

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ-систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

ПРОЕКТУВАННЯ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ СТАРЛІНК

DESIGNING THE STARLINK SATELLITE SYSTEM

спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ТК-41

Сургасв Євгеній Геннадійович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Селепина Йосип Романович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«_____» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Євсюк Микола Миколайович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

АННОТАЦІЯ

Сургаєв Є. Г. Проектування супутникової системи Старлінк. Рукопис. Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Телекомунікації та радіотехніка» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. У роботі досліджено архітектуру, принципи функціонування та перспективи розвитку глобальної супутникової системи зв'язку Starlink. Проаналізовано особливості формування зон покриття, організації абонентських і фідерних каналів зв'язку. Розглянуто технічні характеристики супутників, абонентських терміналів і наземної інфраструктури системи. Окрему увагу приділено питанням пропускнуої здатності мережі.

Ключові слова: Starlink, супутниковий зв'язок, низькоорбітальні супутники, фазовані антенні решітки, абонентський термінал, шлюзова станція.

ABSTRACT

Surhaiev Ye. Design of the Starlink Satellite System. Manuscript. Bachelor's Qualification Thesis in the Educational Program «Telecommunications and Radio Engineering», Specialty 172 Electronic Communications and Radio Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's qualification thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, and a list of references. The thesis investigates the architecture, operating principles, and development prospects of the Starlink global satellite communication system developed by SpaceX. The study analyzes the characteristics of coverage area formation, as well as the organization of user and feeder communication links. The technical characteristics of modern satellites, user terminals, and the ground infrastructure of the system are examined. Particular attention is paid to issues related to network capacity and performance.

Keywords: Starlink, Satellite Communications, Low Earth Orbit (LEO) Satellites, Phased Array Antennas, User Terminal, Gateway Station.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ STARLINK	8
1.1 Аналіз структури і принципу роботи системи Starlink	8
1.2 Опис супутникової платформи Starlink і її пристроїв	12
1.3 Система передачі даних Starlink	18
РОЗДІЛ 2 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПРОЄКТУВАННЯ І	
РОЗГОРТАННЯ ССЗ STARLINK	21
2.1 Створення інфраструктури Starlink SCS: поетапний аналіз та	
ретроспектива розвитку.....	21
2.2 Характеристики орбітального покриття та механізми керування	
променями в системі Starlink	28
2.3 Перешкоди на шляху використання ССЗ Starlink	38
РОЗДІЛ 3 НАЗЕМНІ ПРИСТРОЇ STARLINK	43
3.1 Наземні технічні пристрої системи Starlin	43
3.2 Характеристики та еволюція абонентських терміналів Starlink	44
3.3 Наземна інфраструктура Starlink: шлюзові станції.....	49
3.4 Розрахунок основних параметрів starlink.....	58
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	63
4.1 Загальна характеристика небезпечних чинників при роботі з	
системою широкосмугового бездротового доступу	63
4.2 Забезпечення безпеки під час роботи з системою	
широкосмугового бездротового доступу	65
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

Актуальність теми. Умови сучасного цифрового розвитку суспільства зумовлюють постійне зростання потреби у високошвидкісному та стабільному доступі до глобальної мережі Інтернет. Незважаючи на стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій, значна кількість користувачів, особливо у віддалених і малозаселених регіонах, досі не має можливості користуватися якісними послугами передачі даних через недостатній рівень розвитку наземної інфраструктури зв'язку.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є впровадження супутникових систем нового покоління, серед яких особливе місце займає система Starlink, розроблена компанією SpaceX. Її концепція базується на використанні великого угруповання малих супутників, розташованих на низьких навколоземних орбітах, що забезпечує глобальне покриття та доступ до мережі Інтернет практично в будь-якій точці світу. Порівняно з традиційними геостаціонарними супутниковими мережами, система Starlink характеризується меншими затримками сигналу, підвищеною пропускною здатністю каналів зв'язку та значно ширшою зоною обслуговування користувачів [13].

Об'єктом дослідження є супутникова телекомунікаційна система Starlink.

Предметом дослідження виступають принципи побудови орбітального угруповання супутників, особливості формування та керування діаграмами спрямованості антен, показники спектральної ефективності, а також сучасні технології передачі та обробки інформації, що використовуються в системі Starlink.

Метою дипломної роботи є дослідження технічних характеристик і функціональних можливостей супутникової системи Starlink, оцінювання ефективності її застосування в сучасних телекомунікаційних мережах та визначення перспектив подальшого розвитку і впровадження даної технології на основі комплексного аналізу її архітектурних та експлуатаційних особливостей.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

- проведено аналіз сучасних супутникових систем зв'язку;
- дослідити особливості побудови орбітального угруповання Starlink, принципи формування зон покриття та організації супутникових каналів зв'язку;
- проаналізовано технічні характеристики абонентських терміналів Starlink;
- провести оцінку пропускнуої здатності Starlink;
- розглянути основні питання охорони праці.

Практична цінність – продемонстровано можливості використання системи Starlink у сфері телекомунікацій, особливо за умови забезпечення доступу до Інтернету у віддалених регіонах, організації зв'язку у надзвичайних ситуаціях, інтеграції з мобільними пристроями.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ STARLINK

1.1 Аналіз структури і принципу роботи системи Starlink

Starlink являє собою сучасну супутникову телекомунікаційну систему, створену компанією SpaceX з метою забезпечення глобального доступу до мережі Інтернет. На відміну від традиційних супутникових мереж, що базуються на використанні обмеженої кількості геостаціонарних космічних апаратів, архітектура Starlink передбачає формування масштабного орбітального угруповання з тисяч малих супутників, розташованих на низьких навколоземних орбітах. Такий підхід забезпечує суттєве зменшення затримки передачі даних та підвищення пропускної здатності каналів зв'язку, що дозволяє покращити якість супутникового доступу до Інтернету та наблизити його характеристики до показників сучасних наземних мереж [13].

Концепція функціонування системи базується на створенні глобальної мережі супутників, які здійснюють рух на орбітах висотою близько 480–550 км над поверхнею Землі. Передавання інформації між користувачами та наземною інфраструктурою здійснюється за допомогою радіоканалів Ku- та Ka-діапазонів. Одним із перспективних напрямів розвитку системи є використання лазерних міжсупутникових ліній зв'язку, які забезпечують безпосередній обмін даними між супутниками без залучення наземних ретрансляційних станцій.

Абонентський термінал Starlink побудований на основі фазованої антенної решітки, що забезпечує автоматичне наведення на доступний супутник. Використання такої технології дає можливість оперативно змінювати напрямок передачі сигналу без застосування механічних приводів, гарантуючи стабільність з'єднання. Конструкція терміналів адаптована до експлуатації в різних кліматичних умовах та допускає встановлення як на стаціонарних об'єктах, так і на транспортних засобах, повітряних суднах та морських платформах [1].

Для організації передачі інформації система (рис. 1.1) використовує інтелектуальні алгоритми маршрутизації, які забезпечують вибір оптимального

маршруту проходження пакетів даних. Оскільки супутники постійно переміщуються відносно поверхні Землі, з'єднання динамічно передається між сусідніми апаратами, формуючи єдину мережеву структуру. Такий механізм сприяє рівномірному розподілу навантаження між елементами системи та підвищує її стійкість до можливих відмов окремих вузлів.

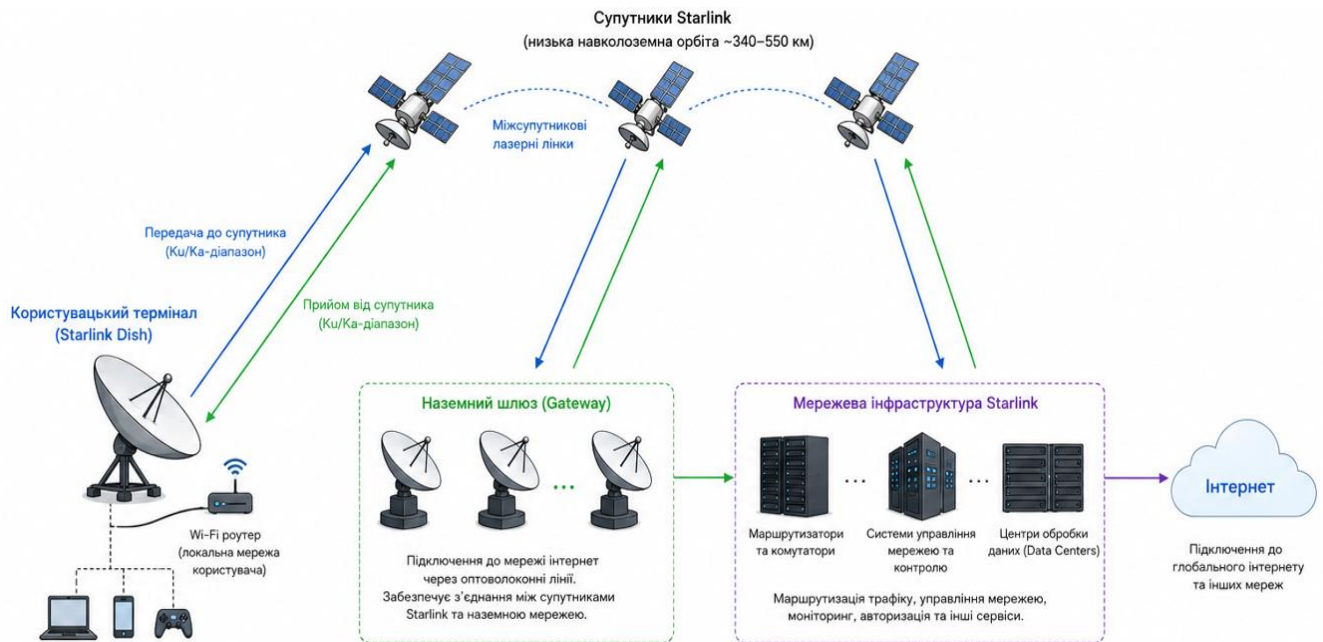


Рисунок 1.1 – Схема супутникового зв'язку Starlink [11]

Розташування супутників на низьких навколоземних орбітах дозволяє досягти затримки сигналу на рівні 20–50 мс, що є значно меншим показником порівняно з традиційними геостаціонарними системами супутникового зв'язку. Завдяки цьому мережа придатна не лише для звичайного доступу до Інтернету, а й для сервісів реального часу, таких як відеоконференції, інтерактивні онлайн-ігри, потокова передача мультимедійного контенту та використання хмарних технологій.

Розгортання супутникового угруповання відбувається поступово шляхом регулярних запусків нових космічних апаратів за допомогою ракет-носіїв Falcon 9. Така стратегія дозволяє послідовно розширювати зону покриття та підвищувати якість обслуговування користувачів. За проєктними оцінками, загальна кількість супутників у перспективі може перевищити 15 тисяч одиниць, що забезпечить високошвидкісний доступ до мережі навіть у

найвіддаленіших районах світу [6].

Одним із головних завдань системи Starlink є подолання цифрової нерівності шляхом забезпечення якісним інтернет-зв'язком регіонів із недостатньо розвиненою телекомунікаційною інфраструктурою. Крім цивільного сектору, система активно застосовується у військовій сфері, наукових дослідженнях, гуманітарних місіях та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Її використання дозволяє підтримувати комунікацію в умовах воєнних дій, природних катастроф або пошкодження наземних мереж зв'язку. Подальший розвиток системи спрямований на підвищення пропускної здатності каналів, вдосконалення енергетичної ефективності супутників та інтеграцію з мобільними мережами нового покоління.

На сьогодні орбітальне угруповання Starlink налічує понад десять тисяч супутників, розташованих на низьких навколоземних орбітах. На відміну від геостаціонарних супутників, які функціонують на висоті близько 35 786 км, апарати Starlink переміщуються з високою орбітальною швидкістю та забезпечують безперервне передавання інформації між елементами мережі. Низька висота орбіти сприяє зменшенню часових затримок і підвищенню якості обслуговування користувачів. Космічні апарати (рис. 1.2) обладнані фазованими антенними системами та лазерними міжсупутниковими терміналами, що дозволяють реалізовувати передачу даних безпосередньо між супутниками та зменшувати залежність від наземної інфраструктури.

У відкритих джерелах відсутня повна інформація щодо конфігурації та розташування всіх наземних станцій мережі. Варто зазначити, що підключення до системи Starlink безпосередньо за допомогою стандартного мобільного телефону наразі є обмеженим і вимагає використання спеціалізованого абонентського обладнання. Наземні станції виконують функцію проміжної ланки між глобальною мережею Інтернет та супутниковим сегментом системи. Вони представлені високопродуктивними антенними комплексами, інтегрованими з магістральними мережами передачі даних, через які здійснюється маршрутизація інформаційних потоків. На початковому етапі функціонування системи більшість трафіку проходила через наземні шлюзи,

проте впровадження лазерних міжсупутникових каналів дозволило значно скоротити залежність від таких станцій.



Рисунок 1.2 – Телекомунікаційний супутник Starlink [13]

Абонентські термінали (АТ) Starlink призначені для автоматизованого підключення користувачів до супутникової мережі та характеризуються високим рівнем автономності. Вбудовані фазовані антени забезпечують автоматичний вибір оптимального супутника для підтримання стабільного зв'язку. Після підключення до маршрутизатора користувач отримує доступ до широкосмугового Інтернету зі швидкістю, яка може досягати кількох сотень мегабіт за секунду.

Конструкція обладнання забезпечує його працездатність у широкому діапазоні температур, за наявності опадів, сильного вітру та інших несприятливих погодних факторів. Координація взаємодії між супутниками, наземними станціями та абонентськими терміналами здійснюється за допомогою сучасних алгоритмів керування трафіком, що дозволяє мінімізувати втрати пакетів і забезпечити високу якість передачі інформації.

Таким чином, система Starlink реалізує масштабовану та відмовостійку архітектуру супутникового зв'язку, яка забезпечує надійний широкосмуговий доступ до мережі Інтернет незалежно від розташування користувача.

1.2 Опис супутникової платформи Starlink і її пристроїв

Супутникові апарати Starlink спроектовані з урахуванням принципів серійного виробництва та мінімізації вартості виготовлення, що забезпечує можливість одночасного виведення на орбіту великої кількості космічних апаратів. Під час одного запуску ракети-носія Falcon 9 на орбіту доставляється до 60 супутників, які після відокремлення формують дві групи по 30 одиниць (рис. 1.3). Конструктивно супутник має плоску прямокутну форму з орієнтовними габаритами $3,2 \times 1,6 \times 0,2$ м.

Система енергозабезпечення супутника базується на використанні розкладних сонячних батарей (рис. 1.3), що складаються з дванадцяти секцій. У транспортному положенні панелі складаються компактно вздовж корпусу апарата. Довжина кожного сегмента відповідає ширині супутника та становить приблизно 3,2 м, тоді як розміри окремої панелі складають близько $3 \times 0,8$ м. Сумарна площа фотоелектричних елементів досягає приблизно 288 м^2 [5].

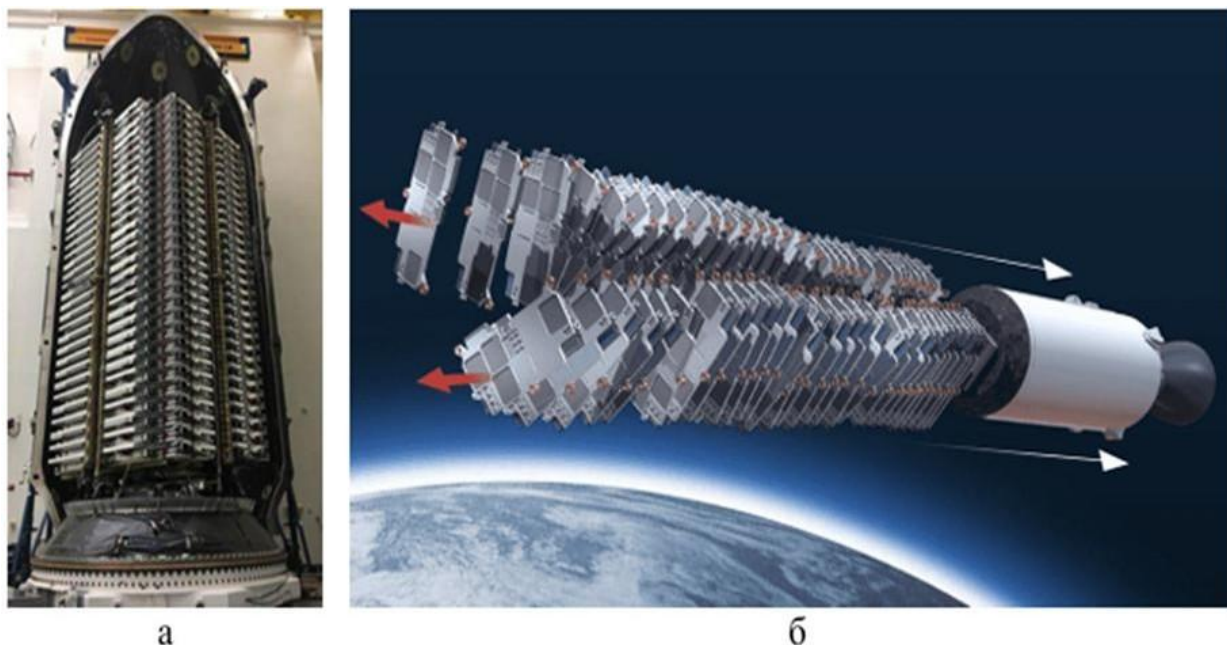


Рисунок 1.3 – Сонячні панелі супутників [13]

За оцінками, за умови коефіцієнта використання активної площі близько 0,9, середньої сонячної радіації 1300 Вт/м^2 та коефіцієнта корисної дії фотоелементів на рівні 20 %, максимальна генерована потужність одного

супутника може становити близько 6 кВт. Реальна величина виробленої енергії залежить від просторової орієнтації панелей відносно Сонця та режимів роботи супутника. Найвища ефективність досягається при нормальному падінні сонячного випромінювання на поверхню фотоелементів [15].

