

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

**на тему: «АНАЛІЗ РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ LEO ДЛЯ
ЗАСТОСУВАННЯ В МЕРЕЖАХ НАСТУПНИХ ПОКОЛІНЬ»**

Виконав: студентб курсу, групи РТДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Сподарцев І.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Макаренко А. О.

(прізвище та ініціали)

Київ – 2022

3. Проект Starlink.

5. Перелік графічного матеріалу (слайдів презентації):

6. Дата видачі завдання: 1.10.2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури		
2.	Аналіз напрямів розвитку супутникових систем, класифікація та основні параметри		
3.	Інновації в області супутникового інтернету та телебачення		
4.	Розбір, дослідження процесу хендовера для проекту «Starlink»		
5.	Висновки, вступ, реферат		
6.	Розробка презентації		

Студент

Сподарцев І.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Кременецька Я.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Сподарцева Іллі Миколайовича

на тему: “Аналіз розвитку супутникових систем LEO для застосування в мережах наступних поколінь”

Актуальність:

Магістерська робота присвячена аналізу розвитку супутникових систем LEO для застосування в мережах наступних поколінь. Дослідження в технологіях супутникового зв'язку для надання послуг мобільного зв'язку, телебачення та інтернету є предметом досліджень, та інтенсивних інвестицій для реалізації нових великих супутникових угруповань, а також тих, що знаходяться на ранніх стадіях розгортання.

Позитивні сторони:

Проведено аналіз актуальності супутникового інтернету та супутникового телебачення. Проведений розрахунок параметрів космічної орбіти, що впливають на процес хендвера між супутниками LEO. Проведені дослідження свідчать про високий науково-технічний рівень використання телекомунікаційних технологій в даному дослідженні. Робота викладена науковою мовою, логічно й послідовно відбиває мету та поставлені в роботі завдання. Пояснювальна записка відповідає стандартам до її оформлення.

Недоліки:

1. В роботі забагато обзорного матеріалу за проектом Starlink.
2. На стор. 75 в Табл.4.7 недостатньо обґрунтовано наведено технологічні параметри.

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку “**відмінно**”, а студент Сподарцев Ілля Миколайовича - присвоєння кваліфікації “**Інженер стільникового мережевого зв'язку, викладач вищих навчальних закладів**”.

Якість проекту (роботи)	
Виконано на замовлення підприємства	
Виконано за тематикою НДР	
Виконано з макетом	
Виконано з застосуванням ЕОМ	
МПТ	
Має практичну цінність	
Проект-частина комплексної теми	

Підпис рецензента

Підпис

засвідчую

Підпис особи, що засвідчує

(

М.П.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Направляється студент Сподарцев І.М. до захисту магістерської роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

на тему: Аналіз розвитку супутникових систем LEO для застосування в мережах наступних поколінь

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту _____

(підпис)

Кравченко В.І.

(прізвище та ініціали)

Довідка про успішність

Сподарцев І.М. за період навчання в Навчально-науковому інституті телекомунікацій,
(прізвище та ініціали)
з 21 року до 21 року повністю виконав (ла) навчальний план за напрямом підготовки, спеціальністю з таким розподілом оцінок за:
національною шкалою: відмінно _____%, добре _____%, задовільно _____%;
шкалою ECTS: A _____%; B _____%; C _____%; D _____%; E _____%.

Провідний фахівець інституту _____

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Висновок керівника магістерської роботи

Студент Сподарцев Ілля Миколайовича показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння аналізувати тенденції розвитку супутникових систем LEO для застосування в мережах наступних поколінь, технологічні особливості реалізації, проводити розрахунки, що впливають на процес хендвера між супутниками LEO, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою в тому числі рекомендаціями МСЕ. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Магістерська робота виконана на високому рівні і заслуговує оцінку “відмінно”, а студент

Сподарцев Ілля Миколайович - присвоєння кваліфікації “Інженер стільникового мережевого зв’язку, викладач вищих навчальних закладів”.

Керівник роботи _____

(підпис)

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

“ ”

_____ 202_ року

Висновок кафедри про магістерську роботу

Магістерську роботу розглянуто. Студент _____

Сподарцев І.М.

(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Державній екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Мобільних та відеоінформаційних технологій _____

(підпис)

Руденко Н.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 84 с., 32 рис., 14 табл., 21 дж.

Об'єкт дослідження – напрямки розвитку супутникових технологій та перспективи реалізації супутникових групувань LEO.

Предмет дослідження аналіз прогнозованої пропускної здатності супутників LEO та процесу хендовера між супутниками Starlink.

Мета роботи – теоретичний аналіз геометричної інтерпретації та підтвердження процесу хендовера між супутниками для забезпечення безперебійних послуг.

Метод дослідження – на основі теоретичного дослідження, порівняльного аналізу характеристик та розрахунків параметрів супутникових угруповань.

В магістерській роботі проведено аналіз напрямків розвитку супутникових технологій для телекомунікаційних систем наступних поколінь. Досліджено технологічні особливості реалізації супутникових групувань LEO. Зроблено порівняння сучасних проектів супутникових угруповань за розгортанням та наданням послуг. Проведений розрахунок параметрів космічної орбіти, що впливають на процес хендовера між супутниками LEO. Надана геометрична інтерпретації та підтвердження процесу хендовера між супутниками для забезпечення безперебійних послуг.

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ, ІНТЕРНЕТ, STARLINK, СУПУТНИКОВЕ ТЕЛЕБАЧЕННЯ, НИЗЬКООРБИТАЛЬНІ СУПУТНИКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ; ХЕНДОВЕР; LEO; STARLINK; ЗАТРИМКА СИГНАЛУ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 РОЗВИТОК СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ	10
1.1 Основні події в розвитку супутникових систем зв'язку	10
1.2 Основні параметри супутникових угруповань	11
1.3 Класифікація супутникових орбіт за нахилом до площини екватора .	16
1.4 Класифікація супутникових орбіт за висотою	19
1.5 Енергетичні рівняння лінії зв'язку між наземною та бортовою антеннами	21
1.6 Поглинання енергії сигналів в атмосфері	26
2 СУПУТНИКОВЕ ТЕЛЕБАЧЕННЯ.....	30
2.1 Історія супутникового телебачення.....	30
2.2 Глобально про телебачення	32
2.3 Актуальність супутникового телебачення у наш час.	34
3 СУПУТНИКОВИЙ ІНТЕРНЕТ	38
3.1 Розквіт та застій супутникового інтернету	38
3.2 Як зараз працює супутниковий інтернет.....	45
4 ПРОЕКТ STARLINK.....	49
4.1. Народження проекту Starlink	49
4.2. Основні події проекту Starlink	51
4.3 Цілі та вартість проекту	57
4.4 Склад угруповання Starlink	58
4.5 Архітектура мережі Starlink	62
4.6 Космічний сегмент.	64
4.7 Моделювання параметрів орбітальних оболонок сузір'я супутників Starlink.....	70
4.7. 1 Визначення площини горизонту, похилої дальності зв'язку, затримки сигналу супутника LEO	70
4.7.2 Розрахунок зони покриття.....	74
4.7.3 Порівняння параметрів супутників трьох орбітальних оболонок сузір'я Starlink	76
ВИСНОВКИ	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	79
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AOS	Отримання супутника
GEO	Геостаціонарна орбіта
IHPW	(англ. ideal horizon plane wideness) Ідеальна ширина площини горизонту
LEO	Низьковисотна не геостаціонарна орбіта
LOS	Втрата супутника
MANET	Мобільна однорангова мережа
MEO	середньовисотня не геостаціонарна орбіта.
ДЧ	Діапазон частот
ЗС	Земна станція
ЕІВП	еквівалентна ізотропна випромінювана потужність
КА	Космічний апарат
ССЗ	Системи супутникового зв'язку
ЩПП	Щільність потоку потужності

ВСТУП

Інформація є найважливішою частиною мовного світу, що оточує нас всюди. Сьогодні у поширенні інформації та її актуальності не сумнівається ніхто. Важлива роль поширенні інформації приділяється супутниковим телекомунікаціям. Телекомунікації є найбільшим і потрібним засобом масової інформації в нинішній сучасній Україні. Вони забезпечують суспільство України інформацією, яка впливає на культурну інформаційну ситуацію у українському суспільстві.

Телекомунікації розвивають суспільство, заповнюють його дозвілля, а також інформують про події в країні, розважають, а також дає змогу самостійно навчатися і пізнавати себе та навколишній світ. Телекомунікації головним чином впливають на духовні цінності суспільства, стиль світосприйняття людей, весь лад мислення, на культуру нашого часу.

