прикладом того, як швидко можуть з’являтися небезпечні об’єкти на орбіті та як вони здатні створювати тривалий ризик для інших космічних апаратів.

Перший документально підтверджений випадок зіткнення супутників відбувся 10 лютого 2009 року, коли радянський «Космос-2251» зіткнувся з американським Iridium-33 на висоті 788,6 км. Швидкості обох апаратів були близько 7470 м/с, а відносна швидкість при зіткненні досягала 11,7 км/с. Маса Iridium-33 складала 600 кг, а «Космос-2251» — 900 кг. В результаті цього зіткнення утворилося приблизно 600 уламків, що додатково загострило проблему накопичення космічного сміття на орбітах, де розташовані активні супутники зв’язку та дистанційного зондування Землі.

Ці інциденти різко змістили увагу експертів на запобігання зіткненням супутників або їх вибухам, особливо щодо другорядних ступенів ракет та розгінних блоків, які часто стають джерелом численних уламків. Хоча плани компаній OneWeb (мережа з 900 супутників) та Telesat (мережа з 300 супутників) не викликали великої уваги, заявки SpaceX на створення мережі з 4425, а згодом і 7000 супутників, кардинально змінили ситуацію та змусили FCC провести детальний аналіз запропонованої угрупованості супутників з точки зору безпеки орбіти та управління космічним сміттям.

Одним із практичних наслідків цього аналізу стало рішення SpaceX знизити висоту орбіти своїх супутників з 1100 км до 550 км. Це забезпечує автоматичне сходження супутника з орбіти та його повне згоряння в атмосфері протягом приблизно п’яти років, навіть у випадку повної втрати зв’язку з наземними станціями. Зниження висоти орбіти суттєво зменшує ризик утворення довготривалого космічного сміття, оскільки уламки не залишаються на орбіті десятиліттями, як це відбувається на вищих гео- та середньоорбітальних висотах.

4.2 Розрахунковий термін служби супутника Starlink

Наприклад, розрахунковий термін служби супутника Starlink на орбіті з нахилом 53° залежно від висоти становить:

- На висоті 550 км — приблизно 5 років до повного згоряння в атмосфері.
- На висоті 1100 км — значно більше, десятиліття, що створює додаткові ризики накопичення уламків.

Таким чином, рішення SpaceX про низькоорбітальне розміщення своїх супутників є не лише технологічним вибором, але й ключовим заходом для мінімізації утворення космічного сміття, забезпечення безпечної роботи орбітальних угруповань і зниження ризику зіткнень із супутниками інших операторів.

Таблиця 4.1

Нахилення орбіти 53 градуси

Висота орбіти	**Термін служби супутника на орбіті**
200 км	22 дні
250 км	100 днів
300 км	344 дні
350 км	2,0 роки
400 км	2,9 роки

Окрім цього, інженери компанії SpaceX здійснювали детальні спеціалізовані розрахунки для окремих складових елементів своїх супутників, щоб визначити, які з них мають потенціал долетіти до поверхні Землі у випадку неконтрольованого сходу з орбіти. При цьому проводився аналіз не лише траєкторії падіння, а й оцінювалась «ударна» енергія цих елементів при зіткненні з поверхнею, що дозволяє прогнозувати можливі ризики для населення та інфраструктури. Такі розрахунки є частиною комплексної стратегії безпеки, спрямованої на мінімізацію наслідків космічного сміття та забезпечення того, щоб навіть у разі падіння супутника залишки його конструкцій мали мінімальний вплив на навколишнє середовище і людей.

Таблиця 4.2

Нахилення орбіти 53 градуси

Складовий елемент	**Кількість**	**Матеріал**	**Маса (кг)**	**DCA (кв.м)**	**Енергія (Дж)**
Вал	1	Залізо	1,66	0,47	2733
Частини корпусу	5	Карбід кремнію	1,50	2,79	961
Підшипник	5	Нержавіюча сталь	0,07	2,45	8
Кронштейн	12	Титан	0,03	4,92	6

Примітка: DCA (Debris Casualty Area) — це прогнозована площа ураження уламками на поверхні Землі, вимірювана в квадратних метрах. Якщо об’єкт повністю згоряє при вході в атмосферу і не досягає поверхні Землі, його DCA дорівнює нулю. Іншими словами, DCA показує потенційну небезпеку від уламків супутника для людей та об’єктів на Землі у разі їх падіння.

Починаючи з другої серії запуску 60 космічних апаратів версії Starlink 1.0, компанія SpaceX суттєво змінила конструкцію своїх супутників. Основною метою цих змін було усунення будь-яких компонентів, які могли б не повністю згоріти під час проходження через атмосферу і, відповідно, досягти поверхні Землі з енергією удару, достатньою для завдання шкоди людям або майну. Таким чином, SpaceX гарантує, що навіть у разі падіння уламків їх кінетична енергія буде мінімальною і не становитиме серйозної загрози. Це важливий крок для підвищення безпеки населення та зниження ризику інцидентів із космічними апаратами.

Крім того, SpaceX розробила спеціальну програму постійного моніторингу супутників та їх траєкторій руху. Програма передбачає контроль за наближенням супутників один до одного, а також взаємодією з іншими космічними апаратами або уламками на орбіті. Компанія регулярно отримує дані про такі зближення та здійснює необхідні корекції траєкторій для запобігання потенційним зіткненням. Це дозволяє підтримувати високий рівень безпеки космічної інфраструктури та зменшувати ризики створення додаткових уламків у навколоземному просторі.

Таким чином, комплекс заходів SpaceX — від вдосконалення конструкції супутників до активного моніторингу орбіти — дозволяє забезпечити не лише безпечну експлуатацію власної космічної групи, а й знижує загальний ризик для всіх учасників космічної діяльності, що особливо важливо на тлі зростання кількості комерційних та урядових супутників на низькій орбіті Землі.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи на тему «Дослідження архітектури супутникової мережі Starlink та її вплив на розвиток глобальних телекомунікацій» було проведено комплексний аналіз технічних, організаційних та регуляторних аспектів побудови низькоорбітальної супутникової системи нового покоління.