Для виконання орбітальних маневрів та підтримання необхідних параметрів польоту використовуються електрореактивні двигуни Холла (рис. 1.4). Як робоче тіло в цих установках застосовується криптон. Подібні рушійні системи характеризуються споживаною потужністю близько 1,5 кВт, тягою порядку 100 мН та питомим імпульсом у межах 1700–1800 с.

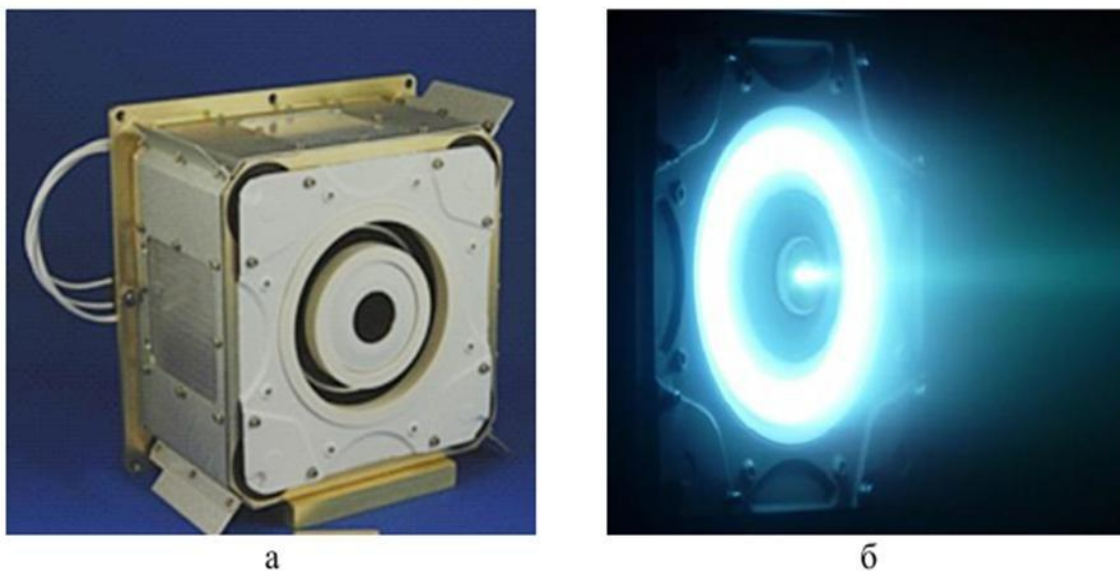


Рисунок 1.4 – Вигляд двигуна Starlink 1.0 та 1.5 [15]

Після відокремлення від ракети-носія супутники виконують поступове підняття до робочої орбіти. Для досягнення необхідних орбітальних параметрів апарату потрібно забезпечити приріст швидкості приблизно 200 м/с. Тривалість виходу на штатну орбіту зазвичай становить близько чотирьох місяців.

Розглянемо основні покоління супутників Starlink.

1. Супутники Starlink версії 0.9. Версія 0.9 стала першим етапом практичної реалізації проекту Starlink та використовувалася переважно для випробування технологічних рішень. Запущене у 2019 році угруповання складалося з 60 експериментальних супутників, призначених для перевірки працездатності основних підсистем мережі.

До характерних особливостей апаратів належать:

- маса одного супутника становила близько 227 кг;
- апарати використовувалися як платформа для тестування апаратних та програмних компонентів майбутньої системи;
- конструкція була адаптована для контрольованого сходження з орбіти після завершення експлуатації.

Результати експлуатації даної серії стали основою для створення наступних поколінь Starlink 1.0 та Starlink 1.5 [18].

Особливістю конструкції було те, що понад 95 % маси супутника згорало в атмосфері під час контрольованого входження в щільні шари атмосфери.

Поточний стан: усі супутники цієї серії завершили експлуатацію та були зведені з орбіти.

2. Starlink 1.0. Версія 1.0 стала першим поколінням серійних супутників, що використовувалися для формування початкового орбітального угруповання. Їх запуск здійснювався в період з листопада 2019 року по червень 2021 року.

Основні характеристики апаратів:

- маса супутника становить близько 260 кг;
- підтримується робота в Ku- та Ka-діапазонах частот;
- орієнтовний термін експлуатації складає від 5 до 10 років;
- для визначення орбітального положення застосовується система Star Tracker у поєднанні із супутниковою навігацією GPS.

Для запобігання можливим зіткненням із космічними об'єктами система інтегрована з міжнародними базами орбітального моніторингу. Після завершення життєвого циклу супутники виконують контрольоване сходження з орбіти та повністю згорають в атмосфері.

На окремих апаратах застосовувалися спеціальні екрани для зменшення відбиття сонячного світла, проте від цього рішення згодом відмовилися через негативний вплив на тепловий режим супутника.

Поточний стан: значна частина супутників продовжує функціонувати, хоча поступово замінюється сучаснішими модифікаціями.

3. Starlink 1.5. Супутники Starlink 1.5 стали подальшим розвитком

першого покоління та використовувалися під час розширення орбітального угруповання. Їх запуск тривав із 2020 по 2021 рік.

Головною особливістю цієї модифікації стало впровадження лазерних міжсупутникових каналів зв'язку, що дозволило передавати інформацію між апаратами без залучення наземних ретрансляторів.

Обчислювальна система одного супутника включає близько 70 спеціалізованих процесорів та понад десять мікроконтролерів. Керування функціонуванням обладнання здійснюється за допомогою операційної системи Linux [17].

4. Starlink 2.0 – супутники другого покоління. Starlink 2.0 являє собою нове покоління космічних апаратів із підвищеними технічними характеристиками. Основною метою модернізації стало збільшення пропускної здатності мережі, підвищення швидкості передачі даних та забезпечення прямої взаємодії з мобільними пристроями.

Запуск супутників цього покоління розпочався у 2022 році, а з 2023 року на орбіту почали виводитися компактні модифікації Starlink 2.0 Mini.

Компанія SpaceX розробила дві конфігурації даних апаратів. Перша адаптована для запусків ракетою Falcon 9, тоді як друга розрахована на використання перспективного носія Starship і характеризується збільшеними габаритами.

Маса супутників нового покоління сягає 1250 кг. Вони оснащуються лазерними міжсупутниковими каналами зв'язку та підтримують роботу в Ku-, Ka- і E-діапазонах частот [15].

Система формування променів суттєво модернізована: супутники використовують 30 приймальних і 32 передавальні промені, два з яких призначені для службових каналів керування. Такий підхід дозволяє збільшити пропускну здатність мережі у 3–10 разів порівняно з попередніми поколіннями.

Для зниження впливу на астрономічні спостереження зовнішні поверхні апаратів покриваються спеціальними діелектричними матеріалами, що мінімізують відбиття сонячного світла та одночасно забезпечують належний тепловий режим.

Важливим нововведенням стала можливість прямого підключення мобільних пристроїв до супутникової мережі без використання спеціалізованих терміналів.

Основні параметри різних версій наведені на рисунку 1.5.

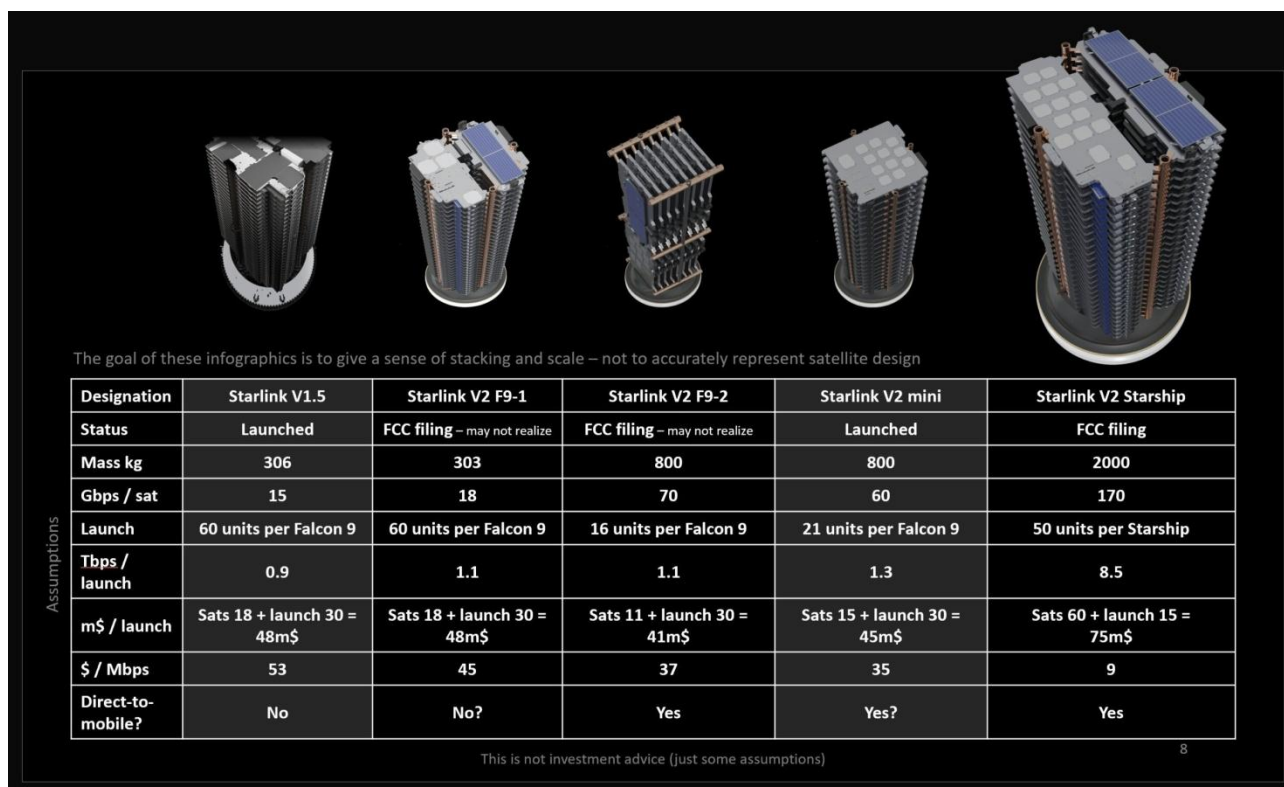


Рисунок 1.5 – Супутники Starlink версії 1.5 та вище [14]

Для підвищення живучості апарати обладнані алюмінієвим захисним екраном товщиною близько 1 мм, який зменшує ризик пошкодження мікрометеоритами та дрібними фрагментами космічного сміття.

Система керування містить резервовані приймачі та дубльовані канали управління, що забезпечують високу відмовостійкість мережі. Імовірність зіткнення з об'єктом розміром понад 1 мм оцінюється як надзвичайно низька.

Після завершення експлуатації супутники автоматично переводяться на орбіту висотою близько 360 км, де протягом кількох місяців входять у щільні шари атмосфери та згорають.

Для організації обслуговування користувачів поверхня Землі умовно поділена на окремі зони покриття діаметром близько 24 км. Площа однієї такої комірки становить приблизно 380 км². За оцінками компанії SpaceX, у межах

однієї комірки одночасно можуть обслуговуватися понад 120 активних абонентів (рис. 1.6).

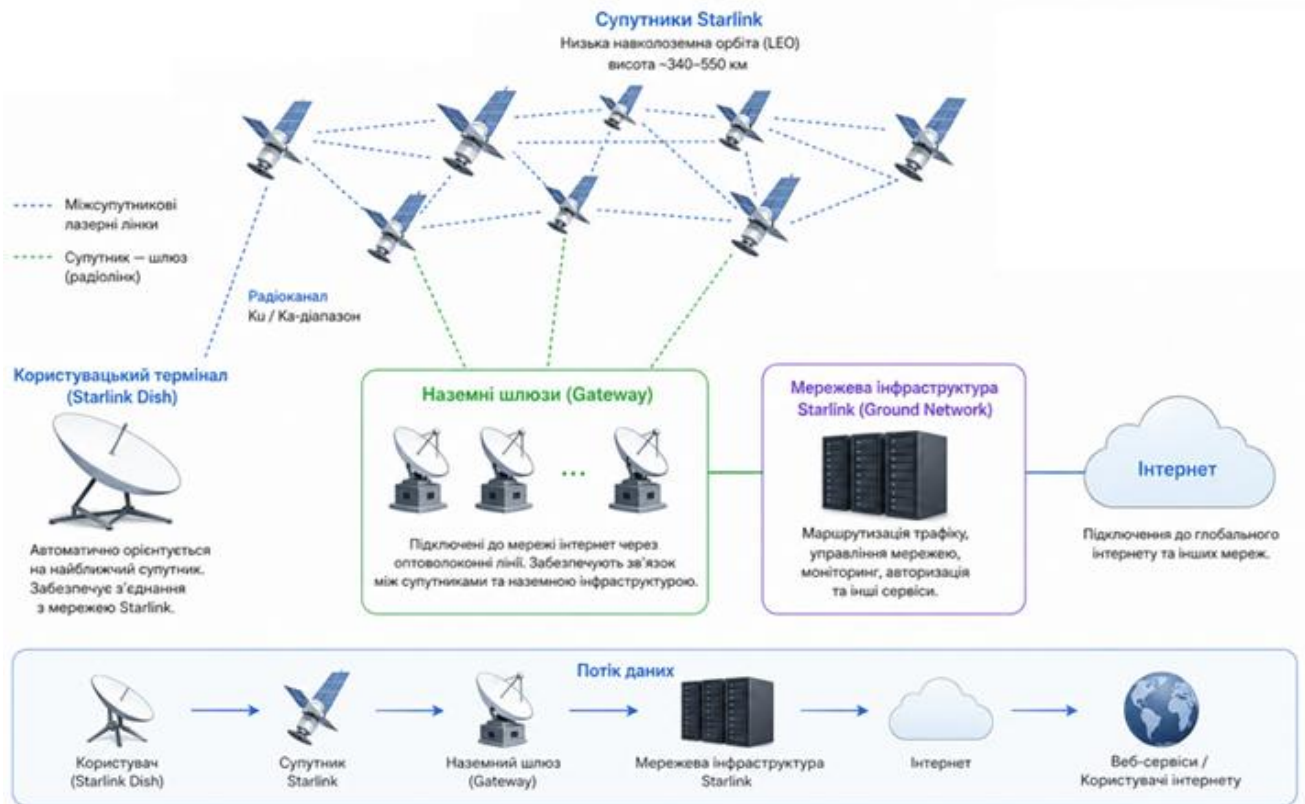


Рисунок 1.6 – Архітектура мережі Starlink [16]

Під час проходження супутника над відповідною зоною обслуговування здійснюється прийом і передача даних від абонентських терміналів до наземних шлюзових станцій. При цьому шлюз не обов'язково розташовується в межах тієї самої комірки, однак повинен перебувати в зоні прямої радіовидимості супутника.

Інтеграція мережі Starlink із глобальною телекомунікаційною інфраструктурою здійснюється через точки присутності (PoP), які з'єднані з магістральними волоконно-оптичними мережами та забезпечують доступ до світової мережі Інтернет. Для передачі трафіку можуть використовуватися як власні канали SpaceX, так і мережі партнерських організацій.

Компанія прагне розміщувати наземні вузли зв'язку максимально близько до точок підключення магістральних мереж, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати та покращити якість передачі даних.

Починаючи з 2025 року система функціонує переважно за схемою прямої ретрансляції, коли інформація від абонентів передається безпосередньо на наземні приймальні комплекси. Разом із тим потенціал бортової обробки сигналів та лазерних міжсупутникових каналів ще не реалізований повною мірою. Подальше розширення функціональних можливостей планується здійснювати шляхом модернізації програмного забезпечення та впровадження нових поколінь космічних апаратів.

1.3 Система передачі даних Starlink

Технології фізичного рівня (модуляція та кодування). Для організації інформаційного обміну між супутниками орбітального угруповання, наземними шлюзовими станціями та абонентськими терміналами в системі Starlink застосовуються сучасні методи цифрової модуляції та кодування сигналів, які забезпечують високу пропускну здатність каналів зв'язку та стійкість до зовнішніх завад.