Перші телекомунікаційні системи розподілу та передачі інформації будувалися за рахунок зв'язку телекомунікаційних центрів з допомогою радіорелейних ліній і кабелів. Це були складні, надзвичайно дорогі та примхливі системи. А для найбільших країн світу у минулому, це був просто глухий шлях.

Поява супутників Землі дала технічну основу для дуже ефективного вирішення проблеми створення великих та навіть глобальних систем зв'язку та мовлення. А використання супутникових систем LEO дозволяє підвищити ефективність вирішення різних задач.

На жаль у наш час швидкість передачі інформації через супутниковий зв'язок поступається кабельному та у деяких випадках навіть стільниковому зв'язку. Але не можна не зауважити що супутниковий зв'язок досі допомагає отримувати телекомунікаційні послуги у будь якій точці планети.

Крок, зроблений SpaceX, розгортаючи сузір'я LEO Starlink, щоб охопити Землю супутниками для повсюдних широкосмугових послуг, є гігантським технологічним кроком для всесвітньої рівності людей, але з багатьма проблемами, з якими доведеться зіткнутися в майбутньому. В проекті Starlink запрогнозовано

забезпечити надійний всесвітній широкосмуговий зв'язок із низькою затримкою до декілька десятків мілісекунд

Тому своєчасним є провести аналіз актуальності супутникового інтернету та супутникового телебачення, розрахунок параметрів космічної орбіти, що впливають на процес хендовера між супутниками LEO, проаналізувати поведінку супутника в космосі в межах кожної орбітальної оболонки Starlink.

1 РОЗВИТОК СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ

1.1 Основні події в розвитку супутникових систем зв'язку

Ідея створення супутникових систем зв'язку з'явилася ще в 1945 р. Однак, реалізація таких систем стала можливою з появою балістичних ракет, за допомогою яких 4 жовтня 1957 на орбіту був запущений перший штучний супутник Землі. Найбільш розвиненим і пріоритетним видом послуг поки залишається супутникове мовлення з використанням геостаціонарної орбіти. У 90-х роках минулого століття з'явилася ідея супутникового телефону з безперервним зв'язком. Першими проектами став Iridium, GlobalStar, Ico і Teledesic, які збанкрутували після початку надання послуг, так як стільникові системи мобільного зв'язку виявилися більш ефективними й економічними. Стандарт глобального зв'язку GSM підкорив світ. З розвитком телекомунікаційних технологій і послуг з'явилися вимоги до збільшення пропускної здатності та покриття. Тому глобальні системи зв'язку потребують вирішення, яке буде підтримувати пропускну здатність, аналогічну для багатонаселених міст. Одним з таких рішень є відродження та реалізація нових проектів супутникових систем. Kuiper від Amazon, Starlink від SpaceX і OneWeb - це три проекти угруповання супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO) наступного покоління, які в даний час розробляються, і всі вони обіцяють забезпечити високошвидкісне широкосмугове з'єднання з малою затримкою по всьому світу. У проекті Starlink, в який інвестує Google, вже на першому етапі рахунок супутників піде на тисячі. Згідно з останніми планами, спочатку планується вивести 4425 КА, які будуть працювати в Ku- і Ka-діапазонах, на орбіту висотою 1100 км, 1325 на висоту 550 км. Другим етапом стане виведення більше 7500 апаратів на висоту 340 км. Ці сателіти почнуть віщати в V-діапазоні (40 ГГц - 75 ГГц). Першими випробувати сервіс зможуть жителі США і Канади, а повноцінне розгортання почнеться до 2021 року. Після запуску чергової групи супутників

компанія SpaceX почала прийом заявок на підключення до інтернету Starlink. Швидкість доступу сягатиме 1 Гбіт/с, що відповідає стандарту 5G. Проект Kuiper від Amazon - самий новий учасник цього міксу. Компанія отримала схвалення FCC на свій план в кінці серпня. Amazon заявила, що планує розгорнути 3236 супутників та забезпечити супутниковий широкопasmовий зв'язок по всій території США. Поки проводяться закриті бета-тестування Starlink в ряді регіонів США, серед співробітників SpaceX. Судячи зі звітів, пропускна швидкість вже досягла 100 Мбіт/с.

У зв'язку з нещодавнім швидким розвитком супутникових технологій і засобів запуску супутників, створення мега групування LEO (тобто з сотнями або навіть тисячами супутників) для забезпечення високопродуктивного доступу в Інтернет з глобальним покриттям стає реальністю. Мобільна однорангова мережа (MANET) - це тип безпроводової мережі, що самостійно налагоджуються, з високою гнучкістю і високою мобільністю. Таким чином, комбінація супутникових мереж, особливо мега сузір'їв LEO, і MANET зможе надати комплексні послуги доступу в Інтернет будь-якій людині в будь-якому місці в будь-який час. Основним завданням для реалізації супутникового інтернету є створення повністю інтегрованих супутникових і наземних мереж.

1.2 Основні параметри супутникових угруповань

Однією з найважливіших характеристик системи супутникового зв'язку є зона покриття. У загальному випадку зону покриття визначають як частину поверхні земної кулі (або частина зони видимості), в межах якої забезпечується рівень сигналів від супутника, необхідний для їх прийому з заданою якістю, а також гарантується здатність прийому на вході КА сигналів від земної станції, яка має певними параметрами (певної ЕІВП). Найбільш широко поширені на практиці зони покриття: глобальні (вся видима з КА частина поверхні Землі при малій

нерівномірності посилення бортовий антени, ширина променя антени КА при цьому становить близько $17,4^\circ$ для кута приходу 0°); напівглобальні; зональні. Побудова зони покриття КА на мапі складається з чотирьох етапів. Розглянемо побудову зони покриття КА на прикладі геостаціонарного супутника. На першому етапі визначають зону видимості. Для цього необхідно вирішити геометричну задачу визначення кута місця для земної станції в певній точці земної поверхні. Кут місця θ визначається виразом

$$\theta = \arcsin \frac{K \cos \psi_0 - 1}{\sqrt{1 + K^2 - 2K \cos \psi_0}}, \quad (1.1)$$

де $K = (R_3 + h)/R_3$ - співвідношення радіуса орбіти КА та радіуса Землі R_3 (для геостаціонарної орбіти $K \approx 6,61$), ψ_0 - центральний кут; h - висота орбіти (для геостаціонарної орбіти $h = 35\,786$ км).

Для кута місця рівного $\theta = 0^\circ$ умовою видимості супутника є нерівність

$$\cos \varphi_{3c} \cos \Delta\lambda \geq 0,151, \quad (1.2)$$

де φ_{3c} - широта земної станції (ЗС); $\Delta\lambda$ - різниця довгот ЗС і підсупутникової точки КА.

Однак через негативний вплив ефектів атмосферного походження, через інтерференції прямого сигналу від КА з сигналом, відбитим від Землі, а також впливу на антену шумів Землі через головний пелюсток її діаграми спрямованості рекомендується обмежувати кути місця антени ЗС величиною 5° і більше. Тоді співвідношення (1.1) набуде вигляду

$$\cos \varphi_{3c} \cos \Delta\lambda \geq 0,236. \quad (1.3)$$

Умовна зона покриття КА для кутів місця 5° і більше схематично представлена на рис. 1.1.

Для покриття видимої території Землі з геостаціонарного КА (глобальна зона покриття) при роботі земних станцій мережі з кутами місця 5° і більше ширина діаграми спрямованості антени КА повинна становити $\theta_{0,5} = 17,32^\circ$.

Другим етапом є визначення зони, в якій КА створює необхідну щільність потоку потужності. Для цього необхідно провести енергетичний розрахунок радіолінії КА - Земля за напрямками, що з'єднує КА з різними точками земної поверхні.