Насамперед встановлено, що архітектура Starlink є унікальним прикладом масштабної інтеграції космічного та наземного сегментів. Космічна складова формується щільним угрупованням супутників на низькій навколоземній орбіті (переважно 550 км), які забезпечують безперервне глобальне покриття та низькі затримки сигналу. Наземна складова включає центри управління мережею, шлюзові станції та абонентські термінали, які разом створюють цілісну інфраструктуру для взаємодії з користувачами та глобальною мережею Інтернет. Особливе значення має застосування технології лазерних міжсупутникових каналів (ISL), що суттєво підвищує ефективність маршрутизації даних і дозволяє системі конкурувати навіть із наземними волоконно-оптичними мережами.

Проведене дослідження показало, що вибір методів доступу до радіочастотного спектра має принципове значення для ефективності системи. Якщо фіксоване виділення каналу є простим, але малоефективним, то групові методи доступу (TDMA, FDMA) забезпечують набагато вищу продуктивність і масштабованість. Це підтверджує, що Starlink застосовує передові технології управління ресурсами для оптимізації роботи свого угруповання.

Окрему увагу приділено проблемам безпеки та космічного сміття. Досвід руйнування китайського супутника FY-1C у 2007 році та зіткнення Iridium-33 у 2009 році довів критичність проблеми утворення обломків. У відповідь на ці виклики SpaceX знизила висоту орбіти своїх супутників до 550 км, що забезпечує їх гарантоване згоряння в атмосфері у разі втрати керування. Крім того, компанія змінила конструкцію супутників Starlink (версія 1.0) так, щоб жоден із компонентів

не досягав поверхні Землі після завершення експлуатації, та запровадила програму активного моніторингу зіткнень.

Регуляторний аспект також виявився ключовим. Дослідження показало, що SpaceX використовує гнучкі стратегії взаємодії з різними регуляторами. Подання заявок через Норвегію дозволило обійти бюрократичні бар'єри та високі збори FCC у США. Завдяки цьому компанія змогла закріпити за собою частину орбітальних ресурсів і створити умови для подальшого масштабування мережі.

Аналіз конкурентного середовища продемонстрував, що поява Starlink змінила баланс сил на ринку супутникових комунікацій. Традиційні гравці, як-от ViaSat чи Hughes Network Systems, через використання геостаціонарних супутників не можуть забезпечити настільки низькі затримки сигналу. Це ставить Starlink у вигідне становище для здобуття грантів і участі в державних програмах (зокрема RDOF у США).

У результаті дослідження підтверджено, що супутникова мережа Starlink має величезний вплив на розвиток глобальних телекомунікацій, адже вона формує новий стандарт низьколатентного супутникового інтернету, розширює можливості доступу до цифрових послуг у віддалених та малонаселених регіонах, стимулює конкуренцію та розвиток альтернативних супутникових систем (OneWeb, Amazon Kuiper, Telesat), а також створює нові виклики у сфері регулювання, безпеки та управління орбітальним простором. Таким чином, архітектура Starlink демонструє, що майбутнє глобальних телекомунікацій пов'язане із синергією наземних і космічних технологій, а впровадження подібних систем відкриває шлях до формування єдиного планетарного інформаційного простору, де доступ до Інтернету стане універсальною послугою, незалежно від географії чи соціально-економічних умов.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chen, Y. The Concept, Technical Architecture, Applications and Future Trends of Satellite Internet. ScienceDirect, 2024. – огляд архітектури супутникових мереж, зокрема Starlink, та їхнього впливу на глобальну телекомунікаційну інфраструктуру.
2. Musk, L. Satellite Network by Leo Musk, AI. Barnes & Noble, 2024. – аналіз трьох основних компонентів системи Starlink: супутникової констеляції, інфраструктури наземних станцій та кінцевих терміналів користувачів.
3. Batagelj, B. Starlink Satellite Communications Network. ResearchGate, 2024. – технічні характеристики супутникової мережі Starlink, розробленої компанією SpaceX.
4. Wang, B., Zhang, X., Wang, S., et al. A Large-Scale IPv6-Based Measurement of the Starlink Network. arXiv, 2024. – масштабне дослідження мережі Starlink, включаючи аналіз IPv6-адрес та структури мережі.
5. Su, H., Su, J., Xia, Y., et al. The Small-World Beneath LEO Satellite Coverage: Ground Hubs in Multi-Shell Constellations. arXiv, 2025. – дослідження ефективності маршрутизації та міжсупутникового зв'язку в багатошарових констеляціях, таких як Starlink.
6. Izhikevich, L., Tran, M., Izhikevich, K., et al. Democratizing LEO Satellite Network Measurement. arXiv, 2023. – методологія оцінки продуктивності мереж LEO-супутників, зокрема Starlink, без необхідності спеціалізованого обладнання.
7. Laniewski, D., Lanfer, E., Meijerink, B., et al. WetLinks: a Large-Scale Longitudinal Starlink Dataset with Contiguous Weather Data. arXiv, 2024. – аналіз продуктивності Starlink з урахуванням погодних умов, на основі великого набору даних.
8. Jing-shi, T. Analysis and Design of Starlink-like Satellite Constellation. ScienceDirect, 2024. – аналіз особливостей констеляції Starlink та пропозиції щодо проектування подібних систем.