До основних технологій фізичного рівня належать [12]:

- DVB-S2X (Digital Video Broadcasting – Satellite – Second Generation Extended) – удосконалений стандарт супутникового зв'язку, який використовує механізми адаптивної модуляції та кодування (Adaptive Coding and Modulation, ACM). Такий підхід дає можливість автоматично змінювати параметри передачі відповідно до поточного стану каналу зв'язку, забезпечуючи максимальну ефективність використання спектральних ресурсів;
- QPSK, 16APSK та 64APSK – цифрові методи модуляції, що використовуються залежно від рівня сигналу та умов поширення радіохвиль. Використання складніших схем модуляції дозволяє підвищити обсяг переданої інформації в межах заданої смуги частот, однак вимагає вищого співвідношення сигнал/шум та стабільнішого каналу зв'язку;
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – технологія багаточастотної передачі даних, яка передбачає поділ інформаційного потоку між великою кількістю ортогональних піднесучих. Застосування OFDM

забезпечує підвищену завадостійкість системи та зменшує негативний вплив багатопроменевого поширення сигналів.

Використання сучасних технологій передачі даних та протоколів мережевої взаємодії дозволяє системі Starlink забезпечувати високі показники швидкості обміну інформацією та мінімальні затримки передачі пакетів. Поєднання лазерних міжсупутникових каналів, інтелектуальних алгоритмів маршрутизації та вдосконалених механізмів керування трафіком створює передумови для ефективного функціонування глобальної супутникової мережі.

Важливу роль у забезпеченні високої продуктивності відіграють сучасні транспортні протоколи сімейства TCP/IP, адаптовані до особливостей супутникових каналів зв'язку. Їх застосування дозволяє оптимізувати передачу інформації навіть за умов значної кількості одночасних користувачів та динамічної зміни маршрутів передавання даних.

Для узгодження роботи мережевих компонентів використовуються типові значення міжчастотних інтервалів 15 і 30 кГц, які широко застосовуються в архітектурі Dynamic Spectrum Sharing (DSS). Завдяки цьому забезпечується коректна взаємодія фізичного рівня між технологіями LTE та 5G NR, що сприяє інтеграції супутникових і наземних телекомунікаційних мереж [12].

Окрему увагу під час побудови системи Starlink приділено питанням інформаційної безпеки. Передача даних між абонентськими терміналами, супутниками та наземними вузлами здійснюється із застосуванням сучасних криптографічних механізмів. Для шифрування інформації використовується алгоритм AES-256, який належить до найбільш надійних стандартів симетричного шифрування та забезпечує високий рівень захисту від несанкціонованого доступу.

Додатковий рівень захисту реалізується за рахунок використання протоколів IPSec та TLS, які гарантують автентичність, цілісність і конфіденційність інформації під час передавання через мережу. Завдяки цьому суттєво зменшується ризик перехоплення або модифікації даних сторонніми особами.

Для підтримання стабільної роботи мережі в системі реалізовано

механізм автоматизованого оновлення програмного забезпечення супутників та абонентських терміналів. Такий підхід забезпечує своєчасне усунення виявлених вразливостей, підвищення функціональних можливостей обладнання та адаптацію системи до нових умов експлуатації.

Таким чином, система передачі даних Starlink являє собою комплексну телекомунікаційну платформу, що поєднує високоефективні методи модуляції, сучасні алгоритми маршрутизації, захищені протоколи обміну інформацією та механізми автоматичного керування мережею. Це дозволяє забезпечувати надійний високошвидкісний доступ до мережі Інтернет навіть у регіонах зі слаборозвиненою наземною інфраструктурою зв'язку.

РОЗДІЛ 2

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПРОЄКТУВАННЯ І РОЗГОРТАННЯ ССЗ STARLINK

2.1 Створення інфраструктури Starlink SCS: поетапний аналіз та ретроспектива розвитку

У січні 2015 року компанія SpaceX офіційно анонсувала розроблення проєкту Starlink, головним завданням якого стало забезпечення високошвидкісного та стабільного доступу до мережі Інтернет у регіонах із недостатньо розвиненою або відсутньою телекомунікаційною інфраструктурою. Запропонована концепція передбачала створення глобальної супутникової мережі, здатної забезпечити новий рівень доступності телекомунікаційних послуг у віддалених районах світу. На початковому етапі прогнозувалося, що система зможе обробляти близько 10 % локального інтернет-трафіку та до половини міжнародного й міжміського інформаційного обміну. Водночас вартість абонентського обладнання планувалося утримувати в межах 100–300 доларів США, забезпечуючи конкурентоспроможність послуг для кінцевих користувачів [2, 3].

У листопаді 2016 року, після проведення підготовчих робіт і технічного опрацювання концепції, компанія подала офіційну заявку до Federal Communications Commission (FCC). Цей крок став початком практичної реалізації масштабної супутникової системи доступу до Інтернету. Згідно з початковим проєктом, передбачалося формування орбітального угруповання з 4425 космічних апаратів, які повинні були функціонувати в частотних діапазонах Ku (10,7–12,7 та 14–14,5 ГГц) і Ka (17,8–19,3 та 27,5–30 ГГц) на висотах від 1150 до 1325 км. Розрахункова маса одного супутника становила 386 кг, а початок комерційної експлуатації планувався після введення в експлуатацію перших 800 космічних апаратів.

Для перевірки працездатності ключових технологічних рішень у лютому 2018 року за допомогою ракети-носія Falcon 9 було здійснено запуск двох експериментальних супутників – Tintin-A та Tintin-B. Їх використання

дозволило провести практичне тестування комунікаційних систем та інших елементів майбутньої супутникової мережі.

У квітні 2019 року проєкт зазнав суттєвого коригування. Компанія звернулася до FCC із проханням змінити параметри орбітального розміщення супутників, що було схвалено регулятором. Згідно з оновленою конфігурацією, 1584 апарати повинні були функціонувати на висоті 550 км у 24 орбітальних площинах із нахилом 53° . Основною метою такого рішення стало зменшення затримок передачі даних та підвищення якості телекомунікаційних послуг. Крім того, нова архітектура дозволяла скоротити кількість необхідних супутників, прискорити розгортання мережі та мінімізувати ризики накопичення космічного сміття. У разі втрати керування або відмови рушійної установки супутник мав автоматично знижувати орбіту та повністю згоряти в атмосфері протягом п'яти років. Одночасно було переглянуто загальну кількість апаратів, що працюють у Ka- та Ku-діапазонах, зменшивши її до 4409 одиниць.

У травні 2019 року відбувся перший масштабний етап практичного тестування системи Starlink. Під час місії на низьку навколоземну орбіту висотою 550 км із нахилом $53,2^\circ$ було виведено 60 супутників версії Starlink v0.9. Головним завданням запуску стало відпрацювання процедур розгортання орбітального угруповання, перевірка алгоритмів керування та оцінювання ефективності застосованих технічних рішень.

Запущені апарати забезпечували взаємодію із наземними станціями та тестовими абонентськими терміналами, використовуючи виключно Ku-діапазон. Із 60 супутників успішно виконали програму випробувань 57 одиниць. Після завершення експлуатаційних тестів у травні 2022 року всі апарати були контрольовано зведені з орбіти та утилізовані шляхом згоряння в атмосфері, що підтвердило орієнтацію проєкту на дотримання принципів екологічної безпеки космічного простору.

У вересні 2019 року компанія ініціювала внесення додаткових змін до схеми розгортання супутникового угруповання. Новий план передбачав збільшення кількості орбітальних площин на висоті 550 км із 24 до 72.

Передбачалося, що під час кожного запуску супутники розподілятимуться між трьома площинами по 22 апарати в кожній. Остаточне схвалення цієї конфігурації було отримано у грудні того ж року.

Паралельно, у жовтні 2019 року, компанія подала понад двадцять додаткових заявок на реєстрацію майже 30 тисяч супутників нового покоління, закладаючи основу для подальшого масштабування системи Starlink Gen2.

Початок повномасштабного функціонування мережі Starlink припадає на листопад 2019 року, коли на навколоземну орбіту висотою 550 км з нахилом 53° було виведено першу партію із 60 супутників версії Starlink 1.0. Порівняно з експериментальними апаратами попереднього покоління, нові супутники отримали суттєві технічні вдосконалення. Зокрема, їх пропускна спроможність збільшилася приблизно у чотири рази, кількість антенних променів була подвоєна, а також інтегровано додаткові засоби зв'язку, що працюють у К-діапазоні. Окрему увагу під час проєктування приділено питанням безпечної утилізації космічних апаратів після завершення експлуатації шляхом їх повного згоряння в атмосфері Землі. Маса кожного супутника становила близько 260 кг.

Після запуску космічні апарати спочатку розміщувалися на проміжній орбіті висотою близько 280 км. Подальше виведення на робочу орбіту висотою 550 км здійснювалося самостійно за допомогою електрореактивних двигунів Холла, що використовували криптон як робоче тіло. Використання такого технічного рішення сприяло підвищенню рівня автономності супутників та покращенню енергетичної ефективності всієї системи.

Упродовж періоду з листопада 2019 року до травня 2021 року компанія завершила формування основного орбітального сегмента на висоті 550 км з нахилом $53,8^\circ$. Висока інтенсивність запусків була досягнута завдяки застосуванню багаторазових ракет-носіїв Falcon 9 FT, що дозволяло щомісячно доставляти на орбіту в середньому близько 120 супутників. Паралельно розширювалися виробничі потужності підприємства, які забезпечували виготовлення до шести космічних апаратів щодоби.

У серпні 2020 року компанія SpaceX подала до Федеральної комісії зі зв'язку США (FCC) оновлену заявку щодо коригування програми розгортання

супутникового угруповання Starlink другого покоління. Запропонована концепція передбачала два альтернативні сценарії реалізації проєкту, основні характеристики яких наведено в таблиці 2.1 [6].

Перший варіант базувався на використанні транспортної системи Starship, що мала забезпечити оперативне та ефективне виведення великої кількості супутників безпосередньо на робочі орбіти. Другий варіант розглядався як резервний механізм реалізації проєкту та передбачав застосування ракети-носія Falcon 9 FT у випадку перенесення термінів введення в експлуатацію комплексу Starship.

Таблиця 2.1 – Стратегія розгортання супутників Starlink Gen2 (2.0) [2]

Показник	Перша конфігурація	Друга конфігурація
Кількість супутників	29 988	29 996
Висота орбіти	340–614 км	328–614 км
Число орбітальних площин	9	12
Кути нахилу	Різні (у том числі екваторіальні та полярні)	Різноманітні (для більш широкого охоплення)
Ракета-носіє	Starship (Super Heavy)	Falcon 9 FT
Особливості	Висока продуктивність та швидкий запуск з ракетою нового покоління	Гнучкість з вже використовуваними технологіями
Цільове використання	Збільшення швидкості запуску, пряме виведення на робочу орбіту	Використання в якості альтернативи, якщо Starship не готовий

Обидва запропоновані варіанти архітектури Starlink Gen2 передбачали формування орбітального угруповання чисельністю близько 30 тис. супутників. Розміщення космічних апаратів планувалося на орбітах висотою від 328 до 614 км із різними кутами нахилу, що забезпечувало можливість створення практично суцільного глобального покриття поверхні Землі.

У 2022 році компанія SpaceX визначила першу конфігурацію як базову для подальшої реалізації проєкту. Водночас результати випробувань, проведених у вересні–жовтні 2020 року, підтвердили високу ефективність функціонування системи. Під час тестової експлуатації було зафіксовано

стабільне з'єднання, незначний рівень затримок та високі швидкісні показники передачі даних. Максимальна швидкість завантаження досягала 500 Мбіт/с, затримка перебувала в межах 20–40 мс, а використання мережі не супроводжувалося обмеженнями за обсягом трафіку.

Подальшим етапом розвитку системи стало отримання у 2021 році дозволу на запуск десяти супутників на полярні орбіти з нахилом $97,6^\circ$. Реалізація цього рішення була спрямована на розширення зони покриття у високоширотних районах, включаючи важкодоступні території, зокрема Аляску та інші північні регіони.

У квітні 2021 року Федеральна комісія зі зв'язку США (FCC) схвалила запит SpaceX щодо зміни параметрів розміщення супутників. Відповідно до нового плану, орбітальна висота апаратів була зменшена до діапазону 540–570 км порівняно з початково передбаченими 1100–1300 км. Таке коригування конфігурації мережі мало на меті скорочення затримок передачі даних та підвищення якості надання телекомунікаційних послуг [6].

Станом на червень 2021 року кількість користувачів системи перевищила 10 тис., що свідчило про перехід проекту до етапу активного комерційного впровадження. У цей період також значно зросла інтенсивність запусків супутників на орбіти висотою 560 км з нахилом $97,6^\circ$, призначені для забезпечення покриття полярних широт.

Важливою віхою розвитку мережі став запуск у вересні 2021 року 51 супутника модифікації Starlink 1.5, обладнаного системою лазерного міжсупутникового зв'язку. Використання цієї технології забезпечило можливість прямого обміну даними між космічними апаратами без залучення наземних проміжних вузлів, що суттєво підвищило ефективність функціонування глобальної мережі. Маса кожного супутника становила приблизно 295 кг. Незважаючи на те, що детальні технічні характеристики лазерної системи не були оприлюднені, її впровадження стало одним із ключових технологічних досягнень проекту. Зазначений запуск започаткував формування орбітального сегмента з нахилом 70° на висоті 570 км.

У листопаді того ж року компанія розпочала розгортання чергової групи

супутників на орбітах висотою 550 км із нахилом $53,2^\circ$, продовжуючи розширення основного угруповання.

У лютому 2022 року SpaceX представила новий комерційний сервіс Starlink Business, орієнтований на корпоративних користувачів. Комплект обладнання включав високопродуктивний термінал із широкосмуговою антеною, що забезпечувала швидкість передавання даних у межах 150–500 Мбіт/с. Вартість комплекту становила 2500 доларів США, а щомісячна абонентська плата — 500 доларів США. Високий попит на нову послугу сприяв стрімкому збільшенню кількості абонентів: уже в березні 2022 року їх число досягло 250 тис., а в червні перевищило 500 тис. користувачів.

У червні 2022 року FCC надала дозвіл на використання послуг Starlink для рухомих транспортних платформ. Це рішення відкрило можливість масштабного впровадження супутникового зв'язку на повітряному, морському та автомобільному транспорті. Наступним важливим кроком стало оголошене у серпні 2022 року партнерство з мобільним оператором T-Mobile. Співпраця була спрямована на інтеграцію супутникового зв'язку у стандартні мобільні телефони для забезпечення зв'язку в районах із недостатнім покриттям наземних мереж [6].

З метою реалізації концепції глобального мобільного супутникового зв'язку супутники Starlink почали оснащуватися спеціалізованими модулями, сумісними зі стандартом IMT-2000. Завдяки цьому користувачі отримали можливість підключатися до супутникової мережі безпосередньо зі звичайних мобільних пристроїв без використання додаткового обладнання. Незважаючи на відносно невисоку пропускну здатність на рівні 2–4 Мбіт/с, система здатна одночасно підтримувати до 2000 голосових викликів та близько одного мільйона текстових повідомлень. У першій половині 2025 року сервіс Direct-to-Cell завершив стадію пілотної експлуатації та став комерційно доступним у США, Канаді, Японії, а також у низці віддалених регіонів Південної Америки.

Станом на травень 2025 року кількість абонентів мережі перевищила 5 млн користувачів, що підтверджує високі темпи розвитку системи та зростання її популярності на світовому ринку телекомунікаційних послуг.

На сьогодні послуги Starlink надаються більш ніж у 125 країнах світу, включаючи США, Канаду, Австралію, Бразилію, Індію та держави Європейського Союзу. У низці інших країн продовжуються процедури отримання необхідних регуляторних дозволів. У 2025 році система вийшла за межі стаціонарного застосування та почала активно використовуватися на мобільних платформах, зокрема на літаках, морських суднах, поїздах і автомобілях. Це стало важливим етапом трансформації супутникового зв'язку в повноцінну глобальну телекомунікаційну інфраструктуру.

Подальша стратегія розвитку передбачає збільшення чисельності супутникового угруповання до 40 тис. космічних апаратів. Реалізація такого масштабного проєкту має забезпечити глобальне покриття з високою пропускнуою спроможністю та мінімальними затримками передачі даних.

Суттєвий технологічний прогрес демонструють сучасні супутники серії Starlink V2 Mini. Вони оснащуються аргоновими іонними двигунами, які забезпечують приблизно у 2,4 раза більшу тягу та на 50 % вищий питомий імпульс порівняно з попередніми модифікаціями. Важливим нововведенням стало використання Е-діапазону частот (71–79 ГГц та 81–86 ГГц), а також удосконалених фазованих антенних решіток. У результаті пропускна здатність одного супутника збільшилася майже в чотири рази [13].

Окремої уваги заслуговує технологія Direct-to-Cell, впровадження якої розпочалося у 2024 році. Вона забезпечує можливість прямого супутникового зв'язку зі стандартними мобільними телефонами у місцевостях, де відсутня наземна телекомунікаційна інфраструктура.

Також удосконалюються абонентські термінали користувачів, які характеризуються підвищеною стійкістю до несприятливих погодних умов. Завдяки використанню систем автоматичного наведення забезпечується стабільність зв'язку навіть за складних кліматичних впливів.