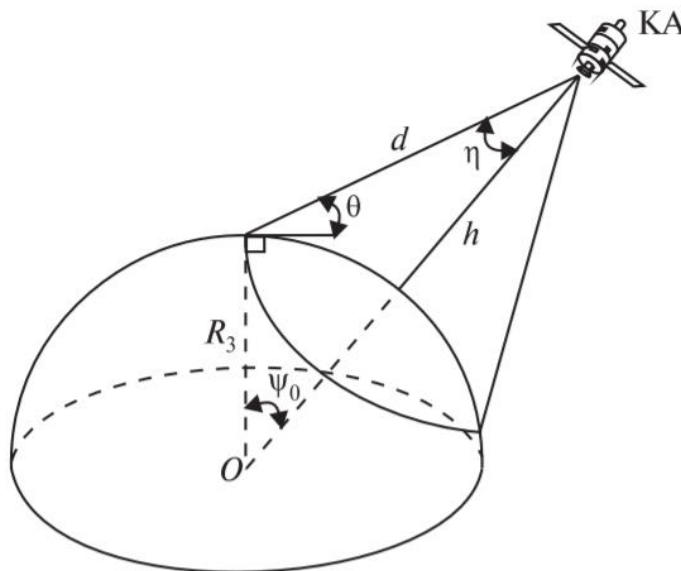


Рис. 1.1. Зона покриття КА для кутів місця антени ЗС величиною 5° і більше

Для наближеного побудови зони, в якій КА створює необхідну щільність потоку потужності, можна скористатися поданням поверхні Землі, як її видно з геостационарного КА. Для цього слід ввести сферичну систему координат (рис. 2.4), початок якої поєднане з точкою С розташування КА; N - Північний полюс землі; O - центр Землі.

Для проведення енергетичного розрахунку радіолінії КА – Земля (для антени з еліптичним або круговим перерізом променя) для деякої точки C' на поверхні Землі спочатку визначають посилення бортової антени G_0 в напрямку даної точки з земної поверхні, дБ:

$$G_0(\varphi_{C'}) = G_{\max} - 12 \left(\frac{\eta_{C'}}{\eta_{-3}} \right), \quad (1.4)$$

де $G_{\max} = 44,45 - 10 \lg(\varphi_{01}\varphi_{02})$ - максимальний коефіцієнт посилення антени, дБ;
 $\varphi_{01}\varphi_{02}$ - ширина променя по половинній потужності в поперечному перерізі по великій і малій осі відповідно; $\eta^{C'}$ - кут з КА між точками точкою C' і прицілювання, град;
 $\eta_{-3}^{C'}$ - ширина діаграми спрямованості антени за рівнем - 3 дБ в напрямку до точки C' , град.

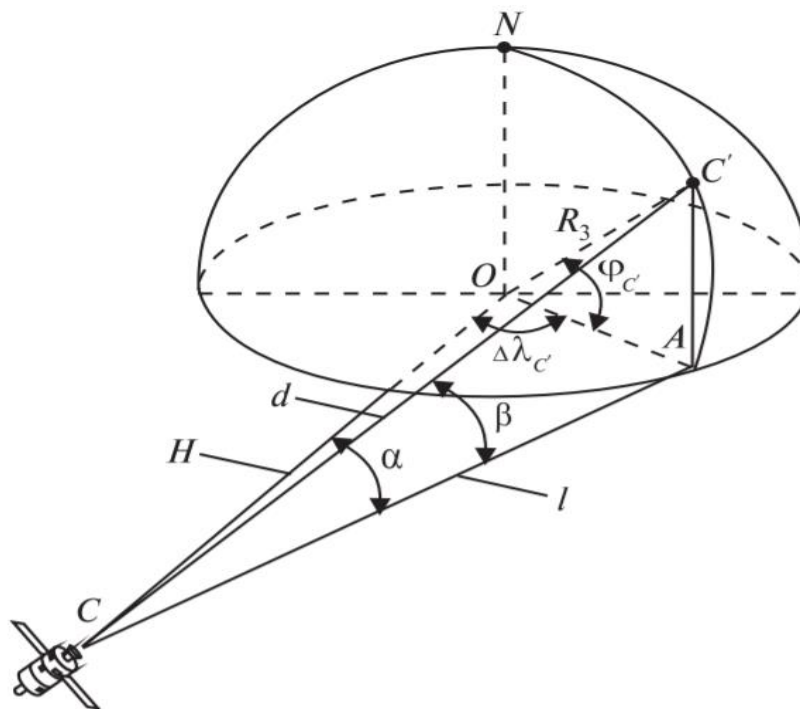


Рис. 1.2. Сферична система координат, початок якої поєднане з точкою розташування КА

Потім визначаємо щільність потоку потужності (ЩПП), створювану КА у поверхні Землі в даній точці, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$:

$$P_{\text{пер}} = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}}(\varphi) - b - 20 \lg(4\pi d) - A_G - A_P, \quad (1.5)$$

де $P_{\text{пер}}$ - потужність передавача КА, дБ; $G_{\text{пер}}(\varphi)$ - коефіцієнт посилення антени КА в напрямку даної точки на поверхні Землі, дБ; $b_{\text{пер}}$ - втрати в фідерному тракті передавача, дБ; d - похила дальність від КА до розглянутої точки на поверхні Землі,

м; A_G - ослаблення радіосигналу в газах атмосфери, дБ; A_P – загасання радіосигналів в гідрометеорах, дБ.

Проведемо розрахунок ЩПП для набору точок, розташованих з деяким кроком щодо один одного на земній поверхні (координатна сітка). Крок розташування точок визначається ступенем, необхідної деталізації розрахунку. Далі точки з рівними значеннями ЩПП.

з'єднуються на мапі замкнутими лініями. Тим самим на мапі виходить набір контурів з рівним рівнем ЩПП.

На третьому етапі визначається зона, яка відповідає умові прийому космічною станцією з необхідною якістю сигналів від знаходиться в межах зони видимості земної станції з нормованою в даній системі ЕІВП. За відомим параметрам ЗС і заданому відношенні сигнал/шум ($P_c/P_{ш}$) на вході приймача космічної станції, а також відомої діаграмі спрямованості приймальної антени супутника необхідно визначити значення ЕІВП_{ЗС}, розташованої в будь-якій точці видимій області земної поверхні, достатній для прийому сигналів з необхідною якістю, дБ Гц/ :

$$\text{ЕІВП}_{\text{ЗС}} = P_c/P_{ш} - G_{\text{КА}}(\varphi) + L_0 + L_{\text{доп}} - 228,6 + 10\lg(T_0 + 270), \quad (1.6)$$

де $P_c/P_{ш}$ - відношення сигнал/шум на вході демодулятора КА, дБ;

$G_{\text{КА}}(\varphi)$ - коефіцієнт посилення антени КА в напрямку до конкретної контрольної точки, дБ; L_0 - втрати передачі у вільному просторі, дБ.

Далі точки з рівними значеннями ЕІВП з'єднуються на мапі у замкнуту криву. На четвертому етапі на мапу наносяться всі три певні вище зони і будується їх внутрішня огинаюча. Таким чином, зоною покриття є територія, що належить кожній з трьох побудованих зон, т. ч. територія, на якій виконуються умови радіовидимості і умови необхідної якості зв'язку на лініях КА - Земля і Земля - КА. У деяких системах (частіше в системах супутникового мовлення) створюються різні зони покриття для ліній КА - Земля і Земля - КА. В цьому випадку зони покриття для ліній «вгору» і «вниз» будуть різні. Зона покриття для лінії «вниз» знаходиться як об'єднання зон, визначених на етапах 1 і 2, а зона покриття на лінії

«вгору» - на етапах 1 і 3. Відзначимо, що представлений на етапах 2 і 3 розрахунок зон не зовсім точний, оскільки не враховує нестабільність становища КА на орбіті і нестабільність орієнтації його антен. У зв'язку з цим для точного розрахунку зони покриття необхідно визначити ту частину поверхні Землі, де заданий якість зв'язку забезпечується при будь-яких, навіть самих несприятливих, поєднаннях параметрів, що характеризують нестабільність КА і точність утримання променя. Іншими словами, необхідно знайти внутрішню огинаючу зон покриття для різних сполучень величин, що визначають положення КА і положення його антен.

1.3 Класифікація супутникових орбіт за нахилом до площини екватора

Залежно від величини нахилення площини орбіти відносно площини екватора розрізняють низькі екваторіальні (нахилення 0°), полярні (нахилення 90°) і похилі орбіти, рис.1.3.

Системи з низькими похилими і полярними орбітами існують вже близько 30 років і застосовуються в основному для науково-дослідних цілей, дистанційного зондування, навігації, метеорологічних спостережень, фотографування поверхні Землі.