9. Batagelj, B. Starlink Satellite Communications Network. ResearchGate, 2024. – огляд технічних характеристик мережі Starlink, розробленої SpaceX.
10. Chen, N. Network-Layer Perspectives on Satellite–Terrestrial Integrated Networks. ScienceDirect, 2025. – огляд технологій інтегрованих мереж супутниково-terrestrial, зокрема Starlink.
11. Hillebrand, M. Navigating Starlink's Impact on Global Connectivity and Governance. SMU Scholar, 2025. – дослідження впливу Starlink на глобальну доступність та управління телекомунікаціями.
12. Batagelj, B. Starlink Satellite Communications Network. ResearchGate, 2024. – технічний аналіз мережі Starlink, включаючи характеристики супутників та наземних станцій.
13. Chen, Y. The Concept, Technical Architecture, Applications and Future Trends of Satellite Internet. ScienceDirect, 2024. – огляд архітектури супутникових мереж та їхнього впливу на глобальні телекомунікації.
14. Musk, L. Satellite Network by Leo Musk, AI. Barnes & Noble, 2024. – аналіз основних компонентів системи Starlink та їхнього впливу на телекомунікаційні мережі.
15. Batagelj, B. Starlink Satellite Communications Network. ResearchGate, 2024. – технічні характеристики та огляд мережі Starlink, розробленої компанією SpaceX.
16. Reuters. Ukraine successfully tests Starlink's direct-to-cell technology. Reuters, 2025. – опис успішного тестування технології Starlink Direct-to-Cell в Україні.
17. Tom's Hardware. Ukraine to become first European country with Starlink direct to cell service. Tom's Hardware, 2025. – інформація про запуск послуг Starlink Direct-to-Cell в Україні.
18. The Verge. Starlink's satellite internet is back online after a massive outage. The Verge, 2025. – звіт про відновлення роботи інтернет-сервісу Starlink після великої аварії.

19. AP News. Musk's SpaceX spends $17 billion to acquire spectrum licenses from EchoStar. AP News, 2025. – новини про придбання спектральних ліцензій компанією SpaceX для розширення мережі Starlink.
20. New York Post. Elon Musk's SpaceX to pay $17B to EchoStar for wireless licenses to boost Starlink network. New York Post, 2025. – подробиці угоди між SpaceX та EchoStar щодо ліцензій на бездротові спектри.
21. Times of India. Elon Musk announces Starlink breakthrough: Phones to connect directly to satellites in 2 years. Times of India, 2025. – анонс про можливість прямого з'єднання мобільних телефонів з супутниками через Starlink.
22. Space.com. Starlink satellites: Facts, tracking and impact on astronomy. Space.com, 2025. – інформація про супутники Starlink, їхнє відстеження та вплив на астрономію.
23. GoOver. The Impact of SpaceX's Starlink: Bridging Global Connectivity. GoOver, 2025. – аналіз впливу Starlink на глобальну доступність інтернету.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ СУПУТНИКОВОЇ МЕРЕЖІ STARLINK ТА ЇЇ ВПЛИВ НА РОЗВИТОК ГЛОБАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

ВИКОНАВ:
СТУДЕНТ ГРУПИ ТСДМ-61
ВЯЧЕСЛАВ ЄРКІН

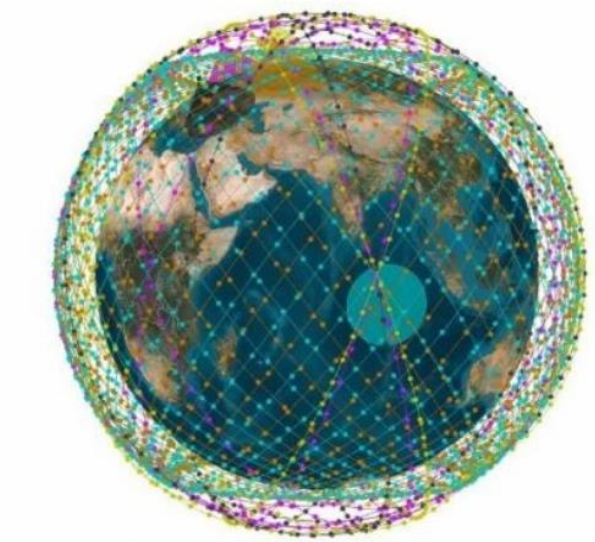
МЕТА РОБОТИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ

- Мета роботи – комплексний аналіз архітектури супутникової мережі Starlink, оцінка її технічних рішень, структури космічного та наземного сегментів, а також виявлення особливостей та перспектив використання системи для розвитку глобальних телекомунікаційних мереж.
- Об’єкт дослідження – супутникова телекомунікаційна система Starlink як глобальна інфраструктура на основі низькоорбітальних супутників.
- Предмет дослідження – технічні, архітектурні, організаційні та експлуатаційні особливості побудови та функціонування мережі Starlink, включаючи орбітальне угруповання, антенні системи, канали зв’язку та взаємодію космічного і наземного сегментів.

Актуальність.

- Глобальна цифровізація потребує доступного високошвидкісного Інтернету навіть у віддалених регіонах, де наземні мережі є дорогими або технічно неможливими. Це поглиблює «цифровий розрив» і обмежує розвиток економік та критичної інфраструктури. Супутникова мережа Starlink, побудована на низькоорбітальних супутниках із малою затримкою сигналу, пропонує принципово новий підхід до глобального покриття. Її архітектура, міжсупутникові лазерні канали та масштабність роблять Starlink ключовою технологією нового покоління. Дослідження системи є важливим для розвитку сучасних телекомунікацій та оцінки перспектив глобальних мереж LEO.

СКЛАД УГРУПОВАННЯ STARLINK



Приблизне моделювання системи із 4425 супутників



Остаточний варіант супутникової системи. 72 орбітальні площини з нахилом 53 градуси по 22 супутники в кожній на висоті 550 кілометрів

Параметри мережі із 4425 супутників

Висота орбіти, км	Нахил орбіти, градусів	Кількість орбіт/площин з даним нахилом	Кількість супутників у кожній площині
1150	53	32	50
1110	53,8	32	50
1130	74	8	50
1275	81	5	75
1325	70	6	75

Параметри угруповання VLEO

Параметр	1-й блок	2-й блок	3-й блок
Кількість супутників на орбіті	2 547	2 478	2 493
Висота орбіти, км	345,6	340,8	335,9
Нахил орбіти, град.	53	48	42