Одночасно здійснюється модернізація наземного сегмента мережі шляхом будівництва нових шлюзових станцій та розширення існуючої інфраструктури. Реалізація цих заходів спрямована на підвищення надійності функціонування системи та збільшення її загальної пропускнуої спроможності.

Відповідно до планів компанії, завершення другого етапу розгортання супутникового угруповання очікується до листопада 2027 року.

2.2 Характеристики орбітального покриття та механізми керування променями в системі Starlink

На початковому етапі розгортання супутникової мережі Starlink космічні апарати функціонували на орбітах висотою близько 550 км. За таких параметрів орбітального руху забезпечується зона обслуговування із радіусом приблизно 950 км за умови, що мінімальний кут піднесення для абонентських терміналів становить не менше 25° . Водночас для досягнення вищої якості прийому сигналу та підвищення стійкості каналу зв'язку доцільним є використання кутів піднесення понад 40° , оскільки саме в цьому діапазоні забезпечуються найкращі умови функціонування фазованих антенних решіток (ФАР).

Кожен супутник формує просторову діаграму спрямованості, центр якої орієнтований на підсупутникову точку. Завдяки можливості електронного сканування промінь може відхилитися від основного напрямку на $3\text{--}5^\circ$, що дозволяє динамічно перерозподіляти ресурси покриття між окремими зонами обслуговування. Ширина променя змінюється залежно від його положення в секторі сканування і становить приблизно $2,5^\circ$ у центральній частині та до 4° на периферії. За таких параметрів на поверхні Землі формується область покриття діаметром близько 24 км (рис. 2.1).

Теоретичні розрахунки показують, що один супутник здатний забезпечувати роботу приблизно 300 окремих секторів покриття послідовно або одночасно, залежно від конфігурації системи формування променів. Кількість доступних секторів визначається шириною променя та максимально допустимим кутом його електронного відхилення. Окремі області обслуговування на поверхні Землі прийнято називати комірками або сотами. Кожна така зона має орієнтовний діаметр 24 км і площу близько 380 км^2 .

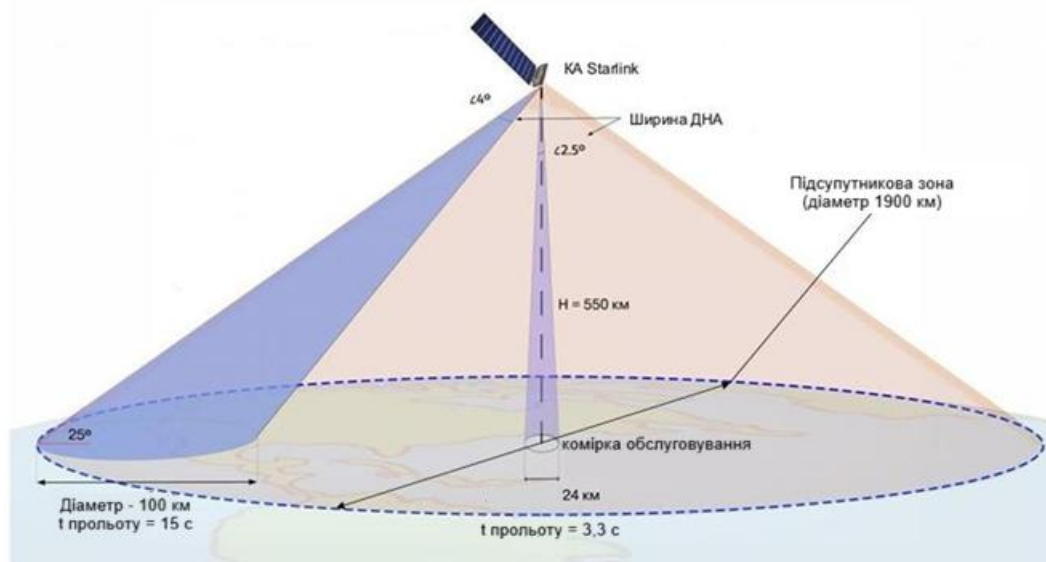


Рисунок 2.1 – Підсупутникова зона К та конфігурація діаграм спрямованості променів фазованої антенної решітки [15]

Згідно з технічними даними SpaceX, у межах однієї комірки система здатна одночасно підтримувати зв'язок приблизно зі 125–130 активними абонентськими терміналами (рис. 2.2).

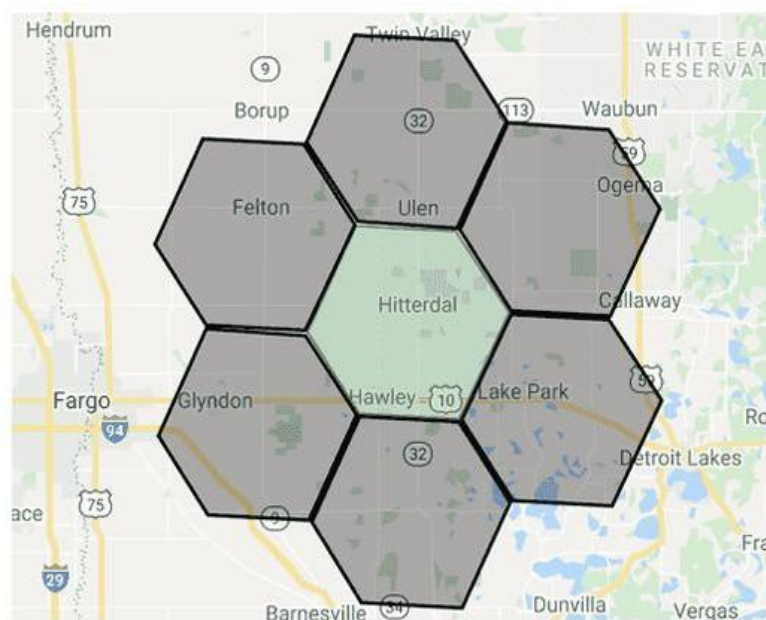


Рисунок 2.2 – Комірки обслуговування («cells») CC3 Starlink [3]

Обслуговування користувачів здійснюється за рахунок швидкого електронного перемикання променів між окремими зонами покриття. Час такого перемикання становить лише 5–10 мкс, що є значно меншим за

характерні значення затримки передавання пакетів даних у мережі Інтернет (30–50 мс) та величину джиттера, яка зазвичай не перевищує 25 мс. Завдяки цьому процес перерозподілу ресурсів мережі практично не впливає на якість обслуговування користувачів.

Компанія SpaceX не оприлюднила точні відомості щодо кількості одночасно сформованих променів кожним супутником. Проте результати технічного аналізу свідчать, що найбільш імовірною є конфігурація із 16 активними променями. За такого підходу фазована антенна система супутника може одночасно формувати до восьми променів у кожній із двох незалежних поляризацій. При цьому три з чотирьох антенних модулів використовуються для організації низхідних каналів зв'язку, тоді як четвертий модуль забезпечує передачу даних у висхідному напрямку. Теоретично така архітектура дозволяє формувати до 24 променів в одній поляризації або до 48 променів у разі використання двох поляризацій одночасно. Однак на сучасному етапі розвитку мережі подібний режим роботи в повному обсязі не реалізований.

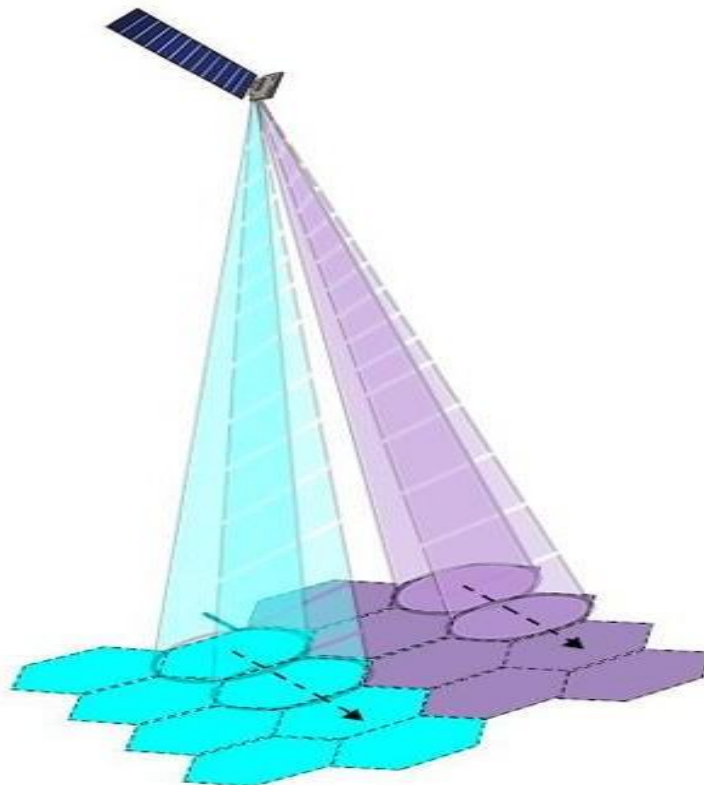


Рисунок 2.3 – Принцип почергового обслуговування комірок променями супутника Starlink [4]

Наявний спектральний ресурс системи Starlink у Ku-діапазоні з урахуванням використання двох ортогональних поляризацій становить приблизно 4200 МГц, з яких близько 4000 МГц задіяно для практичної передачі даних. Такий частотний ресурс дає змогу формувати до 16 променів низхідної лінії зв'язку. При цьому ширина смуги одного низхідного каналу становить близько 240 МГц, тоді як для висхідних каналів цей показник перебуває на рівні приблизно 60 МГц.

Під час руху супутника орбітою висотою 550 км він перебуває в зоні видимості абонентського термінала в середньому близько 4,1 хвилини. Таким чином, тривалість одного сеансу зв'язку складає орієнтовно 250 с. Для максимально ефективного використання цього інтервалу в системі Starlink реалізовано концепцію безперервного супроводження супутника абонентським терміналом. За такого підходу термінал підтримує постійне з'єднання з конкретним космічним апаратом, автоматично коригуючи напрямок випромінювання відповідно до його поточного положення на орбіті (рис. 2.4).

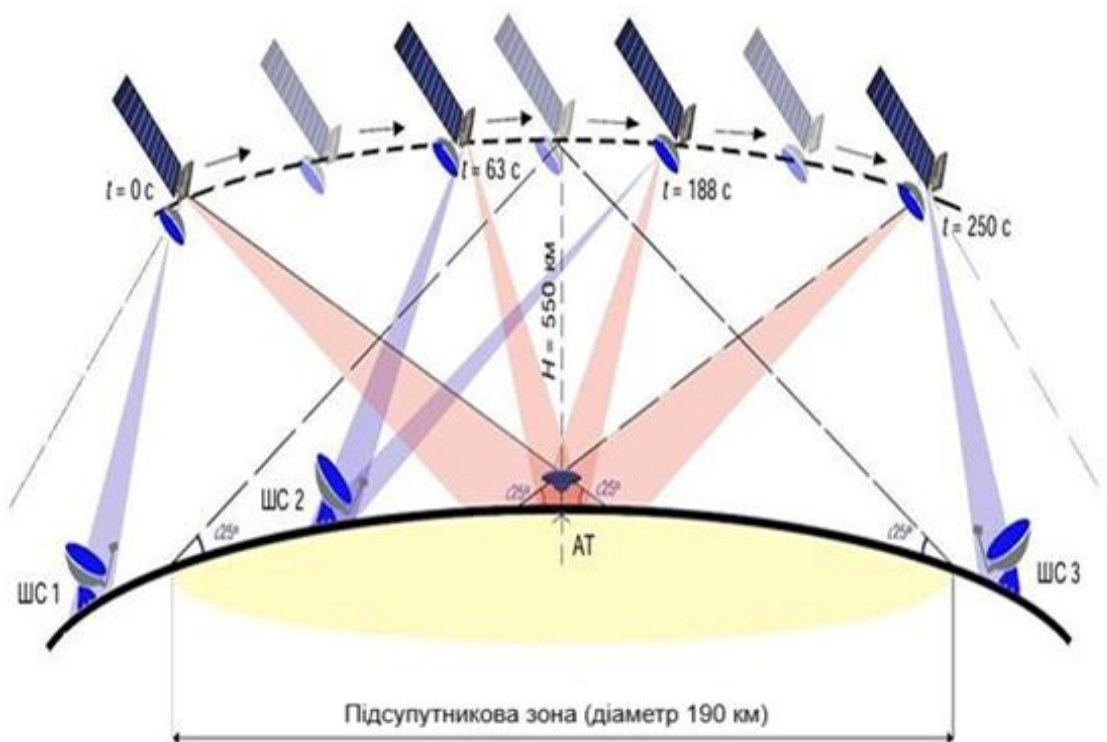


Рисунок 2.4 – Формування променів КА Starlink в підсупутниковій зоні [4]

Альтернативним варіантом є одночасне встановлення зв'язку одного термінала з кількома супутниками. Проте реалізація такого підходу потребує

додаткових апаратних і мережевих ресурсів, а також збільшення чисельності орбітального угруповання. Саме тому концепція безперервного супроводження одного супутника розглядається як найбільш раціональне та ресурсоефективне рішення для поточної архітектури системи.

Обмежена кількість доступних променів на одному супутнику ускладнює забезпечення суцільного одночасного покриття великих територій. Саме ця обставина стала однією з причин необхідності формування багатотисячного супутникового угруповання. Для розширення ефективної зони обслуговування компанія SpaceX зменшила мінімальний робочий кут місця абонентських терміналів із 40° до 25° , а також оснастила термінали механізмами коригування просторового положення антени. Завдяки цьому один промінь може обслуговувати декілька суміжних комірок на периферії підсупутникової області. Водночас таке рішення супроводжується певним зниженням точності наведення антен і деяким обмеженням пропускної здатності каналу. Механічна система орієнтації забезпечує встановлення антени у положення, максимально наближене до перпендикулярного напрямку на супутник, що відповідає найефективнішому режиму роботи антенної системи (рис. 2.5).

Пропускна здатність одного променя оцінюється в межах 760–800 Мбіт/с, тоді як сумарна продуктивність окремого супутника може досягати 17–23 Гбіт/с. Для організації каналів зв'язку використовується нижня частина Ku-діапазону (10,7–12,7 ГГц) для низхідної лінії та верхня частина діапазону (14–14,5 ГГц) для висхідної передачі даних. Загальна доступна смуга частот становить близько 2000 МГц при використанні однієї поляризації та до 4000 МГц у разі застосування двополяризаційної схеми.

Для підвищення спектральної ефективності компанія SpaceX передбачила використання модуляції 64QAM, яка теоретично забезпечує ефективність до 6 біт/Гц. Однак для стабільної роботи такого режиму необхідне відношення сигнал/шум (SNR) не менше 17 дБ. Під час бета-випробувань використовувалася лише одна поляризація, що обмежувало доступну смугу до 2000 МГц. При цьому рівень SNR на вході абонентських терміналів зазвичай перебував у межах 11,5–12,5 дБ, чого було недостатньо для ефективного

застосування 64QAM.

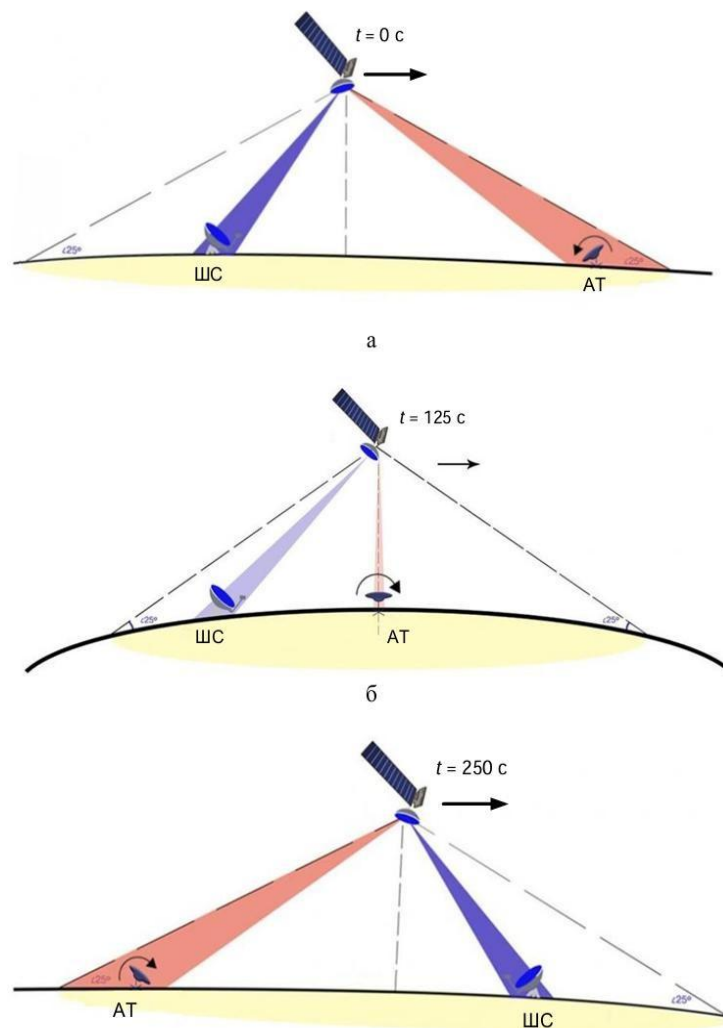


Рисунок 2.5 – Зміна кута місця антени абонентського термінала під час наведення на космічний апарат [8]

У зв'язку з цим у системі використовувалися менш вимогливі до якості каналу схеми модуляції, зокрема 16PSK та 32APSK. Наприклад, застосування 32APSK у поєднанні з корекцією помилок FEC 4/5 дозволяє досягти спектральної ефективності близько 3,79 біт/Гц при необхідному значенні SNR 14,4 дБ. Для висхідних каналів, де співвідношення сигнал/шум може досягати 18,5 дБ, забезпечується спектральна ефективність на рівні близько 5 біт/Гц.