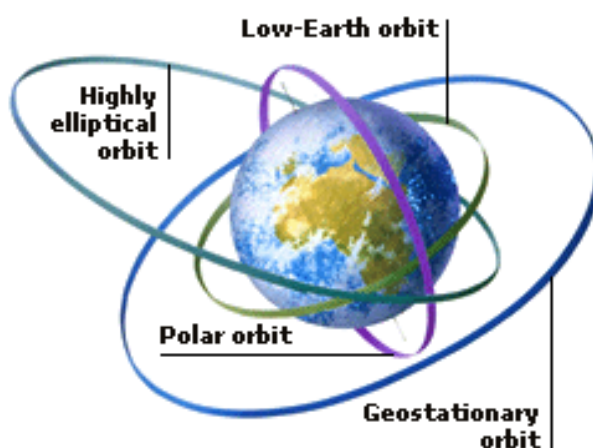


Рис.1.3. Класифікація супутникових орбіт за нахилом до площини екватора

Для організації мобільного і персонального зв'язку ці системи стали використовуватися тільки в останні 5-7 років. Сьогодні найбільш інтенсивно

освоюються низькі похилі і полярні орбіти висотою 700-1500 км, а також екваторіальні висотою 2 тис. км.

Супутники на низьких орбітах мають значні переваги перед іншими КА за енергетичними характеристиками, але програють їм в тривалості сеансів зв'язку і часу активного існування КА. Якщо період обертання супутника становить 100 хв, то в середньому 30% часу він знаходиться на тіньовій стороні Землі. Акумуляторні бортові батареї відчувають приблизно 5 тис. Циклів зарядки/розрядки в рік, внаслідок чого термін їх служби, як правило, не перевищує 5-8 років.

Вибір діапазону висот від 700 до 2 тис. км для низькоорбітальних систем не випадковий.

З одного боку, на орбітах заввишки менш 700 км щільність атмосфери відносно висока, що викликає коливання ексцентриситету і деградацію орбіти (поступове зниження висоти апогею). Крім того, зменшення висоти орбіти призводить до збільшення числа штатних маневрів для збереження заданої орбіти, а отже, до підвищення витрати палива.

З іншого боку, на орбітах вище 1,5 тис. Км, де розташовується перший радіаційний пояс Ван-Аллена, тривала робота електронної бортової апаратури практично неможлива, якщо не використовувати спеціальних методів захисту від радіаційного випромінювання. Застосування ж цих методів веде до суттєвого ускладнення бортової апаратури і збільшення маси КА.

Однак чим менше висота орбіти, тим менше миттєва зона обслуговування, а отже, для глобального охоплення потрібна значно більша кількість супутників. Якщо низькоорбітальна система повинна забезпечити глобальну зв'язок з безперервним обслуговуванням, то необхідно, щоб в орбітальне угруповання входило не менше 48 КА. Період обертання супутника на цих орбітах складає від 90 хв до 2 год, а максимальний час перебування КА в зоні радіовидимості не перевищує 10-15 хв (див. Табл. 1).

Еліптичні. Основними параметрами, що характеризують тип еліптичної орбіти, є період обертання супутника навколо Землі і ексцентриситет (показник еліптичності орбіти). В даний час використовуються кілька типів еліптичних орбіт

з великим ексцентриситетом - Borealis, Archi-medes, "Блискавка", "Тундра" (табл. 2). Всі зазначені орбіти є синхронними, тобто супутник, виведений на таку орбіту, обертається зі швидкістю Землі і має період обертання, кратний часу доби.

Для супутників на еліптичній орбіті характерно те, що їх швидкість в апогеї значно менше, ніж в перигеї. Отже, КА буде перебувати в зоні видимості певного регіону протягом більш тривалого часу, ніж супутник, орбіта якого є кругової.

Так, виведений на орбіту КА "Блискавка" (апогей 40 тис. Км, перигей 460 км, нахилення 63,50) забезпечує сеанси зв'язку тривалістю 8-10 год, причому система всього з трьох супутників підтримує глобальну цілодобовий зв'язок. Еліптичні орбіти з більш низьким апогеєм, наприклад Borealis (апогей 7840 км, перигей 520 км) або Archimedes (апогей 26 737 км, перигей 1000 км), призначені для забезпечення регіональної зв'язку.

КА з більш низьким апогеєм виграють у супутників на високоеліптичних орбітах за енергетичними характеристиками, програючи їм в тривалості сеансів. Для забезпечення безперервного цілодобового зв'язку з використанням синхронно-сонячних орбіт Borealis буде потрібно не менше 8 КА (розташованих в двох орбітальних площинах по чотири супутника в кожній площині). Вони дозволять обслуговувати абонентів при кутах радіовидимості КА не менше 250.

Системи з КА на еліптичних орбітах також не позбавлені "природних" обмежень. Постійність місцеположення КА на еліптичній орбіті забезпечується тільки при двох значеннях нахилення площини орбіти до екватору - 63,40 і 116,60. Це пояснюється впливом неоднорідностей гравітаційного поля Землі, через якого велика вісь еліптичної орбіти відчуває обертальний момент, що призводить до коливань широти підсупутникової точки в апогеї. Інший фактор, що впливає на вибір параметрів еліптичних орбіт, пов'язаний з необхідністю враховувати небезпечні впливи радіаційних поясів Ван-Аллена, які неминуче перетинає КА під час свого руху по орбіті.

1.4 Класифікація супутникових орбіт за висотою

По висоті орбіти супутників можна умовно на геостационарній орбіті (GEO) і на не геостационарних орбітах. У свою чергу, не геостационарні орбіти поділяються на низькоорбітальні (LEO), середньовисотні (MEO) і еліптичні (HEO). Крім того, низькоорбітальні системи зв'язку поділяються за видом послуг, що надаються на системи передачі даних на базі little LEO, радіотелефонні системи big LEO і системи широкосмугового зв'язку mega LEO (в літературі використовується також позначення Super LEO), рис 1.4.

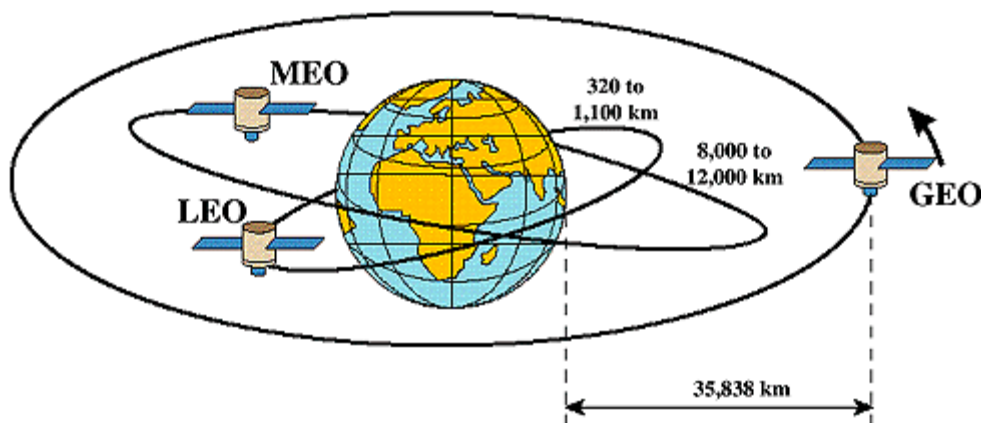


Рис.1.4. Класифікація супутникових орбіт за висотою GEO, MEO та LEO

Належність системи до служби. Відповідно до Регламенту радіозв'язку розрізняються три основні служби - фіксована супутникова служба (ФСС), рухома супутникова служба (РСС) і радіомовна супутникова служба (РСС).

Статус системи залежить від призначення системи, ступенем охоплення території, що обслуговується, розміщення та приладдя наземних станцій. Залежно від статусу ССЗ можна розділити на міжнародні (глобальні і регіональні), національні та відомчі (останні в даному огляді не розглядаються).

Геостационарні. Більшість існуючих ССЗ використовують найбільш вигідну для розміщення супутників геостационарну орбіту, основними перевагами якої є можливість безперервного цілодобового зв'язку в глобальній зоні обслуговування

і практично повна відсутність зсуву частоти, обумовленого доплерівським ефектом.

Геостаціонарні супутники, розташовуючись на висоті приблизно 36 тис. Км і рухаючись зі швидкістю обертання Землі, як би "зависають" над певною точкою земної поверхні, яка розташовується на екваторі (так званої підсупутниковою точкою). Насправді становище геостаціонарного КА на орбіті не є незмінним: він відчуває незначний "дрейф" під впливом ряду факторів, що викликають деградацію орбіти. При цьому зміна положення орбіти за рік може досягати 0,920. Основними параметрами, що визначають кутовий рознос між сусідніми КА, є просторова вибірковість бортових і наземних антен, а також точність утримання КА на орбіті.