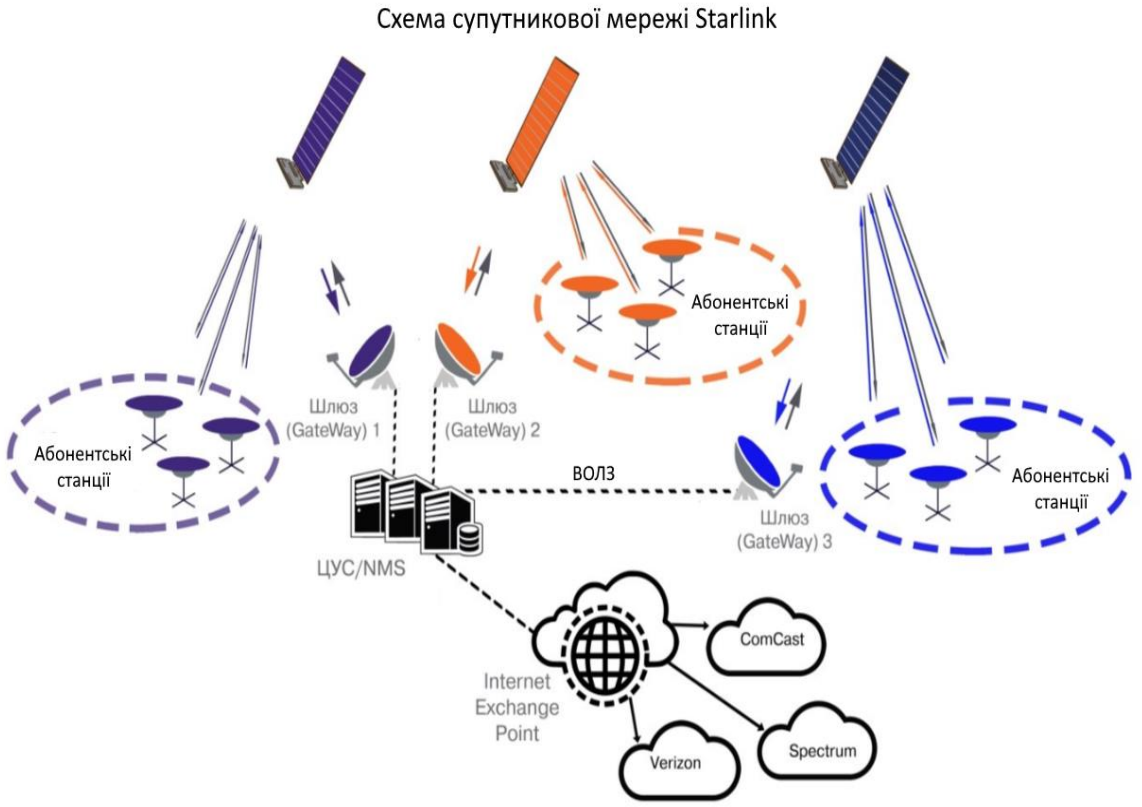
Starlink від SpaceX розгортається поетапно й складається з кількох низькоорбітальних систем. У 2016 році компанія подала заявку до FCC на угруповання з 4425 супутників, яку схвалили у 2018 році. Пізніше SpaceX знизила орбіту до 550 км, щоб зменшити затримку й підвищити безпеку. У 2020 році була подана оновлена заявка: 72 площини по 22 супутники. Саме ця конфігурація стала основою першого етапу мережі Starlink.

Склад угруповання, згідно з останньою заявкою SpaceX в FCC

Кількість орбіт з даним нахилом	72	72	36	6	4
Кількість супутників в кожній площині	22	22	20	58	43
Висота орбіти, км	550	540	570	560	560
Нахиг, град.	53	53,2	70	97,6	97,6

АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ STARLINK

- Архітектура Starlink поєднує космічний та наземний сегменти, забезпечуючи глобальний високошвидкісний інтернет. Космічний сегмент складається з тисяч супутників на орбіті 550 км, розташованих у багатьох площинах для повного перекриття зон видимості. Лазерні міжсупутникові лінки дозволяють передавати дані без участі наземних станцій, зменшуючи затримки та підвищуючи маршрутну ефективність.
- Наземний сегмент включає центр управління мережею, шлюзові станції та абонентські термінали з фазованими антенами. Інфраструктура маршрутизації базується на мережах Google та автономних системах SpaceX (AS14593, AS27277). Трафік передається через ключові точки обміну в США та Європі. Така інтеграція забезпечує стабільність, масштабованість і глобальний доступ до інтернету навіть у віддалених регіонах.