Практичні випробування, проведені на території Німеччини за умов невисокого навантаження мережі, продемонстрували швидкість передавання даних у низхідному каналі шириною 240 МГц на рівні 542 Мбіт/с. Для висхідного каналу шириною 60 МГц було зафіксовано швидкість близько

39 Мбіт/с.

Додатковим напрямом удосконалення мережі є впровадження спрощених механізмів маршрутизації пакетів, що повинні зменшити обчислювальне навантаження на мережеве обладнання порівняно з традиційними протоколами, такими як IPv6. При цьому вся інформація, що передається мережею Starlink, захищається засобами наскрізного шифрування (End-to-End Encryption).

Для організації фідерних ліній зв'язку кожен супутник оснащується двома параболічними антенами, розташованими на протилежних сторонах конструкції. Це забезпечує можливість одночасної взаємодії з двома незалежними наземними шлюзовими станціями. Проте в умовах спільного використання частотного ресурсу з іншими супутниковими системами можуть виникати взаємні радіоінтерференційні завади.

З метою мінімізації такого впливу компанія SpaceX реалізувала адаптивний алгоритм керування фідерними каналами. У разі виникнення завад під час роботи з однією наземною станцією система автоматично здійснює перемикання на альтернативний шлюз. Одночасно промінь, що потрапляє до зони потенційної інтерференції, може тимчасово вимикатися. На відміну від аналогічних рішень, які застосовуються в системі OneWeb і базуються на зміні кута нахилу променя, підхід Starlink передбачає динамічний вибір оптимальної наземної станції.

Ефективне функціонування такої архітектури вимагає наявності значної кількості шлюзових станцій, розподілених по території покриття. Це дозволяє супутникам оперативно обирати найменш завантажені та найменш зашумлені канали зв'язку. Водночас реалізація подібного механізму істотно ускладнює роботу центру мережевого керування та моніторингу NCMC (Network Control and Management Center), який повинен постійно контролювати просторове розташування супутників і координувати їхню електромагнітну сумісність не лише з геостаціонарними системами зв'язку (GEO), але й з іншими низькоорбітальними угрупованнями, такими як OneWeb, Kuiper та Telesat LEO (рис. 2.6).

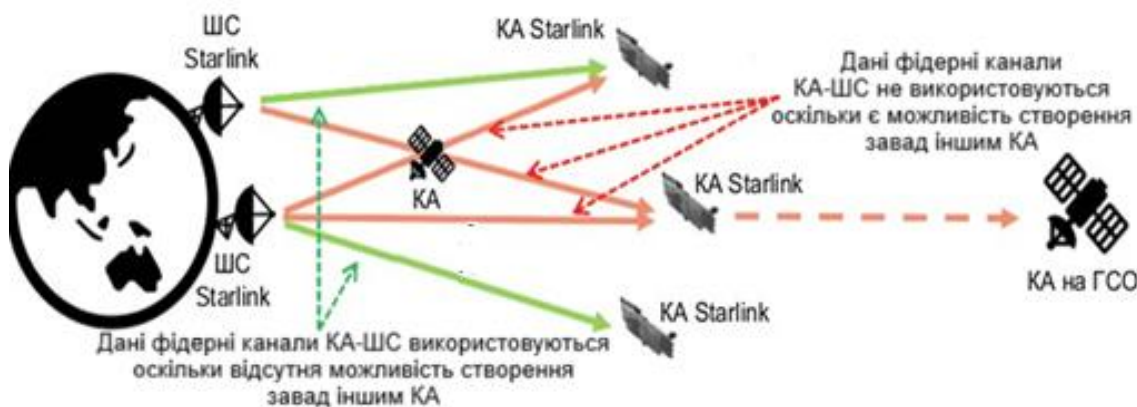


Рисунок 2.6 – Схема уникнення перешкод для інших ССЗ, що працюють у цьому ж напрямку і в тих же діапазонах [18]

У перспективі одночасне функціонування кількох тисяч супутників на низьких навколоземних орбітах потребуватиме надзвичайно високого рівня координації, точності керування та ефективного розподілу ресурсів мережі. Управління таким масштабним орбітальним угрупованням є складним інженерним завданням, що охоплює як питання навігації, так і забезпечення стабільної роботи телекомунікаційної інфраструктури. Незважаючи на значні технічні виклики, компанія SpaceX декларує можливість надійного та ефективного функціонування системи навіть за умов подальшого суттєвого збільшення кількості супутників.

Одним із ключових аспектів експлуатації низькоорбітальних супутникових систем є забезпечення електромагнітної сумісності між різними орбітальними угрупованнями та геостаціонарними супутниковими мережами. Враховуючи стрімке зростання кількості супутників на навколоземних орбітах, вирішення цієї проблеми стає одним із найважливіших завдань сучасної супутникової телекомунікаційної галузі.

Починаючи з Starlink 1.5, супутники оснащуються лазерними системами міжсупутникового зв'язку ISL (Inter-Satellite Links). Проте можливість повномасштабної маршрутизації трафіку безпосередньо між космічними апаратами наразі реалізована лише частково. Передбачається, що повноцінне використання цієї функціональності стане можливим у наступних поколіннях супутників або після оновлень програмного забезпечення (рис. 2.7).

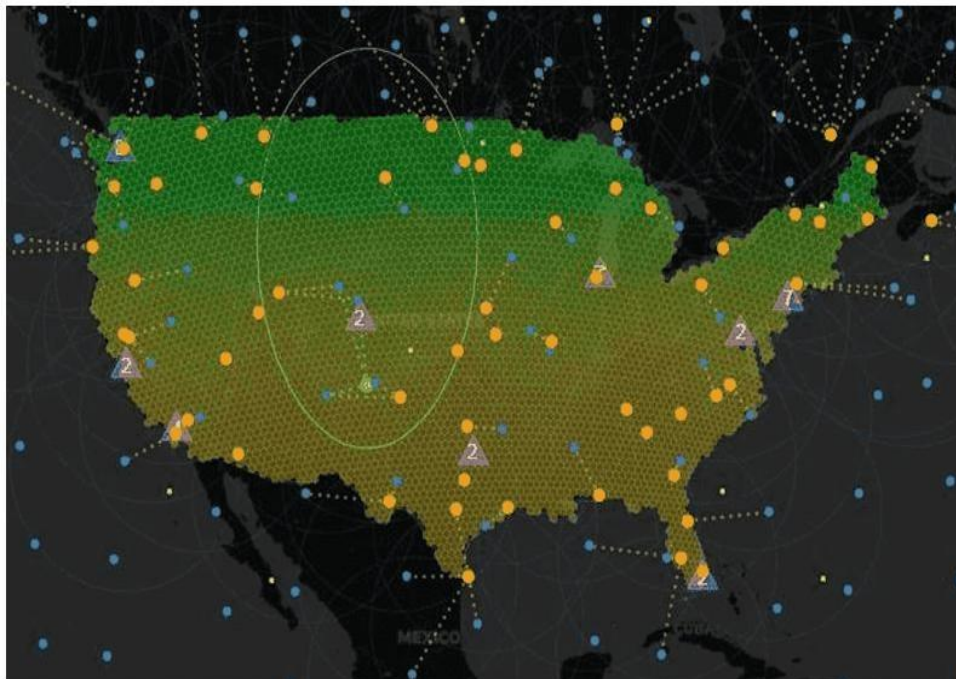


Рисунок 2.7 – Підключення КА (сині точки) до ШС (жовті точки) фідерними лініями (пунктирні лінії) над територією США[13]

У сучасній архітектурі Starlink передавання даних між абонентськими та фідерними каналами здійснюється лише за наявності активного зв'язку супутника із наземною шлюзовою станцією в межах зони видимості. Таким чином, значна частина мережевого трафіку продовжує залежати від наземного сегмента інфраструктури.

Починаючи з 2021 року нові космічні апарати Starlink оснащуються модулями лазерного міжсупутникового зв'язку (MLS), які на сьогодні перебувають на етапі практичних випробувань та поступового впровадження. Постачальником цих систем є німецька компанія Tesat, що спеціалізується на розробленні оптоелектронних рішень для космічної галузі. Для супутників малого класу компанією запропоновано лазерний термінал SmartLCT, маса якого становить близько 30 кг. Даний комплекс забезпечує передавання інформації на відстані до 45 тис. км зі швидкістю до 1,8 Гбіт/с.

Після повноцінного впровадження міжсупутникових лазерних каналів система Starlink зможе перейти до використання концепції бортової обробки даних (Onboard Switching and Processing, OSB). У такому режимі супутник буде не лише ретранслювати інформацію, а й виконувати її аналіз, визначати адресу

одержувача та самостійно обирати оптимальний маршрут передавання даних через орбітальну мережу. Це дозволить суттєво скоротити залежність від наземної інфраструктури.

У поточній конфігурації дані зазвичай передаються від супутника до наземної станції, після чого через наземну мережу маршрутизуються до іншої шлюзової станції та відповідного супутника-приймача. Така схема є функціональною, однак супроводжується додатковими затримками та підвищеним навантаженням на наземний сегмент мережі.

З технічної точки зору більш ефективним підходом є передавання інформації безпосередньо між супутниками без проміжної маршрутизації через Землю. Подібна концепція вже тривалий час успішно використовується в супутниковій системі зв'язку Iridium, де міжсупутникові канали забезпечують глобальну маршрутизацію трафіку в межах орбітального угруповання.

Наразі в мережі Starlink використовуються два основні частотні діапазони:

- Ku-діапазон (11/14 ГГц), призначений для організації абонентських каналів зв'язку;
- Ka-діапазон, який використовується для побудови фідерних каналів між супутниками та наземними шлюзовими станціями.

У режимі прямої ретрансляції супутник виконує лише перетворення несучої частоти сигналу без зміни структури інформаційного потоку. Такий підхід є найпростішою формою маршрутизації даних. Першим етапом впровадження технології MLS стало перетворення радіочастотних сигналів в оптичні та їх подальше передавання через лазерні міжсупутникові канали. При цьому виконання складної бортової обробки інформації ще не є обов'язковим. Подібна схема особливо ефективна для супутників, які перебувають над океанічними акваторіями або регіонами, де відсутні наземні шлюзові станції.

Більш складним варіантом є реалізація повноцінної бортової комутації. У цьому випадку супутник здійснює демодуляцію прийнятого сигналу, аналізує службову інформацію пакета даних, визначає адресу призначення та спрямовує трафік через лазерний канал до відповідного супутника мережі. Незважаючи на

високу ефективність такого підходу, його реалізація суттєво ускладнює архітектуру керування супутниковим угрупованням.

За оцінками SpaceX, пропускна здатність одного супутника Starlink може перебувати в межах від 17 до 23 Гбіт/с. Введення в експлуатацію першої групи із 60 супутників забезпечило додаткову пропускну спроможність мережі на рівні приблизно 1 Тбіт/с. Водночас компанія не уточнює, чи стосується цей показник сумарної продуктивності всіх каналів зв'язку, чи лише абонентського сегмента мережі.

Оскільки близько 70 % поверхні Землі займають океани, а щільність користувачів суттєво відрізняється залежно від регіону, більш інформативним є аналіз характеристик окремих супутників, а не оцінювання загальної пропускної здатності всього орбітального угруповання.

Для організації фідерних ліній зв'язку в Ка-діапазоні доступна спектральна смуга шириною близько 4200 МГц при використанні двох поляризацій. За умови застосування вискоефективних схем модуляції, таких як 64QAM, це дозволяє досягати пропускної здатності близько 20 Гбіт/с.

Для абонентських каналів Ку-діапазону умови є дещо складнішими через нижчі значення відношення сигнал/шум. З цієї причини переважно використовуються схеми модуляції 16PSK та 32APSK. За таких умов пропускна спроможність супутника становить приблизно 6–14 Гбіт/с при використанні однієї поляризації. Подальший перехід до двополяризаційної передачі дозволить збільшити цей показник орієнтовно до 12–30 Гбіт/с, що суттєво підвищить загальну продуктивність мережі Starlink.

2.3 Перешкоди на шляху використання CC3 Starlink

1. Вплив супутникового угруповання на астрономічні дослідження. З початком активного розгортання супутникової мережі Starlink представники астрономічної спільноти висловили занепокоєння щодо наслідків масового виведення космічних апаратів на низькі навколоземні орбіти. Основною причиною таких побоювань є підвищення рівня світлового та радіочастотного

забруднення. Відбиття сонячного світла від поверхонь супутників може створювати небажані оптичні сліди на астрономічних знімках, тоді як випромінювання в радіодіапазоні здатне впливати на роботу радіотелескопів. У результаті це може ускладнювати проведення фундаментальних наукових досліджень та знижувати точність астрономічних спостережень.

2. Ризик засмічення навколоземного космічного простору. Однією з найважливіших проблем масштабних низькоорбітальних супутникових систем є потенційне збільшення кількості космічного сміття. Особливе занепокоєння викликає можливість реалізації так званого синдрому Кesslera, за якого зіткнення між об'єктами на орбіті призводять до лавиноподібного утворення нових уламків. Подібний сценарій здатний суттєво обмежити або навіть зробити неможливим подальше використання окремих орбітальних висот.

У процесі експлуатації супутники Starlink постійно взаємодіють із великою кількістю інших космічних об'єктів, включаючи діючі супутники та фрагменти космічного сміття. За наявними оцінками, щотижня реєструється приблизно 600–700 випадків потенційно небезпечних зближень на відстані менш ніж 1 км. Незважаючи на відсутність серйозних аварійних ситуацій, подальше збільшення чисельності орбітального угруповання до десятків тисяч апаратів може суттєво підвищити ймовірність зіткнень.

Для запобігання таким подіям супутники Starlink обладнані автоматизованою системою уникнення зіткнень, яка використовує орбітальні дані, отримані від Міністерства оборони США. Проте окремі випадки свідчать про наявність певних ризиків. Так, після запуску першої тестової партії супутників Starlink v0.9 у травні 2019 року три космічні апарати втратили зв'язок із центром керування. Унаслідок цього вони втратили можливість виконати контрольоване сходження з орбіти та почали поступово знижуватися під впливом аеродинамічного гальмування.

Ще одним показовим прикладом стала ситуація у вересні 2019 року, коли виникла загроза зіткнення між супутником Starlink-44 та супутником Aeolus, що належить Європейському космічному агентству. Після збільшення прогнозованої ймовірності зіткнення ESA було змушене самотійно виконати

маневр ухилення. Подібний випадок відбувся й у лютому 2022 року, коли геомагнітна буря спричинила втрату більшості із 49 щойно запусчених супутників Starlink, які не змогли досягти робочих орбіт та згоріли в атмосфері Землі.

Наведені приклади демонструють, що подальше зростання кількості низькоорбітальних супутників потребує постійного вдосконалення механізмів контролю орбітального руху та управління ризиками зіткнень.

3. Обмеження кількості користувачів, які можуть обслуговуватися одним супутником. Важливим фактором ефективності системи Starlink є максимальна кількість абонентських терміналів, яку здатний обслуговувати один супутник. Якщо прийняти середню пропускну здатність космічного апарата на рівні 20 Гбіт/с з урахуванням двополяризаційної передачі та можливостей фідерного сегмента, можна оцінити потенційну ємність мережі.

Статистичні дані свідчать, що середнє домогосподарство у США споживає приблизно 281 ГБ даних на місяць, що еквівалентно середній швидкості близько 0,9 Мбіт/с. У години максимального навантаження потреба в пропускій здатності може зростати у декілька разів. За таких умов один супутник теоретично здатний підтримувати роботу близько 22 тис. терміналів за середнього навантаження або близько 5,5–7,4 тис. користувачів під час пікових періодів.

Якщо врахувати, що зона обслуговування супутника охоплює приблизно 7470 комірок, то на кожную з них припадатиме лише декілька активних абонентів. Отримані результати істотно відрізняються від заявлених SpaceX характеристик, згідно з якими одна комірка може обслуговувати до 125–130 терміналів.

Для компенсації цієї невідповідності можуть використовуватися такі технічні та організаційні заходи:

- обмеження максимальної швидкості доступу для окремих користувачів;
- запровадження лімітів на обсяг переданих даних;
- збільшення кількості супутників в орбітальному угрупованні;
- розширення доступного частотного ресурсу.

На практиці найчастіше застосовується комбінування кількох зазначених підходів.