Зв'язок через геостаціонарній КА не має перерв в обслуговуванні, обумовлених взаємним переміщенням супутника і наземної станції, а система з трьох супутників забезпечує охоплення практично всієї території земної поверхні. Орбітальний ресурс сучасних геостаціонарних КА також досить високий і становить близько 15 років (табл. 1.1). Однак такі системи мають ряд недоліків, головний з яких - затримка сигналу. Супутники на геостаціонарних орбітах оптимальні для систем радіо- і телевізійного мовлення, де затримки в 250 мс (в кожному напрямку) не позначаються на якісних характеристиках сигналів. Системи радіотелефонного зв'язку більш чутливі до затримок, а оскільки сумарна затримка в системах даного класу складає близько 600 мс (з урахуванням часу обробки і комутації в наземних мережах), навіть сучасна техніка не завжди дозволяє забезпечити зв'язок високої якості. У разі "подвійного стрибка" (ретрансляції через наземну станцію-шлюз) затримка стає неприйнятною вже більш ніж для 20% користувачів.

Табл.1.1

Системи, що використовують КА на GEO-, MEO- і LEO-орбітах

Показник	GEO	MEO	LEO
Висота орбіти, км	36 000	5000-15 000	500-2000
Кількість КА в ОУ	3	8-12	48-66
Зона покриття одного КА (кут радіовидимості 50% від поверхні Землі)	34	25-28	3-7
Час перебування КА в зоні радіовидимості (на добу)	24 год	1,5-2 год	10-15 хв
Затримка при передачі мови			
Регіональний зв'язок, мс	500	80-130	20-70
Глобальний зв'язок, мс	600	250-400	170-300
Час перемикання з одного супутника на інший, хв	Не вимагається	50	8-10
Час перемикання з одного променя в інший, хв	10-15	5-6	1,5-2,0
Відносний максимальний доплерівський зсув, с	6×10^{-8}	$6,6 \times 10^{-6}$	$6(1,8-2,4) \times 10^{-5}$
Кут радіовидимості КА на межі зон обслуговування, град	5	15-25	10-15

1.5 Енергетичні рівняння лінії зв'язку між наземною та бортовою антеннами

Основною особливістю супутникових ліній є наявність великих втрат сигналу, обумовлених загасанням (ослабленням і розсіюванням) його енергії на трасах великої фізичної протяжності. так, при висоті орбіти КА 36 тис. км загасання сигналу на трасі може досягати 200 дБ. Крім цього основного загасання в просторі сигнал в лініях супутникового зв'язку схильний до впливу великого числа інших

факторів, таких як поглинання в атмосфері, фарадеєвського обертання площини поляризації, рефракція, деполяризація і т. д. З іншого боку, на приймальний пристрій КА і ЗС крім власних флуктуаційних шумів впливають різного роду завади у вигляді випромінювання Сонця, космосу і планет.

У цих умовах правильний і точний облік впливу всіх факторів дозволяє здійснити оптимальне проектування супутникових систем зв'язку (ССЗ), забезпечити їх нормальну роботу і в той же час виключити зайві енергетичні запаси, що призводять до невиправданого збільшення складності земної і бортової апаратури. Доводиться враховувати характер і число переданих сигналів, а також характер їх перетворення (обробки) в супутниковому ретрансляторі. У найпростішому випадку, наприклад при передачі програм телебачення, бортовий ретранслятор працює в односигнальному режимі, типовому для наземних радіорелейних ліній, і лише підсилює сигнал, що ретранслюється. При передачі телефонних сигналів з багатостанційним доступом через бортовий ретранслятор проходить кілька сигналів, розділених по частоті, часу або формі, що надають взаємний вплив, яке повинно враховуватися при розрахунку енергетики супутникових ліній. Залежно від типу і призначення системи на борту може застосовуватися та чи інша обробка сигналу, в тому числі його повна регенерація, що зменшує накопичення шумів і спотворень, які виникають на ділянках траси.

Введемо позначення: $P_{\text{пер}}$ - ефективна потужність на виході передавача; $\eta_{\text{пер}}$ - коефіцієнт передачі за проектною потужністю (ККД) АФТ; $G_{\text{пер}}$ - коефіцієнт підсилення передавальної антени відносно ізотропного випромінювача.

Введемо поняття еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності (ЕІВП):

$$P_{\text{екв}} = P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}} \quad (1.7)$$

яка є добудком потужності передавача на посилення антени. В теорії ССЗ цю характеристику розглядають як один з найважливіших показників ССЗ. Відзначимо також, що паралельно з ЕІВП для характеристики енергетичних показників ССЗ

вводять також поняття добротності станції: $Q = G/T$. Де G - підсилення антени на частоті прийому; T - сумарна шумова температура станції.

Якщо вважати, що випромінюється хвиля сферична і поширюється у всіх напрямках рівномірно, то зі зміною відстані щільність потоку потужності зменшується пропорційно квадрату відстані d :

$$W = \frac{P_{\text{екв}}}{4\pi d^2} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}}}{4\pi d^2}, \quad (1.8)$$

а напруженість поля на тій же відстані буде мати вигляд:

$$E = \sqrt{30 \cdot \frac{P_{\text{екв}}}{d^2}} = \sqrt{120 \cdot \pi \cdot \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}}}{d^2}}. \quad (1.9)$$

Вираз (1.10) отримано з урахуванням того, що модуль вектора Пойтінга $P_0 = E_0 H_0$, Вт/м², та для плоскої хвилі справедливо рівність $H_0 = E_0 / \rho_0 = E_0 / 120\pi$, оскільки хвильовий опір вільного простору $\rho_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi$, та як $\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

В точці прийому антена має ефективну площу апертури, рівну $S_{\text{еф}}$; АФТ приймача має коефіцієнт передачі $\eta_{\text{пр}}$ і забезпечується повне узгодження хвильових опорів антени, АФТ і приймача. Тоді потужність вхідного сигналу приймача

$$P_{\text{пр}} = W \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot S_{\text{еф}} = \frac{P_{\text{екв}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot S_{\text{еф}}}{4\pi d^2} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot S_{\text{еф}} \cdot G_{\text{пер}}}{4\pi d^2}. \quad (1.10)$$

Ефективна площа апертури пов'язана з коефіцієнтом підсилення антени наступним виразом:

$$G_{\text{пр}} = \frac{4\pi \cdot S_{\text{еф}}}{\lambda^2}, \quad (1.11)$$

З рівняння (1.11):

$$S_{\text{еф}} = \frac{G_{\text{пр}} \cdot \lambda^2}{4\pi}. \quad (1.12)$$

Підставляючи рівняння (1.11) в співвідношення (1.10), запишемо:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пер}}}{(4\pi d/\lambda)^2} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пер}}}{L_0} \quad (1.13)$$

У вираженні (1.13) чисельник характеризує апаратурні параметри лінії, а знаменник - втрати у вільному просторі. В теорії радіолокації рівняння (1.13) називають основним рівнянням радіолокації, що встановлює зв'язок між потужностями прийому і передачі сигналів у вільному просторі. У цьому рівнянні не враховано вплив шумів і воно є лише відображенням так званих основних втрат

$L_0 = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$. Крім них існує і ряд додаткових втрат, тому сумарні втрати бути враховані, якщо в знаменник виразу (1.13) замість L_0 підставити множник: $L_{\Sigma} = L_{\text{фод}} \cdot L$. Відповідно, скориставшись рівнянням (1.13), визначимо потужність передавача ділянки лінії зв'язку ССЗ

$$P_{\text{пер}} = \frac{16\pi^2 \cdot R^2 \cdot L_{\text{пр}} \cdot \text{дод}}{\lambda^2 \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пер}}}, \quad (1.14)$$

де R - відстань між точками прийому і передачі (похила дальність).

Якщо замість потужності сигналу задано співвідношення сигнал/шум на вході приймача $(P/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$, то замість $P_{\text{пр}}$ в формулу (1.14) необхідно підставити вираз $P_{\text{ш}}(P/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$, де $P_{\text{ш}}$ - повна потужність шуму на вході приймача. Сумарна потужність адитивних шумів, пов'язаних в основному з тепловими процесами, може бути апроксимована як $P_{\text{ш}} = kT_{\Sigma}\Delta f_{\text{ш}}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (рад) - постійна Больцмана; $\Delta f_{\text{ш}}$ - еквівалентна шумова смуга приймача, Гц; T_{Σ} - еквівалентна шумова температура приймальної станції, наведена до входу приймача.