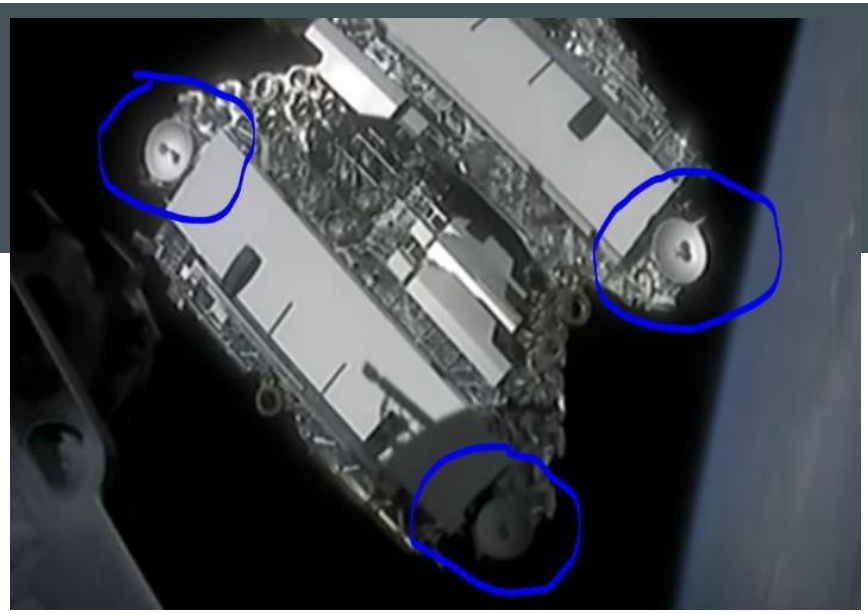


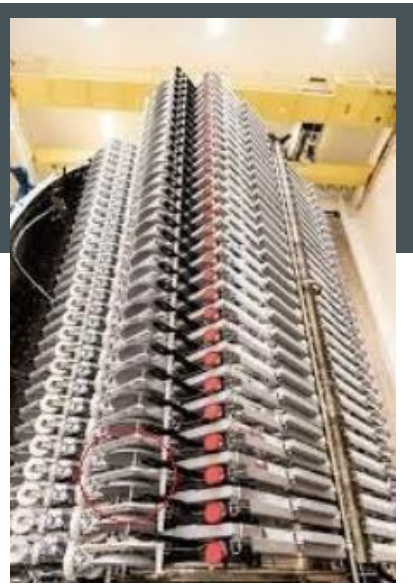
АПАРАТНА ЧАСТИНА

Супутники Starlink спроєктовані для масового запуску — по 60 апаратів у двох стопках під обтічником Falcon 9. Габарити одного супутника становлять приблизно 3,2 × 1,6 × 0,2 м. Після виходу на орбіту ~280 км апарати розгортають сонячні панелі та проходять перевірку, а потім за допомогою електроракетних двигунів на криптоні піднімаються на робочу орбіту 550 км.

Сонячні батареї площею ~26 м² генерують до 6 кВт потужності. ЕРД забезпечують орбітальний підйом, утримання супутника та його контрольоване зниження наприкінці ресурсу.

Корисне навантаження включає параболічні антени Ka-діапазону для зв'язку з гейтвеями та фазовані решітки Ku-діапазону для роботи з абонентськими терміналами. Максимальна пропускна здатність сягає 4200 МГц у напрямку «гейтвей → супутник» та 2600 МГц у зворотному напрямку. Додаткові канали телеметрії забезпечують керування та моніторинг роботи апарата.





Супутники Starlink в момент відокремлення від другого ступеня ракети Falcon 9

Характеристики пропускної здатності

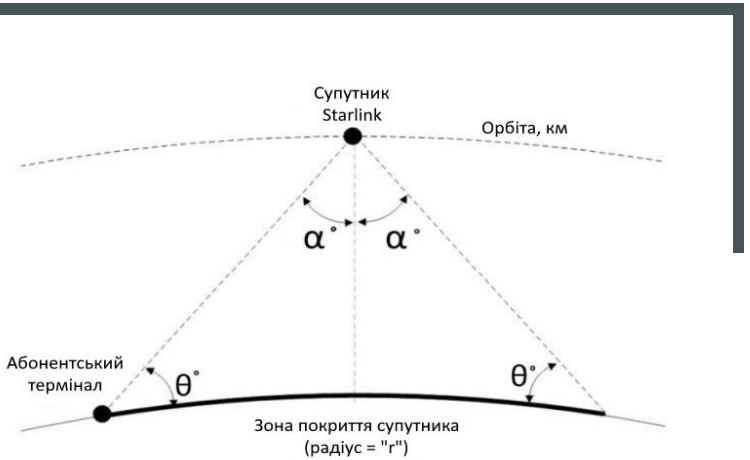
Тип каналу зв'язку	Діапазон частот, ГГц	Дотупно МГц в одній поляризації
Послуга: Вниз на абонентський термінал	10,7 – 12,7	2000
Послуга: Вниз на гейтвей	17,8 – 18,6	800
	18,8 – 19,3	500
Послуга: Вверх від абонентського пристрою	14,0 – 14,5	500
Послуга: Вверх від гейтвея	27,5 – 29,1	1600
	29,5 – 30,0	500
Телеметрія та керування донизу	12,15 – 12,25	100
	18,55 – 18,60	50
Телеметрія та керування доверху	13,85 – 14,00	150

РЕТРАНСЛЯЦІЯ СИГНАЛУ

Супутники Starlink працюють як ретранслятори: вони лише змінюють частоту та підсилюють сигнал без складної обробки даних. Перші моделі не мають міжсупутникових лінків і взаємодіють лише з наземними станціями. Управління та телеметрія здійснюються через систему TT&C, з якої кожен супутник надсилає близько 10 ГБ даних на добу.

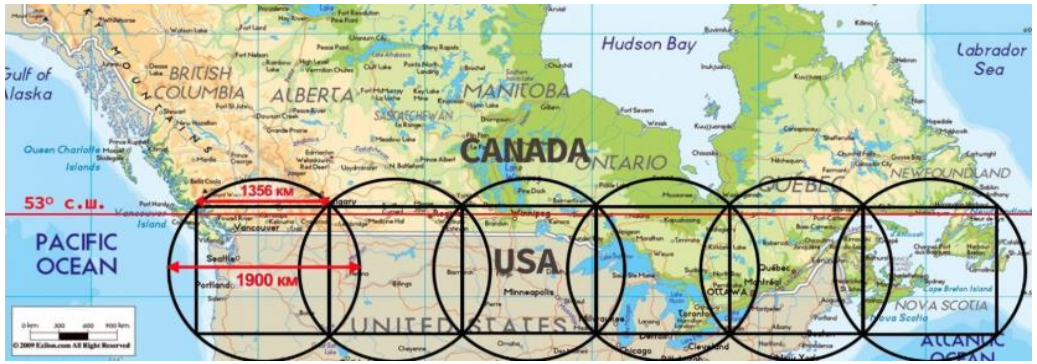
На борту встановлено ~70 процесорів і ~10 мікроконтролерів під Linux для контролю всіх систем. На орбіті 550 км один супутник покриває зону радіусом ~950 км при куті місця 25°. Оцінки показують, що для покриття Землі між ±50° потрібно приблизно 164 супутники, враховуючи перекриття зон видимості.