4. Аналіз результатів моделювання продуктивності мережі. Для прогнозування характеристик системи Starlink використовуються математичні моделі, які дозволяють оцінювати розподіл навантаження між променями та вплив щільності абонентів на пропускну здатність мережі.

Результати моделювання показують, що найбільш навантажені комірки можуть обслуговуватися із застосуванням кількох частотних ресурсів або різних поляризацій. Додаткове збільшення пропускну здатності досягається шляхом використання механізмів часової мультиплексії TDMA. Для забезпечення максимальної ефективності використання ресурсів система зазвичай спрямовує промені спочатку до периферійних зон покриття, а потім до центральних секторів.

У регіонах із високою концентрацією користувачів доцільним є збільшення кількості наземних шлюзових станцій. Це дозволяє підвищити загальну пропускну здатність мережі та забезпечити ефективніше використання супутникових ресурсів. У випадках відсутності шлюзових станцій трафік може передаватися через міжсупутникові лазерні канали до сусідніх космічних апаратів з подальшою ретрансляцією на найближчий наземний вузол.

Додатковим обмежувальним фактором можуть виступати регіональні нормативні вимоги щодо використання частотного спектра, які в окремих країнах зменшують доступний частотний ресурс та впливають на якість обслуговування користувачів.

5. Показники швидкодії та затримки в мережі Starlink. Основними параметрами, що визначають ефективність роботи супутникової системи доступу до Інтернету, є швидкість передавання даних та рівень затримки пакетів.

Результати досліджень, проведених сервісом SpeedTest у другому кварталі 2022 року, продемонстрували високі показники продуктивності Starlink у країнах Європи, Північної та Південної Америки, а також в регіоні Океанії. Водночас було встановлено, що зі збільшенням кількості абонентів

швидкість доступу поступово зменшується через обмежені ресурси супутникового сегмента.

За результатами бета-випробувань, поданими SpaceX до FCC у 2020 році, було виконано понад один мільйон вимірювань із використанням тридцяти абонентських терміналів. У 95 % випадків затримка передачі даних не перевищувала 42 мс, а медіанне значення перебувало нижче 30 мс. Такі показники наближають супутникову систему до характеристик сучасних волоконно-оптичних мереж.

Попри окремі технічні обмеження, Starlink вже сьогодні розглядається як конкурентоспроможна альтернатива традиційним дротовим мережам доступу до Інтернету. Водночас стабільність роботи сервісу залежить від низки факторів, серед яких:

- час доби та поточний рівень навантаження мережі;
- погодні умови в зоні обслуговування;
- кількість активних користувачів у межах комірки;
- віддаленість від найближчої шлюзової станції.

Таким чином, архітектура Starlink забезпечує значний потенціал для подальшого масштабування та глобального розвитку, проте рівень якості обслуговування може суттєво відрізнятись залежно від географічного розташування користувача та поточних умов функціонування мережі.

РОЗДІЛ 3

НАЗЕМНІ ПРИСТРОЇ STARLINK

3.1 Наземні технічні пристрої системи Starlink

Одним із ключових елементів абонентського сегмента мережі Starlink є термінал нового покоління UT-2, який використовується для забезпечення доступу користувачів до супутникової мережі. Під час його розроблення було враховано сучасні вимоги до систем широкосмугового супутникового зв'язку, що дозволило підвищити надійність функціонування, якість приймання сигналів та стійкість до впливу зовнішніх чинників. Конструкція пристрою забезпечує стабільну роботу в широкому діапазоні кліматичних умов, що робить його придатним як для стаціонарного, так і для мобільного застосування.

Основні технічні характеристики терміналу UT-2 наведено нижче:

- Антенна система. Пристрій обладнаний антеною моделі UT-2, побудованою на основі фазованої антенної решітки з електронним керуванням напрямком випромінювання. Така архітектура дозволяє автоматично визначати положення супутника та здійснювати безперервне наведення променя без використання механічних приводів.

- Сектор сканування. Антенна система підтримує електронне сканування в межах $\pm 60^\circ$. Завдяки широкому сектору огляду забезпечується стійкий зв'язок із космічними апаратами навіть за умов їх швидкого переміщення по небосхилу або розташування абонента поблизу межі зони покриття.

- Масогабаритні характеристики. Маса терміналу без додаткових елементів становить близько 2,9 кг, а разом із монтажною підставкою — приблизно 3,2 кг. Відносно невелика вага та компактні розміри спрощують транспортування й монтаж обладнання в різних умовах експлуатації.

- Рівень захисту від зовнішніх впливів. Термінал відповідає вимогам стандарту захисту IP67. Це свідчить про повну пилонепроникність конструкції та здатність обладнання витримувати короткочасне занурення у воду без втрати працездатності. Завдяки цьому пристрій може ефективно функціонувати в

польових умовах, а також під час інтенсивних опадів, снігопадів та інших несприятливих погодних явищ.

3.2 Характеристики та еволюція абонентських терміналів Starlink

У процесі розвитку глобальної супутникової системи Starlink компанія SpaceX послідовно впроваджувала декілька поколінь користувацьких терміналів. Важливими етапами цієї еволюції стали моделі UT-1 та UT-2 (рис. 3.1), які забезпечили розширення функціональних можливостей мережі та підвищення якості надання послуг супутникового доступу до мережі Інтернет.



Рисунок – 3.1 Абонентські термінали Starlink: а) UT-1; б) UT-2 [13]

Першим серійним абонентським терміналом системи став пристрій UT-1, що використовувався під час бета-тестування Starlink у 2020 році. Конструкція терміналу базувалася на фазованій антенній решітці, яка містила 1675 активних елементів і виконувала функції як приймання, так і передавання сигналів. Підтримувалася лише правобічна кругова поляризація, а для передачі даних застосовувалися різні схеми модуляції – від BPSK до 64QAM – у каналах шириною від 15 до 240 МГц.

Експлуатаційні випробування показали, що термінал UT-1 забезпечував швидкість приймання даних до 350 Мбіт/с та швидкість передавання до 130

Мбіт/с. Під час тестування в Німеччині за умов мінімального навантаження були зафіксовані максимальні показники: 542 Мбіт/с для каналу Downlink та 39 Мбіт/с для каналу Uplink. Антенна система мала можливість обертання на 360° в азимутальній площині та до 60° за кутом місця. Водночас одним із головних недоліків конструкції була схильність до перегрівання за температур навколишнього середовища близько $+50^\circ\text{C}$, що обмежувало тривалість безперервної роботи обладнання.

Наступним етапом розвитку став термінал UT-2, представлений у 2021 році. Саме ця модель поступово стала основним користувацьким обладнанням мережі Starlink і до 2025 року набула найбільшого поширення серед абонентів. На відміну від попередньої версії, UT-2 використовує окремі фазовані антенні решітки для приймання та передавання сигналів, що забезпечує одночасну двосторонню передачу даних. Така архітектура дозволила не лише підвищити ефективність роботи системи, а й усунути проблему перегрівання, характерну для моделі UT-1.

Антенна терміналу UT-2 забезпечує стабільний рівень сигналу навіть при відхиленні напрямку наведення до $\pm 60^\circ$. Додатковою перевагою стала підтримка подвійної поляризації, що сприяє збільшенню доступної смуги пропускання та підвищенню ефективності використання частотного ресурсу.

Основні технічні характеристики терміналу UT-2 станом на 2025 рік наведені нижче:

- фазована антенна решітка з електронним керуванням променем;
- діапазон електронного сканування – $\pm 60^\circ$;
- маса пристрою – 2,9 кг, або близько 3,2 кг разом із монтажною опорою;
- клас захисту – IP67;
- робочий температурний діапазон – від -30°C до $+50^\circ\text{C}$;
- допустима швидкість вітру – до 96 км/год;
- система автоматичного сніготанення;
- середня споживана потужність становить 75–100 Вт.

Завдяки незначній масі, компактним розмірам та підвищеній стійкості до зовнішніх впливів UT-2 придатний для експлуатації в широкому спектрі

кліматичних умов. Удосконалена система охолодження та покращені характеристики антенної системи забезпечують тривалу безперервну роботу обладнання.

Таким чином, моделі UT-1 та UT-2 відображають послідовний розвиток абонентського сегмента мережі Starlink. Якщо UT-1 забезпечив початкове впровадження технології супутникового широкосмугового доступу, то UT-2 став повноцінною платформою для масового надання високошвидкісних послуг зв'язку із підвищеною надійністю та функціональністю.

Слід зазначити, що обидві моделі призначені переважно для стаціонарного використання. Згідно з результатами досліджень [9], під час переміщення або коливання платформи якість зв'язку істотно погіршується. З цієї причини компанія SpaceX розробляє спеціалізований мобільний термінал ESIM (Earth Station In Motion) для роботи на рухомих об'єктах (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд авіаційного терміналу ESIM [13]

Незважаючи на відсутність офіційного комерційного запуску ESIM, подані до FCC документи дозволяють оцінити його перспективні характеристики. Площа приймальної фазованої антенної решітки збільшена приблизно у 1,45 раза порівняно з UT-2, тоді як максимальний кут електронного сканування збережений на рівні $\pm 60^\circ$. Це свідчить про складність реалізації доступних за вартістю антенних систем із більшим сектором огляду.

Для забезпечення електромагнітної сумісності система ESIM здійснюватиме автоматичний контроль параметрів випромінювання з інтервалом близько 100 мс. У випадку перевищення допустимих значень потужність передавача буде автоматично коригуватися. Додатковий моніторинг виконуватиме центр управління мережею NCMC. Передбачено також автоматичне врахування регуляторних вимог різних держав шляхом адаптації параметрів роботи обладнання відповідно до місця його розташування.

Для передавання даних в абонентських каналах Starlink використовується технологія OFDM, яка забезпечує ефективний розподіл спектральних ресурсів між користувачами. Важливою складовою структури сигналу є пілот-сигнали, призначені для компенсації доплерівських зсувів частоти та інших спотворень каналу передачі. Їх потужність перевищує потужність інформаційного сигналу на 5–20 дБ, а ширина спектра становить приблизно 2 МГц. Крім того, вони використовуються для інформування термінала про наявність супутника в зоні видимості. Приклади OFDM-сигналів наведені на рисунках 3.3 а та 3.3 б.

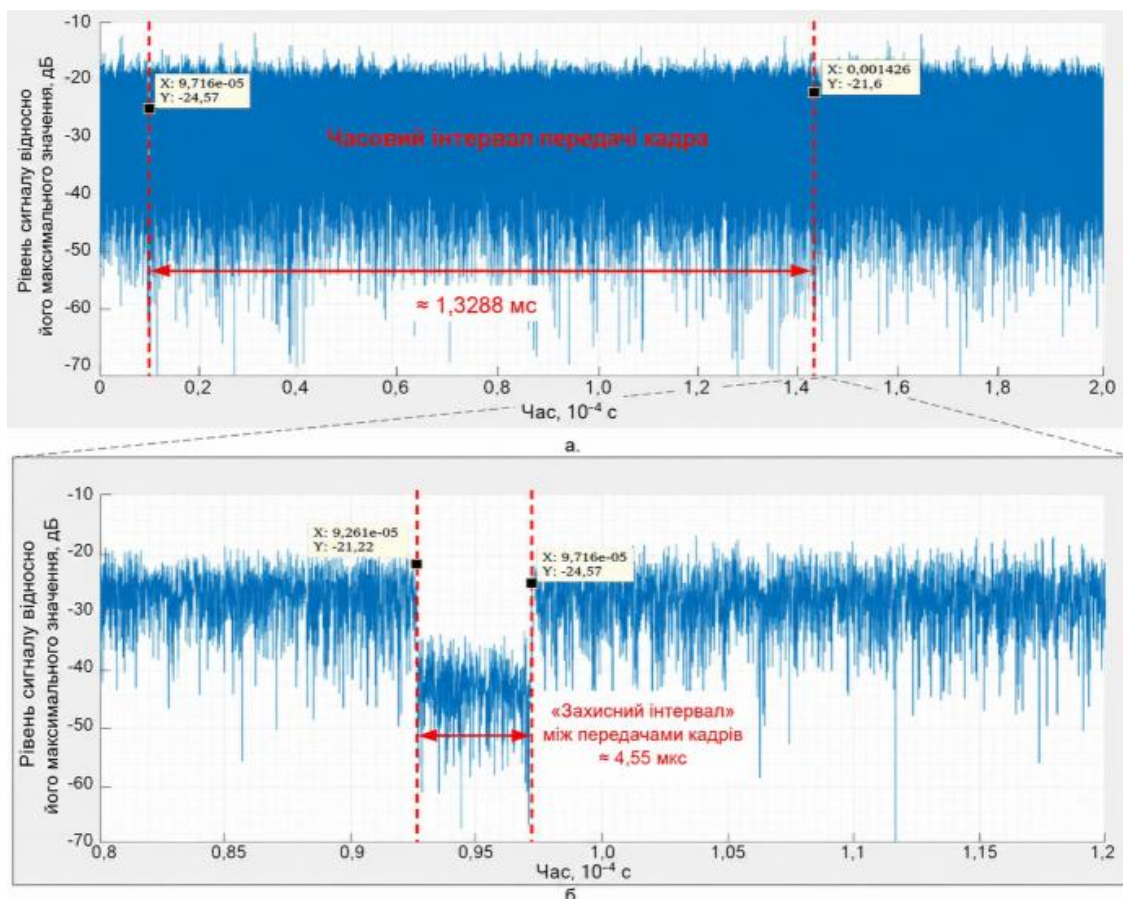


Рисунок 3.3 – OFDM-сигнал в AT Downlink: а) 240 МГц; б) 6 МГц

Часова структура сигналу організована у вигляді кадрів тривалістю 1,3288 мс із захисними інтервалами 4,55 мкс між сусідніми кадрами (рис. 3.4).

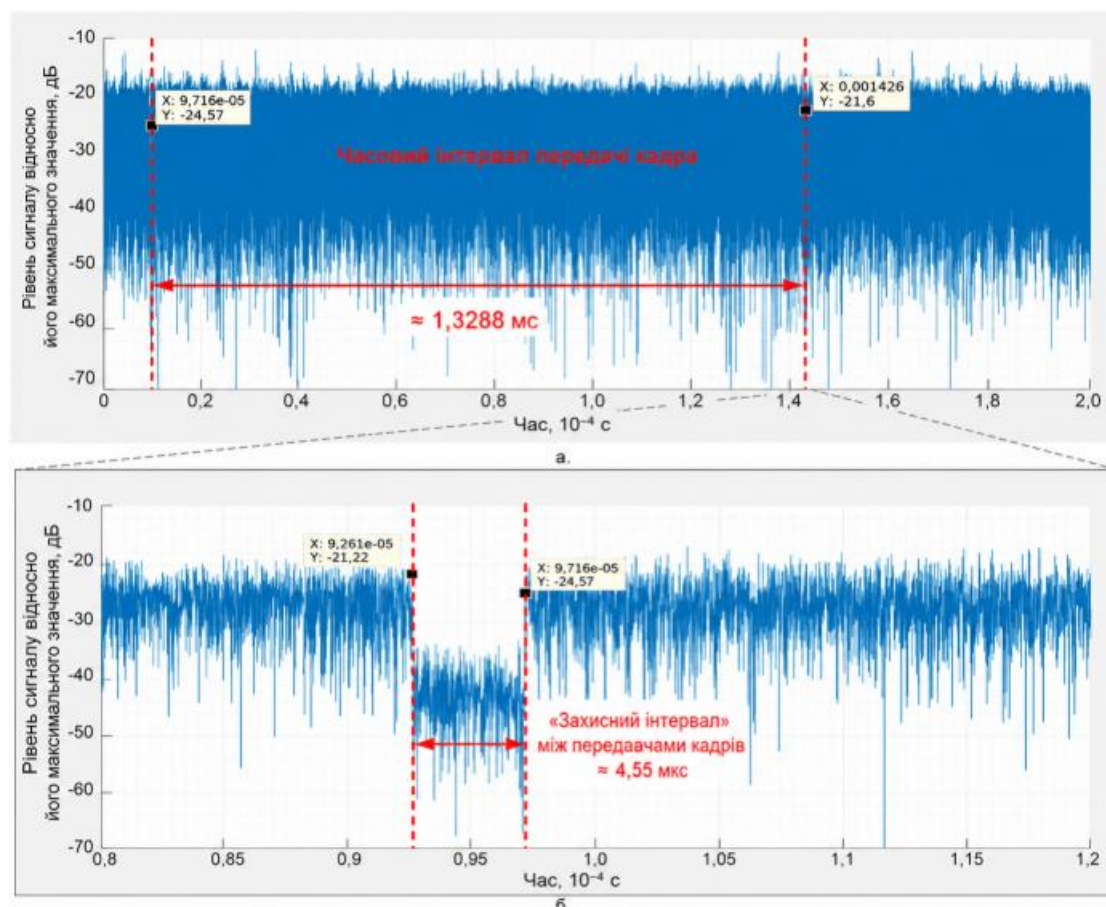


Рисунок 3.4 – Формування кадрів у каналі Downlink: а) часовий інтервал кадру; б) захисний інтервал між кадрами

Рівень сигналу в системі оцінюється у децибелах відносно максимально можливого значення. Хоча компанія SpaceX не розкриває фактичну собівартість виробництва терміналів, відомо, що стандартні абонентські комплекти реалізуються за ціною близько 499 доларів США. Незалежні оцінки свідчать, що собівартість першого покоління терміналів UT-1 могла становити від 2500 до 3000 доларів. Уже у 2021 році цей показник був знижений приблизно до 1500 доларів, а впровадження моделі UT-2 дозволило скоротити витрати ще приблизно на 200 доларів. Подальше нарощування обсягів виробництва має забезпечити додаткове зменшення вартості обладнання.