Отримаємо вирази для розрахунку потужності передавачів на лініях Земля - КА і КА - Земля. При цьому приналежність показника, що відноситься до Землі (земної станції) будемо позначати індексом «З», а до бортової апаратури КА - індексом «Б». Відповідно, довжину траси і довжину хвилі лінії Земля - КА позначимо цифрою 1, а лінії КА - Земля - цифрою 2.

Для ділянки Земля - КА:

$$P_{\text{пер.З}} = \frac{16\pi^2 \cdot R_{\text{ш.Б}}^2 \cdot L_{1\text{дод}}}{\lambda_{\text{пер.З}}^2 \cdot \eta_{\text{пр.Б}} \cdot \eta_{\text{пр.Б}} \cdot \mathcal{E}_{\text{пр.Б}} \cdot G_{\text{пер.З}} \cdot \text{ш}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.Б}}. \quad (1.15)$$

Для ділянки КА - Земля:

$$P_{\text{пер.Б}} = \frac{16\pi^2 \cdot R_{\text{ш.З}}^2 \cdot L_{2\text{дод}}}{\lambda_{\text{пер.Б}}^2 \cdot \eta_{\text{пр.З}} \cdot \eta_{\text{пр.З}} \cdot \mathcal{E}_{\text{пр.З}} \cdot G_{\text{пер.Б}} \cdot \text{ш}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.З}}. \quad (1.16)$$

Загальне рівняння всієї лінії зв'язку, що складається з двох ділянок, буде залежати від зв'язку між сумарним ставленням сигнал/шум на всій лінії зв'язку $\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}$ і відносинами $\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.Б}}$, $\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.З}}$. Якщо на борту КА не проводиться спеціальна «оптимальна» обробка, то можна вважати, що шуми всіх ділянок лінії зв'язку складаються, а отже, необхідно, щоб відношення сигнал / шум на кожній ділянці лінії зв'язку було більше, ніж на всій лінії, т. ч.:

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.Б}} &> \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}, & \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.Б}} &> a \cdot \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}, \\ \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.З}} &> \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}, & \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.З}} &> b \cdot \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (1.17)$$

причому коефіцієнти запасу a й b повинні бути більше одиниці, тобто $a > 1$, $b > 1$. Оскільки при додаванні шумів першої і другої ліній справедливо рівність

$$\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)^{-1} = \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.Б}}^{-1} + \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.З}}^{-1}, \quad (1.18)$$

З рівнянь (1.17) і (1.18), отримаємо: $a = \frac{b}{b-1}$.

З урахуванням виразів (1.17) і (1.14) запишемо остаточні енергетичні рівняння лінії зв'язку

$$P_{\text{пер.З}} = \frac{16\pi^2 \cdot R_{\text{ш.З}}^2 \cdot kT_{\text{ш.З}} \cdot \Delta f \cdot L}{\lambda_{\text{пер.З}}^2 \cdot \eta_{\text{пр.Б}} \cdot \eta_{\text{пр.З}} \cdot \mathcal{E}_{\text{пер.З}} \cdot G_{\text{ш}} \left(\frac{P_c}{\text{вх.Б}} \right)},$$

$$P_{\text{пер.Б}} = \frac{16\pi^2 \cdot R_{\text{ш.Б}}^2 \cdot kT_{\text{ш.Б}} \cdot \Delta f \cdot L}{\lambda_{\text{пер.Б}}^2 \cdot \eta_{\text{пр.З}} \cdot \eta_{\text{пр.Б}} \cdot \mathcal{E}_{\text{пер.Б}} \cdot G_{\text{ш}} \left(\frac{P_c}{\text{вх.З}} \right)} \quad (1.19)$$

У рівняння (1.19) входять всі основні параметри бортової і наземної апаратури, а також похилі дальності R_1 і R_2 , які при багатостанційному прийомі (в даному випадку двохстанційному) різні. Коефіцієнти запасу в загальному випадку вибирають довільно, що при цьому повинен бути розумний компроміс між потужностями земного і бортового передавачів і основне навантаження за запасом потужності повинен брати на себе земної комплекс, оскільки збільшення b призведе до невиправдано великих енергетичних і економічних витрат бортових систем ретранслятора. На практиці коефіцієнт b вибирають в межах $b=1,1-1,3$. У цьому випадку коефіцієнт запасу земної станції $a = 1,1-4,3$. Величини $\eta_{\text{пер.З}}, \eta_{\text{пр.Б}}$ залежать від конструктивно-технологічних характеристик АФТ і зазвичай лежать в наступних межах:

$$\eta_{\text{пр.Б}} = 0,65 - 0,9; \quad \eta_{\text{пр.З}} = 0,65 - 0,8$$

$$\eta_{\text{пер.З}} = 0,5 - 0,65; \quad \eta_{\text{пер.Б}} = 0,8 - 0,95.$$

1.6 Поглинання енергії сигналів в атмосфері

Траса ССЗ проходить через атмосферу Землі, яка має суттєвий вплив на якість і надійність зв'язку. Атмосфера має яскраво виражену частотну вибірковість і через неї вільно проходять хвилі діапазону частот (ДЧ) від 30 МГц до 30 ГГц. Знизу цей ДЧ обмежується іоносферними критичними частотами, а також загальними втратами радіохвиль в іоносфері. Обмеження зверху обумовлено поглинанням атмосферними опадами і газами тропосфери (киснем і водяною парою). На якість прийому великий вплив мають зовнішні шуми (космічні, шуми

Сонця і теплові шуми атмосфери), які найменше в ДЧ 1-10 ГГц. Крім того, вибір ДЧ визначається дисперсією радіохвиль в іоносфері, можливостями створення відповідної апаратури і її частотними характеристиками. ССЗ використовують широкий спектр частот, а подальше прагнення до збільшення пропускної здатності ССЗ, впровадження широкосмугових радіоліній, переважного використання КА на геостаціонарних орбітах і необхідність вирішення проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС) вимагають освоєння більш високих частот. Вже освоєно ДЧ 11-14 ГГц, який найчастіше використовується КА на геостаціонарних орбітах. Успішно проводяться численні експерименти по освоєнню ДЧ 20-30 ГГц. Відповідно до рекомендацій [ITU, 618] в умовах «ясного неба» величину ослаблення L_a в газах, виражену в дБ, визначають як

$$L_{a0} = \frac{(\gamma_{O_2} h_{O_2} + \gamma_{H_2O} h_{H_2O})}{\sin \varphi_0}, \quad \varphi_0 > 0, \quad (1.20)$$

φ_0 - кут місця земної станції, градус; γ_{O_2} та γ_{H_2O} - погонні ослаблення в кисні і водяному парі, що залежать від частоти і концентрації водяної пари, дБ/км; h_{O_2} та h_{H_2O} - еквівалентна товщина (висота) кисню і водяної пари, км.

Ці величини можуть бути розраховані наступним чином:

$$h_{O_2} = \begin{cases} 6,7f, & f < 50 \\ 6,7f \frac{60}{1 + (f - 118,7)^2}, & 70 < f < 370 \end{cases},$$

$$h_{H_2O} = 6,7f \frac{3}{3 + (f - 22,3)^2} + \frac{0,3}{1 + (f - 118,7)^2}, \quad f < 350$$

На практиці з достатнім ступенем точності можна вважати, що $h_{O_2} \approx 6$, $h_{H_2O} \approx 2,2$. Частотні залежності сумарного молекулярного ослаблення L_{a0} показані на рис. 1.5.

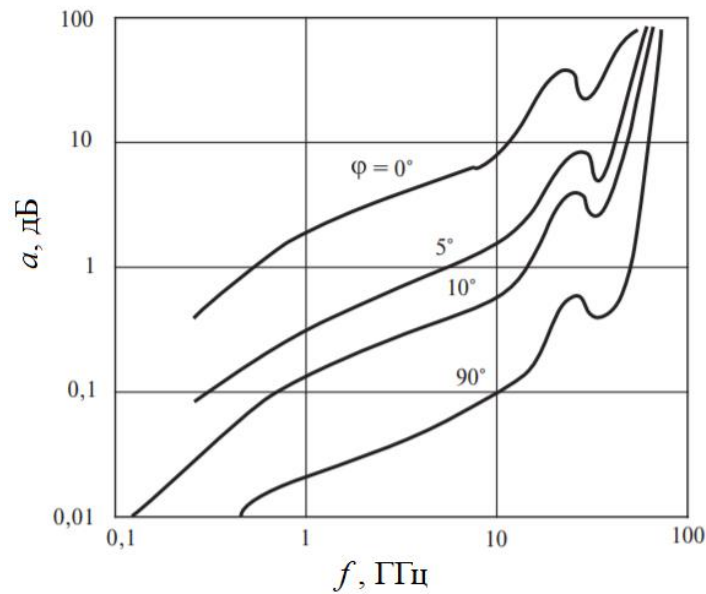


Рис. 1.5. Частотні залежності сумарного молекулярного послаблення радіосигналу

Видно, що зі зростанням частоти ослаблення сигналу в тропосфері істотно збільшується, і для міліметрових хвиль це ослаблення може досягати значень більше 10 дБ за потужністю.