Радіус зони видимості супутника під кутом 25 градусів залежно від його висоти



Параметри зони покриття

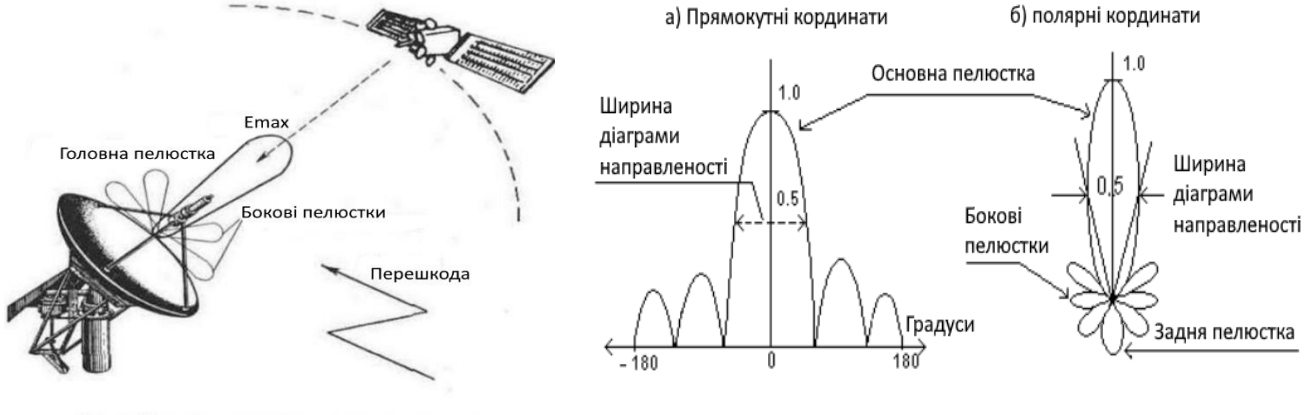
Орбіта «a», км	540	560	570
Макс. кут відхилення α, °	56,7	56,4	56,3
Зона покриття «r», км	926,8	954,6	968,4

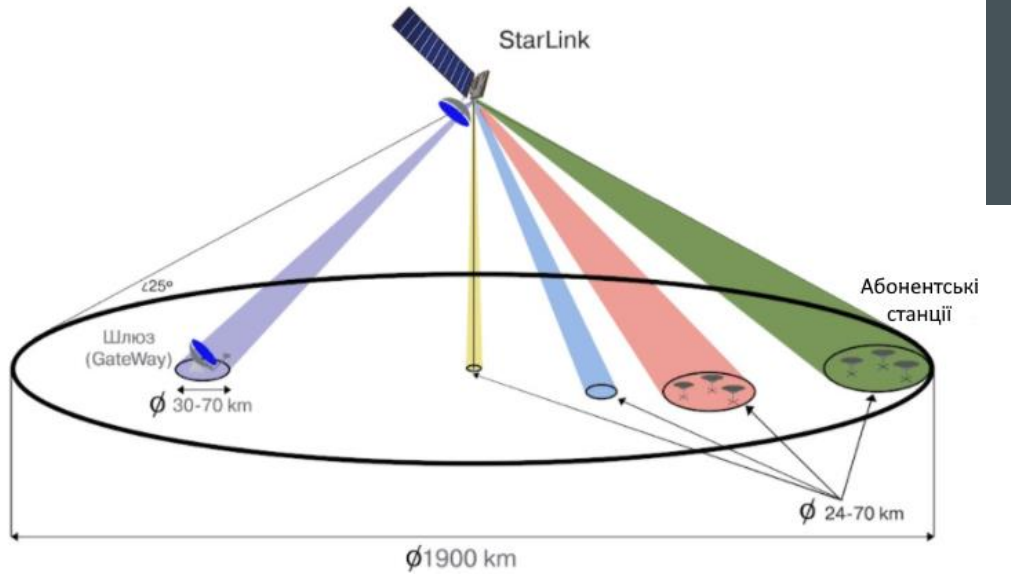


Оцінка масштабу необхідної архітектури

ШТУЧНІ СУПУТНИКИ ЗЕМЛІ

Діаграма направленості





Діаметр зони видимості ШСЗ з кутом місця до 25 градусів при висоті ШСЗ 550 км становить приблизно 1900 км

- Діаграма спрямованості антени визначає, куди концентрується енергія сигналу та яку площу покриває супутник. Чим більший діаметр антени та вищий КВП, тим вужчий і потужніший головний пелюсток. Для Starlink такий промінь має діаметр приблизно 24–45 км у надирі та до 80 км на периферії.
- Супутник може формувати сотні променів, але через частотні обмеження одночасно працює близько 16. Це компенсується надшвидким електронним «стрибанням» променя кожні 5 мкс, що створює ефект суцільного покриття та дозволяє обслуговувати багато користувачів.
- Менша кількість зон на один промінь дає вищу швидкість і нижчу затримку. Велика кількість супутників забезпечує безперервне покриття, а кожен апарат служить близько 5 років і згорає після завершення ресурсу. SpaceX виробляє до 120 супутників щомісяця.

Розрахована кількість променів на супутнику

Кут місця, градуси	Діаметр зони променя, км	Площа зони променя, км²	Кількість променів для повного покриття зони	Ефективна площа антени, м²
80	40	1 257	2 256	0,178
70	50	1 964	1 444	0,170
60	60	2 827	1 003	0,157
50	80	5 027	564	0,138
40	130	13 273	214	0,116

ПРОПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ МЕРЕЖІ STARLINK ТА ПРОГРАМА RURAL DIGITAL OPPORTUNITY FUND

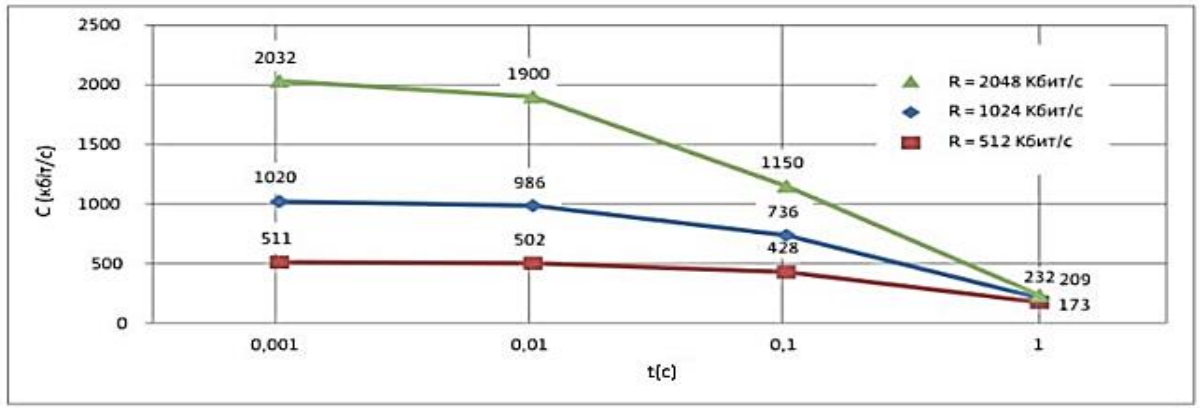
- За даними SpaceX, пропускна здатність одного супутника Starlink становить приблизно 16–20 Гбіт/с. У Ка-діапазоні лінія «Земля → супутник» може забезпечувати до 20 Гбіт/с, тоді як у Ку-діапазоні «супутник → абонент» сучасні термінали працюють на рівні близько 6 Гбіт/с. Це дозволяє одному супутнику обслуговувати 1500–2000 абонентів, а з тарифними обмеженнями — до 3000–4000.
- Надання інтернету в сільській місцевості є економічно невигідним без державної підтримки, тому в США діє програма RDOF — грант на $16 млрд для розвитку доступу в регіонах зі швидкістю нижче 25 Мбіт/с. Оператори отримують фінансування за умови виконання вимог щодо покриття та затримки (менше 100 мс). Супутникові системи LEO, зокрема Starlink, добре підходять для таких територій завдяки низькій затримці та простоті розгортання інфраструктури. На відміну від ГСО-систем ViaSat і Hughes, Starlink може відповідати критеріям RDOF і конкурувати за гранти, забезпечуючи швидкісний інтернет у віддалених регіонах.

Performance Tier	Speed	Usage Allowance	Weight
Minimum	≥ 25/3 Mbps	≥ 250 GB or U.S. average, whichever is higher	50
Baseline	≥ 50/5 Mbps	≥ 250 GB or U.S. median, whichever is higher	35
Above Baseline	≥ 100/20 Mbps	≥ 2 TB	20
Gigabit	≥ 1 Gbps/500 Mbps	≥ 2 TB	0

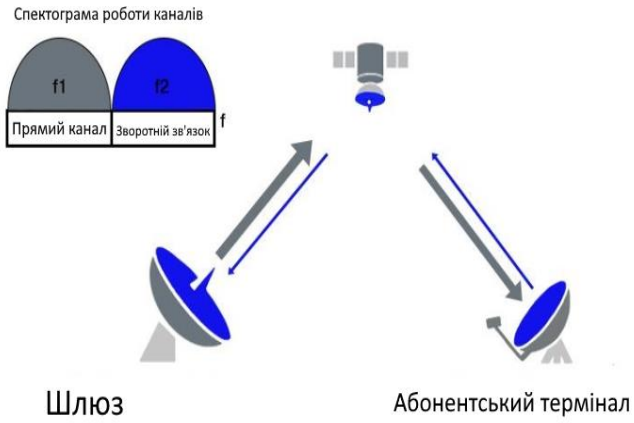
Система оцінки

ЗАТРИМКА У МЕРЕЖІ SPACEX

- Затримка є ключовим показником роботи супутникових мереж. У геостаціонарних системах вона сягає 600–800 мс, що обмежує роботу VPN, відеоконференцій та онлайн-ігор. У мережах LEO, таких як Starlink, затримка зменшується до 20–40 мс завдяки низькій орбіті, що забезпечує якісний інтернет у реальному часі.
- Під час бета-тестування 2020 року 95% вимірювань показали затримку менше 42 мс, що відповідає вимогам програми RDOF.
- Методи доступу до спектра включають виділені канали та груповий доступ. Перший простий, але неефективний; групові методи TDMA/FDMA значно краще використовують ресурс і дозволяють масштабувати мережу. Хоча вони складніші, саме вони забезпечують гнучкий розподіл пропускної здатності та стабільну роботу Starlink.



Швидкість передачі інформації IP протоколу залежно від часу затримки для каналів різної пропускної спроможності



Спектрограма використання частотного ресурсу як виділеного каналу типу SCPC – Single Channel per Carrier