У 2021 році компанія подала до FCC заявки на сертифікацію двох нових моделей користувацьких терміналів. Перша заявка (SES-LIC-INTR2021-02141)

стосувалася компактного термінала з фазованою антенною решіткою розміром 29×48 см та потужністю передавача 2,44 Вт. Друга заявка (SES-LIC-INTR2021-03015) описувала високопродуктивний термінал HP ESIM, орієнтований на використання в морському, авіаційному та спеціалізованому транспорті. Для цієї моделі характерні підвищене антенне підсилення, покращена енергоефективність та збільшена механічна міцність конструкції.

У межах другої фази розвитку системи Starlink планується впровадження нового покоління терміналів із підтримкою не лише Ku-, але й Ka-діапазону частот. Це дозволить суттєво збільшити доступний частотний ресурс та підвищити пропускну здатність мережі.

Для каналу приймання передбачається використання смуги частот 2000–3650 МГц, а для каналу передавання – 500–2000 МГц. З урахуванням двох поляризацій сумарний доступний ресурс становитиме близько 7300 МГц для низхідних каналів та 4000 МГц для висхідних.

Нові термінали також матимуть можливість одночасного приймання кількох сигналів за допомогою багатопроменевої технології та передавання інформації в каналах шириною до 125 МГц. За попередніми оцінками, це дозволить досягати швидкостей передавання даних до 6 Гбіт/с.

Крім того, перспективні термінали оснащуватимуться інтелектуальними механізмами автоматичного налаштування та контролю радіочастотних параметрів, що дасть змогу мінімізувати взаємні завади з іншими супутниковими системами. У разі успішної реалізації цих технічних рішень мережа Starlink може стати конкурентоспроможною альтернативою сучасним мережам 5G та волоконно-оптичним системам ширококутового доступу.

3.3 Наземна інфраструктура Starlink: шлюзові станції

Ключовим елементом наземного сегмента системи Starlink є шлюзові станції (ШС), які забезпечують взаємодію між супутниковим угрупованням та глобальними телекомунікаційними мережами. Незважаючи на те, що найбільша кількість таких об'єктів розташована на території США, мережа шлюзових

станцій активно розширюється в інших регіонах світу відповідно до темпів розгортання супутникової системи.

Типова шлюзова станція являє собою комплекс, до складу якого входять дев'ять параболічних антен, розміщених під захисним радіопрозорим куполом. Окрім антенних пристроїв, на об'єкті встановлюються приймально-передавальні модулі, телекомунікаційне обладнання та засоби мережевої комутації. Передавання інформації до магістральних мереж здійснюється через волоконно-оптичні лінії зв'язку, а для підвищення надійності роботи окремі станції оснащуються резервними каналами зв'язку та автономними джерелами електроживлення.

Схему компонування антенної системи шлюзової станції наведено на рисунку 3.5, а її загальний зовнішній вигляд представлено на рисунку 3.6. У складі комплексу використовуються параболічні антени діаметром 1,47 м, які працюють від мережі змінного струму з напругою 220–230 В.

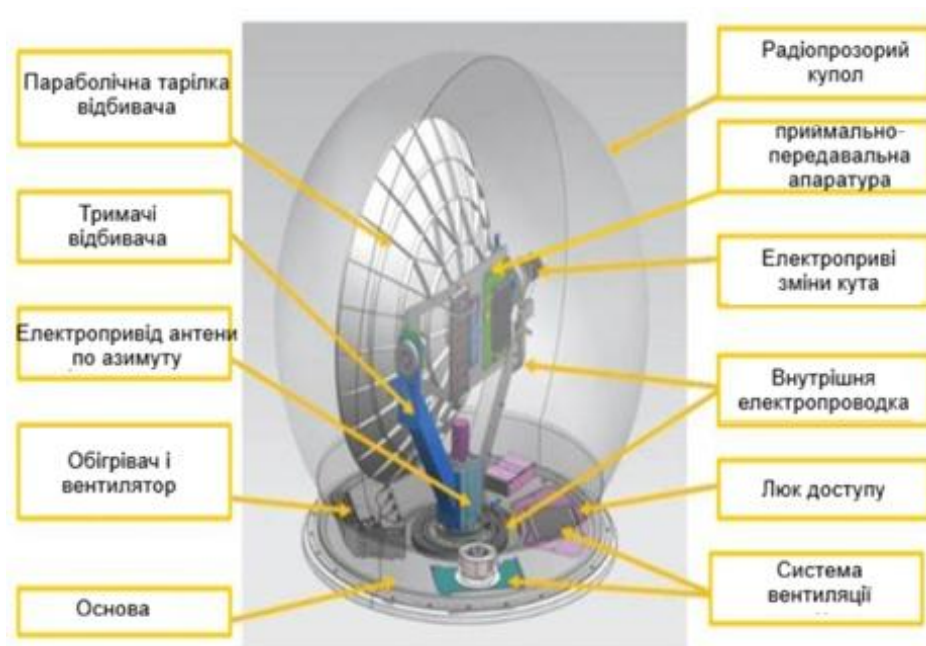


Рисунок 3.5 – Структурне компонування антенної системи шлюзової станції Starlink

Архітектура шлюзової станції передбачає можливість одночасної роботи із чотирма супутниками. Для підтримання безперервного з'єднання кожному космічному апарату призначаються дві антени: одна здійснює поточне

супроводження супутника, тоді як інша готується до переключення на наступний об'єкт у зоні видимості. Дев'ята антена використовується як резервна. Для мобільних варіантів шлюзових комплексів застосовується конфігурація з чотирьох антен, яка забезпечує одночасну взаємодію з двома супутниками.

Разом із тим використання подібних рішень на рухомих платформах, зокрема морських суднах або повітряних суднах, пов'язане з низкою технічних труднощів. Основними серед них є необхідність високоточної синхронізації в реальному масштабі часу та забезпечення постійного зв'язку з центром керування мережею. З цієї причини широкомасштабне впровадження мобільних шлюзових станцій наразі залишається обмеженим.

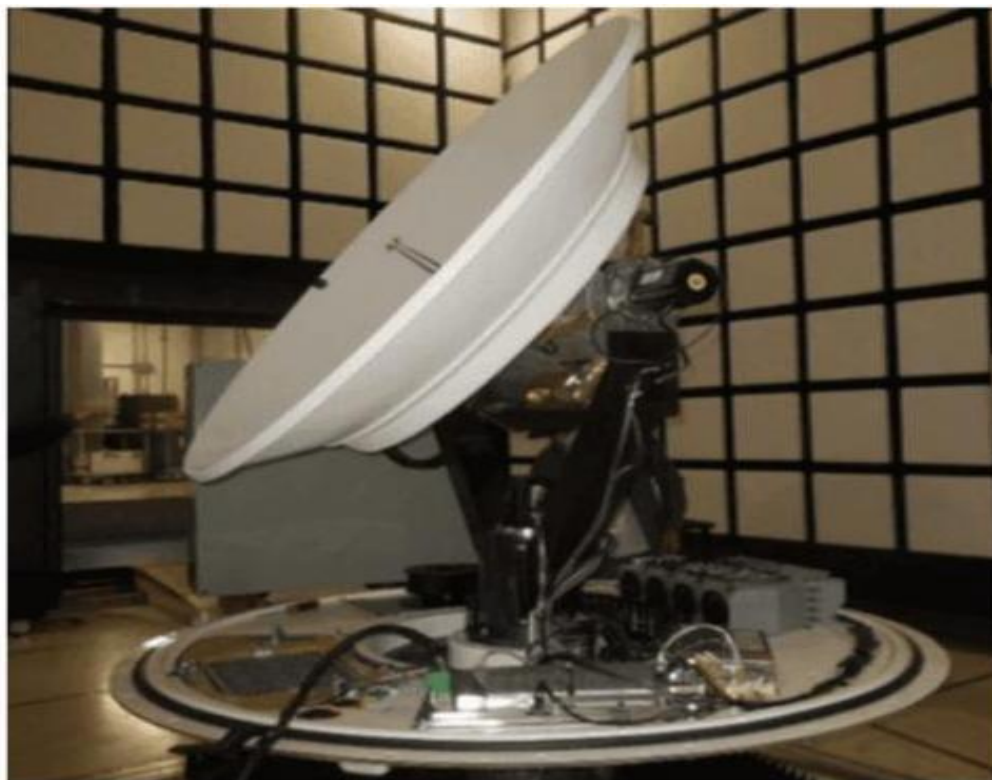


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд антени шлюзової станції Starlink [5]

Основні технічні параметри антенної системи наведено в таблиці 3.1. Використання параболічних антен замість фазованих антенних решіток обумовлене їх здатністю ефективно працювати при незначних кутах відхилення променя, що не перевищують приблизно 5° . Саме така особливість була зазначена в технічній документації та заявках компанії SpaceX.

Шлюзові станції інтегруються з наземною мережею через вузли присутності PoP (Point of Presence), які виконують функції проміжних центрів обробки та маршрутизації трафіку. З'єднання між шлюзовими станціями та вузлами PoP реалізується за допомогою волоконно-оптичних каналів зв'язку. Імовірно, у таких вузлах розміщується обладнання для моніторингу мережевих потоків, управління абонентськими сервісами, а також засоби забезпечення інформаційної безпеки. Крім того, програмне забезпечення цих центрів повинно відповідати вимогам законодавства США щодо законного контролю телекомунікаційних мереж (CALEA).

Інформаційні потоки, що надходять від шлюзових станцій, спочатку передаються до найближчого вузла PoP, після чого спрямовуються до великих центрів обміну інтернет-трафіком. Основні точки такої взаємодії розташовані в Лос-Анджелесі, Сіетлі, Орландо, Нью-Йорку, Сан-Хосе, Далласі та Вашингтоні. Одночасно компанія SpaceX здійснила реєстрацію власних блоків IP-адрес у низці країн, серед яких Австралія, Нова Зеландія, Канада, Велика Британія, Німеччина та Іспанія, що свідчить про подальше розширення глобальної мережевої інфраструктури системи Starlink.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики антенної системи шлюзової станції Starlink

Характеристика	Лінія «вгору»	Лінія «вниз»
Діаметр, м	1,5	
Площа рефлектора м ²	1,7	
Апертурна ефективність, %	42	
Максимальний робочий цикл передачі, %	100	
Довжина хвилі, м	0,01	
Робочі частоти	27,5–29,1 ГГц 29,5–30 ГГц	17,8–18,6 ГГц 18,8–19,3 ГГц
Розподіл каналів частоти	4 каналів по 500 МГц (всього 2 ГГц)	4 каналів по 500 МГц (всього 1,25 ГГц)
Мінімальна смуга каналу	62,5 МГц	250 МГц
Максимальна смуга каналу	500	250 МГц
Поляризація	Подвійна (кругова, лівого і правого напрямів обертань)	

Продовження таблиці 3.1

Максимальна швидкість передачі даних при використанні найбільш ємних сигналів QAM64 та роботі в обох поляризаціях)	до 4000 Мбіт/ с на смугу 500 МГц	до 2000 Мбіт/ с на смугу 250 МГц
Типова швидкість передачі даних (при роботі в обох поляризаціях)	до 3200 Мбіт/ с на смугу 500 МГц	до 1600 Гбіт/ с на смугу 250 МГц
Символьна швидкість	до 480 Мсимв /с	-
Тип модуляції несучою	QPSK, M-QAM (До 64QAM)	
Максимальна густина ЕІМ	33,7 дБВт /МГц (або еквівалент . 9,7 дБВт /4 кГц)	-
Максимальна ЕІМ	66,5 дБВт	-
Коефіцієнт підсилення антени	-3дБі (у лінії горизонту)	46,9 дБі (на частоті 19 ГГц)
Потужність передавача	50 Вт	-
Питома випромінювана потужність на поверхні антени, мВт/см ²		
Загальна випромінювана потужність	66,5 дБВт	-
Максимальне ізотропне підсилення антени	49,5 дБВт на частоті 29 ГГц	-
Мінімальна потужність, подана на передаючу антену	0,8 дБВт на канал 500 МГц	-
Максимальна потужність, подана на передаючу антену	11 дБВт на канал 500 МГц	-
Мінімальна спектральна густина потужності	-86 дБВт /Гц	-
Максимальна спектральна густина потужності	-76 дБВт /Гц	-
Ширина ДНА по лінії 3 дБ	0,5°	0,8° -
Ширина ДНА по половині потужності	-	0,8°(на частоті 19 ГГц)
Мінімальний кут	25°	
Коефіцієнт C/N в умовах ясного неба	19 дБ	

Для забезпечення функціонування мережі Starlink компанія зареєструвала дві автономні системи (AS): AS14593 та AS27277, причому друга, ймовірно,

використовується для внутрішніх корпоративних потреб. Для організації наземного транспортного сегмента мережі Starlink переважно використовує інфраструктуру компанії Google, яка є одним зі стратегічних партнерів та інвесторів SpaceX (рис. 3.7).

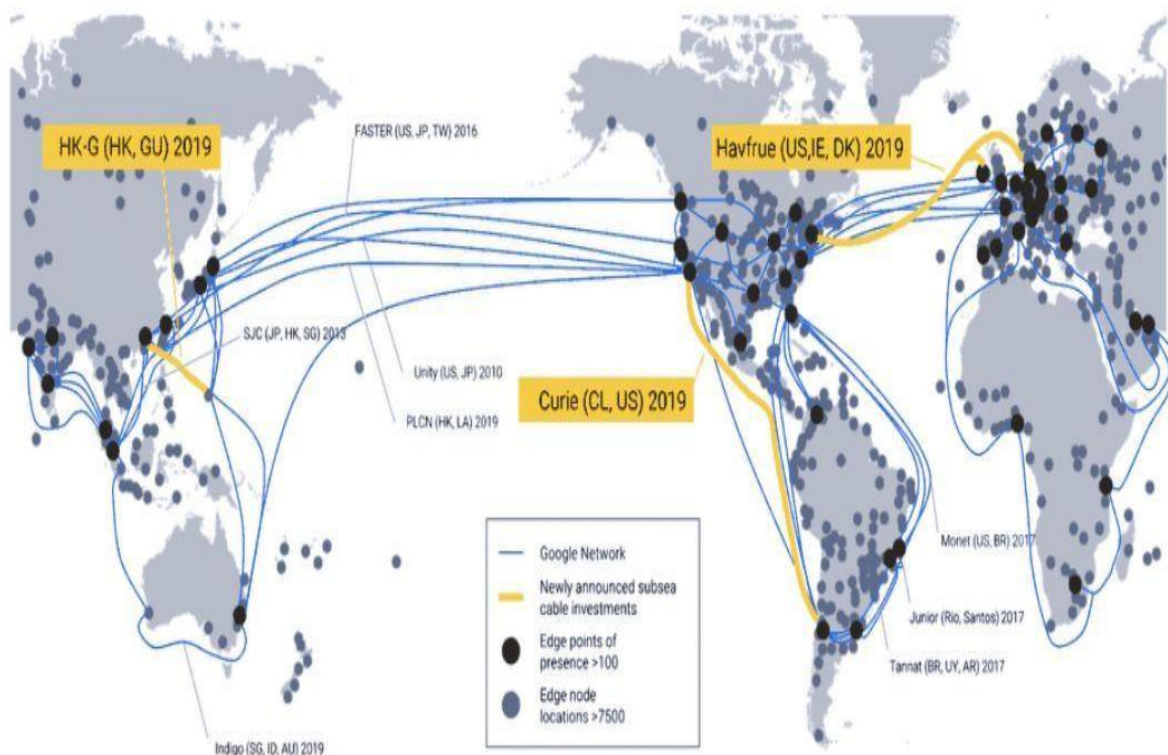


Рисунок 3.7 – Наземна мережа Google

У перспективі значна частина шлюзових станцій планується до розміщення поблизу вузлів присутності (PoP) мережі Google, що дозволяє зменшити витрати на створення та обслуговування наземної інфраструктури. Водночас нормативно-правові вимоги окремих держав обмежують можливість розміщення таких об'єктів у великих телекомунікаційних центрах. У подібних випадках шлюзові станції встановлюються у віддалених або важкодоступних районах із використанням власних чи орендованих волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Для розподілу адресного простору Starlink також використовує мережу AS36492 (GOOGLEWIFI), яка традиційно застосовується для надання послуг бездротового доступу до мережі Інтернет. Через цю інфраструктуру здійснюється анонсування частини IP-адрес, що використовуються абонентами

системи Starlink.

Приклади виділених адресних блоків Starlink наведено нижче:

Австралія та Нова Зеландія:

- IPv4: 103.152.126.0/24, 103.152.127.0/24;
- IPv6: 2406:2d40:1000::/36, 2406:2d40::/36.