Усереднені значення погонного ослаблення в діапазоні частот від 10 до 20 ГГц наведені в табл. 1.2.

Табл. 1.2.

Усереднені значення ослаблення

Частота, ГГц	Ослаблення в кисні, дБ/км	Ослаблення в парах води при $\rho = 7,5$ г / м, дБ/км	Ослаблення в парах води при $\rho = 20$ г/м, дБ/км	Сумарне ослаблення, дБ/км
10,0	0,02	0,004	0,01	0,024–0,03
15,0	0,02	0,03	0,08	0,05–0,1
20,0	0,02	0,3	0,3	0,12–0,32

Необхідно відзначити те, що якщо ослаблення в кисні в цьому діапазоні практично постійно і в основному визначається еквівалентною товщиною шару

кисню $h_{\text{H}_2\text{O}}$. Тоді поглинання в парах води залежить від щільності водяної пари ρ , г/м^3 . Щільність водяної пари $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$ є типовою (стандартною) для континентальних районів з помірним кліматом. Густина $\rho = 20 \text{ г/м}^3$ характерна для нижніх шарів тропосфери над морями субтропічної і тропічної зон, а також для прибережних районів суші в цих широтах.

Згасання в атмосфері на вертикальній трасі для різних погодних умов.

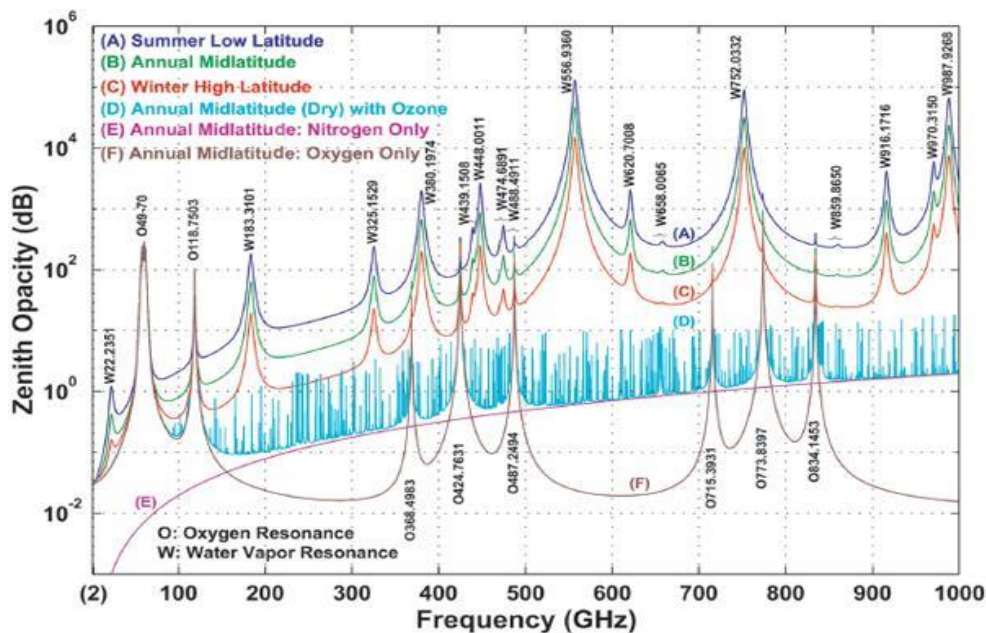


Рис. 1.6. Згасання в атмосферній вертикальній лінії в радіо спектрі, що спільно використовується для EESS.

2 СУПУТНИКОВЕ ТЕЛЕБАЧЕННЯ

2.1 Історія супутникового телебачення.

У 1945 р. відомий письменник Артур Кларк (жанр – фантастика) оприлюднив ідею створення супутника зв'язку. За ним цю ідею у тому чи іншому вигляді повторювали інші письменники та вчені (серед них Джон Пірс – директор Лабораторій Белла з наукової роботи). Саме завдяки Лабораторіям Белла та науково-дослідному центру Lucent Technologies, у 1962 році було створено телекомунікаційний супутник Telstar 1, який успішно вивели на орбіту 10 липня з мису Канаверал. Цю дату багато експертів називають початковою точкою розвитку супутникового телебачення. Взагалі 20 століття було повне відкриттів, навіть перший електричний кондиціонер був випущений General Electric ще 1929 року. Визначимося чітко з поняттям. Супутникове телебачення – це система передачі телесигналу від передавача (передаючого центру) до приймача (споживача) через штучний супутник Землі, що знаходиться на геостаціонарній орбіті над екватором. Отже, як казав відомий політик: "Процес пішов". 1965 року американці запустили перший комерційний комунікаційний супутник «Early Bird». Цього ж року за допомогою радянського високоеліптичного супутника зв'язку «Блискавка» успішно випробувано можливість передачі телевізійного сигналу з Владивостока до Москви. Це зараз ми вже не дивуємося технічним нововведенням, можемо легко встановити конвекційні обігрівачі для обігріву або спілкуватися по інтернету з другом на іншому кінці світу, а тоді це було для простої людини просто невідомим, залишалось просто науковою фантастикою. Професор Генрі Говард (США) у 1976 р. створює перше у світі домашнє супутникове телебачення. Це початок комерційного використання досягнень науки та техніки у сфері телекомунікацій. Зауважимо, деякі експерти вважають саме 1976 р. першою віхою історія супутникового телебачення. Будь-які технічні нововведення, що здавалися всього років 20 тому, будь то супутникове телебачення, водонагрівачі для душу або «теплі

підлоги» в квартирі сьогодні абсолютно не дивують, а через нашу звичку відмовитися від їх застосування в повсякденному житті практично неможливо. Інтенсивний та масовий розвиток супутникового телебачення – це середина 90-х років минулого століття. Досягнення в галузі цифрової обробки відеоданих та конструювання бортового та наземного обладнання для супутникових систем зв'язку дозволили зробити супутникове телебачення більш доступним для рядових споживачів та комерційно привабливим для постачальників послуг. У Європі та США з 1997 року активно розвивається волоконно-оптичне телебачення. Це поєднання переваг цифрової якості сигналу, різноманітності супутникового телебачення та зручності ефірного телемовлення, коли на будь-якому телевізорі без приставок можна дивитися будь-яку програму. На початку 1990-х років було переглянуто сузір'я супутників зв'язку LEO. Мікроелектроніка дозволяла створювати менші супутники з більшою потужністю, а індустрія запуску була сильнішою, ніж тридцять років тому. Дві компанії, які переслідували цю концепцію, були Iridium і Teledesic.

План Iridium полягав у тому, щоб розмістити близько 100 супутників у кількох LEO, щоб забезпечити безперебійні послуги стільникового телефону та пейджера в будь-якій точці Землі. Iridium стала першою компанією, яка надала ці послуги 1 листопада 1998 року. Шістдесят шість супутників Iridium, всі виготовлені Motorola, були запуснені наприкінці 1990-х років. На жаль, Iridium подав заяву про банкрутство в 1999 році.

Перше десятиліття 21 століття – це справжній бум супутникових телекомунікацій. Супутникове телебачення доводить свою ефективність при створенні регіональних систем розподільчого телебачення і становить відчутну конкуренцію кабельному та ефірному ТБ, його частка у загальному обсязі послуг супутникових систем зв'язку становить сьогодні близько 35%. За даними у 2010 р. обсяг ринку послуг безпосереднього супутникового телемовлення становить приблизно 120 мільярдів доларів. Визначальним фактором такого стрімкого розвитку є швидке та повсюдне впровадження цифрових технологій. З останніх новацій варто відзначити телебачення високої чіткості, реалізоване завдяки

успіхам у сфері компресії інформації. Тепер супутникові системи мовлення забезпечують необхідну пропускну спроможність каналів для передачі програм у форматі HD із прийнятною якістю та вартістю. Технічний прогрес неухильно пришвидшується. Те, що шістьдесят п'ять років тому було у статусі фантастики, сьогодні майже буденність.