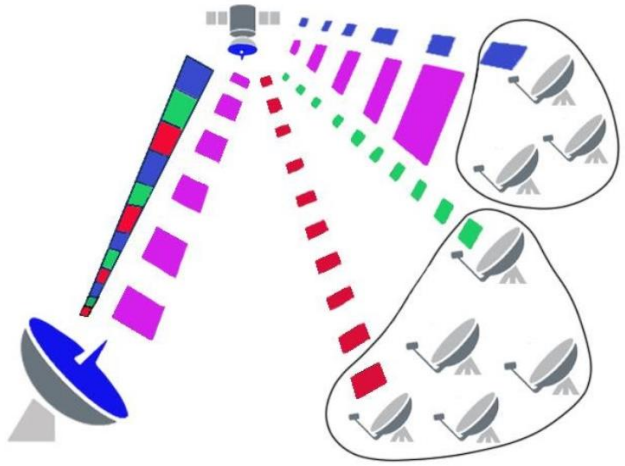
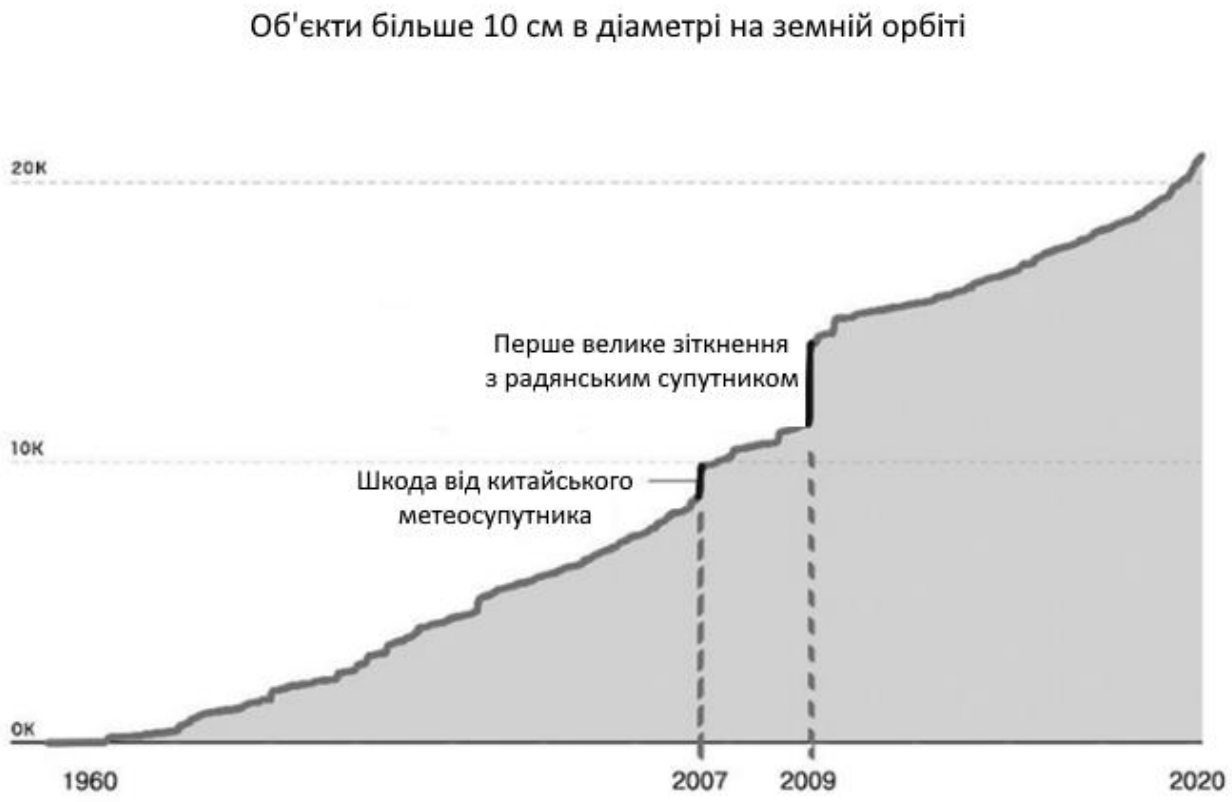


Схема доступу до частотного ресурсу супутника під час використання групового доступу TDM/TDMA

ПРОБЛЕМА КОСМІЧНОГО СМІТТЯ

- Проблема космічного сміття загострилася після кількох інцидентів, що спричинили появу тисяч небезпечних уламків на низьких орбітах.
- 11 січня 2007 року Китай знищив супутник FY-1C, утворивши понад 2300 уламків. У 2009 році сталося перше зіткнення двох апаратів — «Космос-2251» та Iridium-33, що додало близько 600 фрагментів. Ці події показали реальні масштаби загрози для космічних систем.
- Після подання SpaceX заявок на створення угруповання з тисяч супутників питання безпеки орбіт набуло особливої важливості. Одним із рішень стало зниження робочої орбіти Starlink з 1100 км до 550 км, що забезпечує їх гарантоване сходження й повне згоряння в атмосфері приблизно за 5 років, суттєво зменшуючи ризик довготривалого космічного сміття.



РОЗРАХУНКОВИЙ ТЕРМІН СЛУЖБИ СУПУТНИКА STARLINK

- Розрахунковий термін служби супутника Starlink на орбіті з нахилом 53° залежить від висоти: на 550 км він становить близько 5 років, тоді як на 1100 км — десятиліття, що підвищує ризик накопичення уламків. Тому вибір низької орбіти є важливою частиною стратегії мінімізації космічного сміття.
- SpaceX також проводить спеціальні розрахунки для оцінки того, які елементи супутника можуть не згоріти в атмосфері та досягти Землі. Оцінюється їхня маса, матеріал та потенційна ударна енергія, що дозволяє прогнозувати рівень небезпеки.
- Після запуску серії Starlink 1.0 конструкцію супутників було змінено так, щоб усі компоненти повністю згорали при вході в атмосферу. Додатково компанія реалізувала програму постійного моніторингу орбіт і запобігання зближенням із космічними об’єктами.
- Комплекс цих заходів дозволяє зменшити ризик утворення космічного сміття та підвищити загальну безпеку космічної інфраструктури.

Нахилення орбіти 53 градуси

Висота орбіти	Термін служби супутника на орбіті
200 км	22 дні
250 км	100 днів
300 км	344 дні
350 км	2,0 роки
400 км	2,9 роки
400 км	5 років
1100 км	>10 років

Складовий елемент	Кількість	Матеріал	Маса (кг)	DCA (кв.м)	Енергія (Дж)
Вал	1	Залізо	1,66	0,47	2733
Частини корпусу	5	Карбід кремнію	1,50	2,79	961
Підшипник	5	Нержавіюча сталь	0,07	2,45	8
Кронштейн	12	Титан	0,03	4,92	6

ВИСНОВКИ

- У роботі проведено комплексне дослідження архітектури супутникової мережі Starlink та її впливу на розвиток глобальних телекомунікацій. Розглянуто структуру космічного та наземного сегментів, особливості низькоорбітального угруповання, застосування фазованих антенних решіток і лазерних міжсупутникових каналів ISL, що забезпечують низькі затримки та глобальне покриття.
- Проаналізовано методи доступу до спектра та їхню роль у масштабованості мережі. Значну увагу приділено безпеці польотів і проблемі космічного сміття, що стало підставою для зниження орбіт і вдосконалення конструкції супутників Starlink.
- Окремо досліджено регуляторні аспекти, включаючи подання заявок до FCC та використання міжнародних юрисдикцій для закріплення орбітальних ресурсів.
- Показано, що Starlink суттєво змінює ринок супутникових комунікацій, стимулює конкуренцію й формує нові стандарти низьколатентного глобального інтернету.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Вячеслав ЄРКІН

Назва: ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ СУПУТНИКОВОЇ МЕРЕЖІ STARLINK ТА ЇЇ ВПЛИВ НА РОЗВИТОК ГЛОБАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Координатор: Юрій МЕЛЬНИК

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:11.6

Коефіцієнт подібності 2:3.5

Тривога: 4

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*