Канада:

- IPv4: 143.131.2.0/24 – 143.131.7.0/24.
- Європа:
- Іспанія (Мадрид): 162.43.192.0/24, 162.43.193.0/24;
- Велика Британія (Лондон): 176.116.124.0/24, 176.116.125.0/24;
- Німеччина (Франкфурт): 188.95.144.0/24, 188.95.145.0/24.

Розвиток шлюзових станцій у межах Generation 2. У рамках другого покоління системи Starlink (Generation 2) передбачається суттєве розширення використовуваного частотного ресурсу. Окрім традиційних діапазонів Ku та Ka, планується впровадження E-діапазону (60–90 ГГц), що дозволить значно збільшити пропускну здатність фідерних каналів зв'язку (таблиця 3.2).

Використання E-діапазону забезпечує суттєве розширення доступної смуги частот. Для порівняння, у Ku-діапазоні ширина смуги для висхідного каналу становить близько 500 МГц, тоді як в E-діапазоні цей показник може досягати 5000 МГц. Завдяки цьому очікується істотне зростання пропускну здатності шлюзових станцій, що є необхідною умовою для обслуговування збільшеної кількості супутників та абонентів у рамках подальшого розширення орбітального угруповання Starlink.

Центр управління та моніторингу мережі Starlink. Значна частина частотного ресурсу, який планується використовувати в системі Starlink, уже задіяна різноманітними радіорелейними лініями зв'язку та радіомостами, кількість яких оцінюється приблизно у 19 тис. пристроїв. У зв'язку з цим під час розгортання супутникового угруповання компанія SpaceX повинна виконувати детальні розрахунки електромагнітної сумісності для мінімізації взаємних радіоперешкод.

Таблиця 3.2 – Передбачуваний частотний план шлюзових станцій Starlink після впровадження фази Generation 2

Тип каналу зв'язку та напрямок прийому-передачі	Діапазони частот ГГц	Доступно МГц в однієї поляризації	Кількість поляризацій	Загальна кількість доступних екв . МГц
лінія «вгору» ШС – КА	27,5–29,1 29,5–30 81–86	1600 500 5000	2	14200
лінія «вниз» КА – ШС	17,8–18,6 18,8–19,3 71–76	800 500 5000	2	12 600

Усі функції координації зв'язку, розподілу частотних ресурсів та управління якістю обслуговування в мережі Starlink покладені на Центр моніторингу та управління мережею (NCMC – Network Control and Management Center), розташований у Redmond, штат Вашингтон, США.

Основними завданнями NCMC є:

- контроль і синхронізація роботи шлюзових станцій та абонентських терміналів;
- підтримання єдиної часової шкали в межах системи;
- індивідуальний розподіл частотних ресурсів між супутниками;
- управління мережевим трафіком, моніторинг функціонування системи та збір телеметричної інформації;
- забезпечення необхідного рівня якості обслуговування та виконання розрахунково-облікових операцій.

Для забезпечення безперервного функціонування глобальної супутникової мережі компанія SpaceX реалізувала багаторівневу систему управління та контролю. Така архітектура забезпечує оперативне виявлення технічних несправностей, ефективний розподіл ресурсів та підтримання стабільності роботи всієї мережі.

Відповідно до вимог Федеральної комісії зі зв'язку США (FCC), контроль стану кожної шлюзової станції та абонентського терміналу здійснюється з

періодичністю 100 мс. Настільки висока частота моніторингу дозволяє оперативно виявляти відхилення в роботі обладнання та своєчасно формувати керувальні команди.

Моніторинг наземної інфраструктури виконується безпосередньо через транспортну мережу, тоді як контроль абонентських терміналів реалізується за допомогою службових пакетів даних, що передаються супутниковими каналами зв'язку.

Згідно з опублікованими даними SpaceX, кожні 15 с система визначає найбільш придатний супутник для обслуговування терміналів у конкретному регіоні. Цю функцію виконує центр NCMC, який формує оптимальний план використання супутникових ресурсів з урахуванням орбітального положення космічних апаратів, їхнього технічного стану та можливих радіочастотних завад з боку інших супутникових систем. Такий підхід сприяє рівномірному розподілу навантаження та зменшенню затримок під час маршрутизації трафіку.

Центр управління польотами та випробувальна інфраструктура. Контроль орбітального руху супутників, їхніх технічних параметрів, маневрування та загальної ефективності функціонування здійснюється Центром управління польотами (ЦУП). Центр передає керувальні команди космічним апаратам та приймає телеметричну інформацію через чотири спеціалізовані телеметричні станції, що працюють у діапазонах Ku та Ka.

У середньому канали телеметричного зв'язку з кожним супутником активні приблизно 2,5 години на добу, тоді як сумарний час прийому телеметричної інформації становить близько 60 хвилин на добу.

Для перевірки надійності та працездатності мережі компанія SpaceX створила спеціалізовану випробувальну інфраструктуру, яка включає шість стаціонарних та три мобільні тестові станції. Їх призначенням є оцінювання характеристик системи Starlink у різних кліматичних та географічних умовах експлуатації.

Стаціонарні випробувальні майданчики розміщені у ключових технологічних центрах компанії. Зокрема, у штаті California функціонують

випробувальні об'єкти в Hawthorne, де розташований головний офіс SpaceX, а також у Fremont, де знаходиться штаб-квартира Tesla. На цих майданчиках здійснюються випробування телекомунікаційного обладнання та перевірка сумісності різних технологічних рішень.

У штаті Texas важливими об'єктами є випробувальний полігон у McGregor, де проводяться випробування ракетних двигунів і супутникового обладнання, а також інженерний комплекс у Brownsville, призначений для розроблення та тестування нових інженерних рішень.

У штаті Вашингтон функціонують інженерний центр у Redmond та комплекс мережевої інфраструктури в Brewster, які використовуються для дослідження та вдосконалення наземного й супутникового сегментів системи зв'язку.

Окрім стаціонарних об'єктів, компанія застосовує три мобільні випробувальні комплекси Broadband Test Van 1, 2 та 3. Ці пересувні лабораторії призначені для оцінювання якості інтернет-з'єднання, перевірки зон покриття та аналізу надійності роботи системи в реальних умовах експлуатації. Результати таких випробувань використовуються для подальшої оптимізації та розвитку технологій супутникового зв'язку Starlink.

3.4 Розрахунок основних параметрів starlink

Розрахуємо основні технічні параметри системи супутникового зв'язку Starlink та аналізуємо їх вплив на ефективність системи. Розрахунки проводилися на основі технічних характеристик та орбітальних показників діючих супутників Starlink.

Загальна пропускна здатність супутникової системи залежить від використовуваної смуги частот та спектральної ефективності:

$$C = B \cdot \eta, \quad (3.1)$$

де B – ширина смуги частот, тобто діапазон частот, де може передаватися сигнал;

η – спектральна ефективність (біт/Гц) – показує скільки інформації можна передати за одну секунду на один Герц смуги частот.

Для Starlink вказані два напрямки зв'язку:

1. Висхідна лінія (uplink) – передача сигналу від користувача до супутника: $B_{up} = 500 \text{ МГц}$ – верхня смуга частот каналу; $\eta_{up} = 3,5 \text{ біт/Гц}$.

2. Нисхідна лінія (downlink) – передача сигналу від супутника до користувача: $B_{down} = 2000 \text{ МГц}$ – смуга нижніх частот; $\eta_{down} = 5,5 \text{ біт/Гц}$.

Таким чином, загальна пропускна здатність для кожної лінії розраховується через перемноження ширини смуги і спектральної ефективності:

uplink:

$$C_{up} = 500 \cdot 10^6 \cdot 3,5 = 1,75 \cdot 10^9 \text{ біт/с} = 1,75 \text{ Гбіт/с}$$

downlink:

$$C_{down} = 2000 \cdot 10^6 \cdot 5,5 = 11 \cdot 10^9 \text{ біт/с} = 11 \text{ Гбіт/с}$$

Зона покриття і кількість супутників. Система Starlink станом на березень 2026 року складається з 10200 супутників, розміщених у 72 орбітальних площинах, найближчим часом має зрости до 15 тисяч.

Кожен супутник має середню площу покриття на Землі $S_{sell} = 379 \text{ км}^2$. Відповідно всі супутники охоплюють територію:

$$S = S_{sell} \cdot N = 379 \cdot 10200 = 3\,865\,800 \text{ км}^2, \quad (3.2)$$

де N – це загальна кількість супутників у системі.

Радіус покриття антени на поверхні Землі визначається за виразом:

$$R = h \cdot \tan(\theta) = 379 \cdot 10200 = 3\,865\,800 \quad (3.3)$$

де h – висота орбіти;

θ – кут спрямованості антени.

Напрямок антени $\theta = 25^\circ$, а висота орбіти $h = 550 \text{ км} = 550\,000 \text{ м}$. Звідси

радіус покриття антени:

$$R = h \cdot \tan(\theta) = 550 \cdot \tan(25) \approx 256,5 \text{ км.}$$

Час орбітального обертання визначаємо за виразом (4.4):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(R_{\text{earth}} + h)^3}{G \cdot M}} \quad (3.4)$$

де R_{earth} – радіус Землі $R_{\text{earth}} = 6371 \text{ км} = 6371000 \text{ м}$;

h – висота орбіти супутника: 550 км або 550 000 м;

G – гравітаційна стала: $6,67430 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$;

M – маса Землі: $5,972 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Після підстановки значень отримаємо:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(6371000 + 550000)^3}{6,67430 \cdot 10^{-11} \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}} = 5730 \text{ с} = 95,5 \text{ хв.}$$

Споживання потужності кожного супутника за добу:

$$E = P \cdot t = 50 \cdot 24 = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{год}, \quad (3.5)$$

де P – потужність, яку споживає супутник, 50 Вт;

t – час, 24 год.

Відношення сигнал/шум (SNR) в каналі супутникової зв'язку визначається за виразом:

$$SNR = \frac{P_r}{N} = \frac{P_t \cdot G_r \cdot G_t \cdot \lambda}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot N}, \quad (3.6)$$

де P_r – прийнята потужність сигналу на антені приймача;

P_t – передана потужність сигналу з антени передавача, приймаємо 20 Вт (реалістичне значення);

G_r , G_t – коефіцієнти посилення передавальної та приймаючої антен

відповідно;

λ – довжина хвилі радіосигналу;

d – відстань між антенами;

N – потужність шуму в каналі передачі, 10^{-13} Вт.

Відстань до супутника (орбіта): 550 км. Робоча частота Ku-діапазону: 12 ГГц тобто довжина хвилі $\lambda \approx 0,025$ м. Антени з підсиленням як в Starlink: 35 дБ – 3162 для передавальної та приймальної антен.

Підставивши значення отримаємо:

$$SNR = \frac{20 \cdot 3162 \cdot 3162 \cdot 0,025}{(4\pi)^2 \cdot 550000^2 \cdot 10^{-13}},$$

$$SNR_{dB} \approx 44,2 \text{ дБ.}$$

Розрахунок відношення сигнал/шум (SNR) показав дуже хороший результат: 44 дБ, що відповідає якісному та надійному супутниковому зв'язку Starlink.

Програмна реалізація обчислень здійснювалася в середовищі MATLAB. На рисунку 3.8 наведено розраховану пропускну здатність супутникової системи зв'язку Starlink: Uplink (висхідна лінія зв'язку) – 1,75 Гбіт/с; Downlink (нисхідна лінія зв'язку) – 11,0 Гбіт/с.

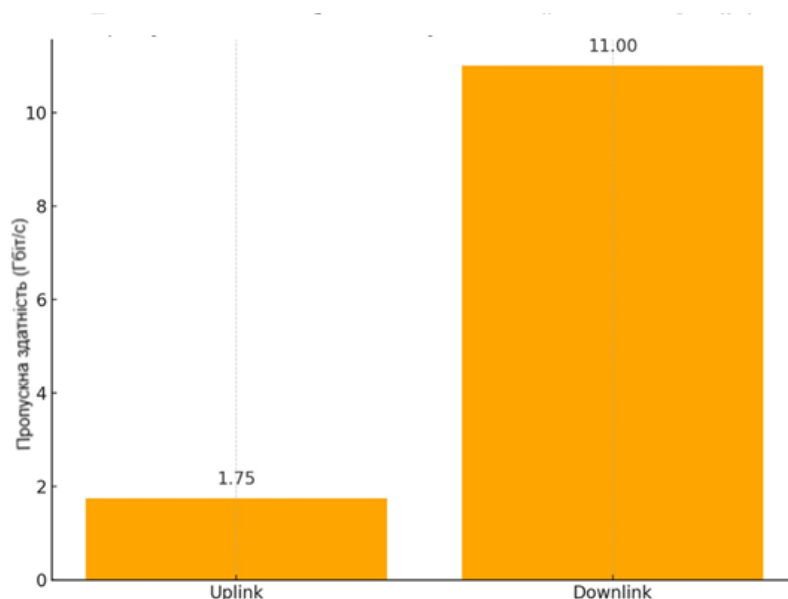


Рисунок 3.8 – Порівняння пропускну здатності висхідної на нисхідної лінії зв'язку Starlink

Розраховані основні параметри супутникової системи зв'язку Starlink показують, що Starlink демонструє високу пропускну здатність, зону покриття, орбітальний час та енергоефективність. Ці дані є основою для інженерного аналізу, проєктування та подальшої оптимізації системи.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасних супутникових систем зв'язку та визначено основні тенденції розвитку низькоорбітальних супутникових мереж, спрямованих на забезпечення широкосмугового доступу до мережі Інтернет. Встановлено, що використання низьких навколоземних орбіт дозволяє суттєво зменшити затримку передачі даних та підвищити якість послуг порівняно з традиційними геостаціонарними системами.

2. Досліджено особливості побудови орбітального угруповання Starlink, принципи формування зон покриття та організації супутникових каналів зв'язку, що забезпечують високу пропускну здатність і глобальне покриття мережі. Визначено основні технічні та експлуатаційні виклики системи, серед яких обмеженість частотного ресурсу, ризики утворення космічного сміття, забезпечення електромагнітної сумісності.

3. Проаналізовано технічні характеристики абонентських терміналів Starlink та наземної інфраструктури системи, зокрема шлюзових станцій і центрів управління мережею, що забезпечують стабільне функціонування Starlink.

4. Виконано оцінку пропускну здатності системи Starlink з урахуванням параметрів супутникових та абонентських каналів зв'язку. Отримані результати підтвердили можливість забезпечення високошвидкісного широкосмугового доступу до мережі Інтернет, а також показали перспективність подальшого збільшення пропускну спроможності мережі за рахунок використання нових частотних діапазонів, міжсупутникових лазерних каналів та вдосконалення абонентських терміналів.

5. Проведено аналіз основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть виникати під час монтажу, технічного обслуговування та експлуатації обладнання систем широкосмугового бездротового доступу та рекомендовано комплекс організаційних і технічних заходів щодо забезпечення безпечних умов праці під час виконання робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amazon Kuiper Project. Technical White Paper. URL: <https://www.aboutamazon.com/kuiper> (дата звернення: 15.04.2026 р.).
2. Arapoglou P.-D., Guidotti A., Vanelli-Coralli A. LEO Satellite Networks for 5G and Beyond: A Review from a System Perspective . IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 51231–51254.
3. Bhattacharjee D., Singla A. Networked Systems Challenges in LEO Satellite Internet. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2023. Vol. 53(2). P. 42–49.
4. Del Portillo I., Cameron B., Crawley E. A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband. Acta Astronautica. 2022. Vol. 159. P. 123–135.
5. European Space Agency. Space Debris Environment Report 2024. Paris: ESA, 2024.
6. Federal Communications Commission (FCC). Regulatory Framework for Low Earth Orbit Satellite Networks. Washington DC, 2021.
7. Handley M. Delay is Not an Option: Low Latency Routing in Space-Based Internet Systems. Proceedings of ACM HotNets. 2022.
8. ITU-R S.1503-3. Technical and operational requirements for non-geostationary satellite systems. Geneva: ITU, 2021.
9. Kodheli O., Lagunas E., Maturo N., Sharma S. Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges. Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 24, No. 4. P. 2458–2488.
10. Maral G., Bousquet M., Sun Z. Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology. 7th ed. Wiley, 2023. 1060 p.
11. National Aeronautics and Space Administration. Space Communications and Navigation Program Annual Report 2024.
12. Pratt T., Bostian C., Allnutt J. Satellite Communications. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2022. 784 p.
13. SpaceX Official Website. Starlink Technical Overview. URL:

<https://www.spacex.com/starlink> (Дата звернення: 15.03.2026 р.).

14. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 3rd ed. Pearson, 2022.

15. Барабаш О. В., Романенко Є. О. Основи супутникового зв'язку та навігації. Київ: НАУ, 2022. 286 с.

16. Беркман Л. Н., Кравченко В. І. Супутникові телекомунікаційні системи. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 312 с.

17. Величко В. В., Погребняк С. С. Сучасні бездротові телекомунікаційні технології. Харків: ХНУРЕ, 2024. 354 с.

18. Конахович Г. Ф., Литвиненко О. І. Телекомунікаційні мережі та системи. Київ: Ліра-К, 2023. 428 с.