2.2 Глобально про телебачення

Ми живемо в еру миттєвих новин і дивимось на світ через призму подій, показаних у телевізійному ефірі. Глобальне телебачення може перенести нас у будь-яку точку планети і зробити свідками історичних моментів. Розвиток міжнародного телемовлення новин відбувався в умовах геополітичних, економічних і соціальних змін кінця 1980-х рр. н. та протягом 1990-х рр., а також трансформації світового інформаційного ринку. Геополітичний переділ світу після закінчення «холодної війни» та руйнування радянського блоку, глобалізація та транснаціоналізація світової економіки, удосконалення та доступність комунікаційних технологій чимало сприяли процесам створення світової інформаційної системи, найважливішу роль у якій відіграють глобальні телемережі новин. Глобальне телебачення – супутниково-кабельні телемережі, які дивляться глядачі понад 200 країн світу: універсальні телеканали новин CNN International та BBC World, фінансово-економічні CNBC та Bloomberg TV, а також великі регіональні телеканали новин Euronews та Al-Jazeera, які прагнуть глобального поширення своїх програм і вже стали впливовими гравцями на світовому інформаційному ринку. Специфіка їхнього мовлення – новини 24 години на добу, 7 днів на тиждень, цілий рік – дозволяє журналістам висвітлювати події, які рідко потрапляють в ефір національних каналів. Новини глобальних телемереж, висвітлення подій у режимі реального часу нерідко визначають порядок денний для політичних діячів та дипломатів. Феномен прямого новинного мовлення полягає в одночасності реальної події та сприйняття її глядачами, що значно посилює вплив телевізійних образів на аудиторію. Глобальні телемережі є провідними

постачальниками новин на світовому інформаційному ринку. Ключову роль розвитку міжнародного супутникового мовлення зіграла телекомпанія CNN. Організація роботи в реальному часі, ексклюзивне висвітлення подій, де і коли б вони не відбулися, гнучке програмування сітки мовлення CNN стали взірцем для її послідовників. Вплив і успіх CNN, зростаюча потреба в інформаційній інформації виявилися стимулом для розвитку телеканалів новин, як глобальних, так і регіональних. В оперативному висвітленні подій у режимі реального часу, у миттєвому відображенні змін та коливань фінансових ринків, у здатності швидко проаналізувати проблеми із залученням експертів закладено силу глобальних телемереж новин, яка бере участь у формуванні історії та сприяє прискоренню її ритму. Глобальне телебачення стало швидким, потужним засобом інформації, що активізує світове громадську думку, особливо у періоди міжнародних криз. Цінна інформація, заяви лідерів держав, представників політичної та економічної еліти, коментарі та пропозиції фахівців з різних країн надходять до ефіру глобальних телемереж новин поряд з драматичними репортажами з місця події. Ефекти впливу глобального телебачення на міжнародну громадськість, на рішення політиків і дипломатів особливо важливі в кризових ситуаціях, коли торкнулися інтересів країн і народів і вирішується доля сотень і тисяч людей, які опинилися в зоні конфлікту. Нагадаємо, що провідний західний канал новин CNN був створений в 1980 році.

У СРСР виділялися величезні гроші на будівництво та розвиток ракетно-ядерних сил. Проте грошей для створення радянського супутникового телеканалу не знайшлося. Радянська політична еліта недооцінювала фактор інформації, а CNN нарощував свій вплив. Як сказав один американський генерал у 1991 році, під час операції «Буря в пустелі»: «Поки що CNN не скаже, що ми виграли війну, ми її не виграли». І це відповідає дійсності. Багато сюжетів «переможних» дій американських військ було знято зовсім не на полі битв, а в штаті Невада силами фахівців Голлівуду, який чудово вміє імітувати ведення бойових дій. Згадаймо хоча б відомий випадок зі звільненням рядової Джесіки Лінч вже під час другої іракської війни 2003 року. Цей епізод був пропагандистською акцією Пентагону і заздалегідь

репетирувався, що ще раз демонструє всю міць інформаційної зброї. Супутникове телебачення - система передачі телевізійного сигналу від передаючого центру до споживача, що використовує як ретранслятор штучні супутники Землі, розташовані в космосі на геостаціонарній навколоземній орбіті над екватором, та оснащені приймальним обладнанням. У порівнянні з наземним телебаченням забезпечує покриття якісним телевізійним сигналом великих територій, важкодоступних для ретрансляції звичайним способом. Для прийому сигналу супутникового телебачення потрібне спеціальне обладнання. Стандартний комплект складається із супутникової антени, кронштейна (кріплення антени до стіни чи даху), конвертера, кабелю та ресивера (супутникового приймача). Для перегляду телевізійних каналів за допомогою ресивера використовується звичайний телевізійний приймач, рідше монітор комп'ютера (через спеціальний DVB приймач). Аналогове телебачення поширюється через супутник, зазвичай, закодованим чи зашифрованим в NTSC, PAL, чи SECAM стандартом телевізійного мовлення. Цифровий телевізійний сигнал або мультиплексований сигнал зазвичай модулюється QPSK. Загалом цифрове телебачення, у тому числі передані через супутники, як правило, засноване на відкритих стандартах, таких як MPEG, DVB-S та DVB-S2. Комерційне шифрування включає кодування: BISS, Conax, DigiCipher, Irdeto, Nagravision, PowerVu, Viaccess, Videocipher і VideoGuard. Багато систем комерційного шифрування були скомпрометовані (зламани).

В даний час використання супутникового обладнання дає змогу отримувати зображення цифрової якості, аж до HD. Оператори супутникового телебачення, як правило, надають своїм клієнтам кілька пакетів телеканалів залежно від їх смаків та фінансових можливостей.

2.3 Актуальність супутникового телебачення у наш час.

Останнім часом дедалі чіткіше спостерігається криза на ринку супутникового телебачення. Особливо це стало помітно після нового року, і з часом ситуація

тільки погіршується. Йдеться саме про продаж, про приріст абонентів. Ці показники сповільнюються все сильніше, і це вже очевидно. Вочевидь, що у цій сфері спостерігається певний спад.

Причин кілька. Основні, це насиченість ринку, і присутність економічної кризи, яка зараз є в усьому світі, і вона впливає на будь-який бізнес, у тому числі і на супутникове телебачення. У часи, коли доходи громадян скорочуються, доводиться ретельно вибирати, на що першочергово витратити ці доходи, що скорочуються. І перегляд телевізора тут не на першому місці.

Продажі комплектів супутникового ТБ падають, це відзначають не лише дилери та установники, а й ритейлери. Стимулювати цей сегмент можна лише зниженням ціни, але навряд чи провайдери ніші платного супутникового телебачення на це підуть. Найбільші компанії які набрали свого часу найбільшу базу абонентів, не зацікавлені у її прирості. Набагато цікавіше та простіше викачувати гроші з існуючих клієнтів. На зниження ціни можуть піти лише ті учасники ринку, яким потрібно розширювати абонентську базу, навіть шляхом переманювання клієнтів у більших компаній.

При цьому треба врахувати, що часто не всі канали з супутника йдуть однаково добре. Крім цього, необхідно вибирати розмір антени з деяким запасом, щоб слабке погіршення сигналу, викликане, наприклад, атмосферними явищами, не приводило до сильного погіршення телевізійної "картинки". Тому найбезпечніший метод - звернутися у фірму, що займається установкою супутникових систем у вашому місті, і уточнити, наскільки добре приймаються в вашому регіоні цікавлять вас канали і який діаметр антени для цього необхідний. Вартість антени з збільшенням її діаметру зростає в геометричній прогресії по відношенню до її діаметра, а саме. За приклад візьмемо антену 0,6 м. Її вартість у середньому 600 - 1000 гривень. Тарілка 0,9 м. вже коштує приблизно 2000 грн. 1,2 м. вже 2500-3000 грн., 1,85 м. вже 5000 - 7000 грн.

Основний конкурент такого телебачення – інтернет. У глобальній мережі доступні онлайн-сервіси, які транслюють звичайні і кабельні канали, так і кінотеатри та інші майданчики, здатні задовольнити запити різних покупців. При

цьому такі послуги коштують дешевше, ніж супутникове ТБ. Для підключення такого телебачення потрібно:

- придбати обладнання ;
- оплатити майстрів із встановлення;
- внести абонентську плату .

Онлайн-сервіси пропонують платну передплату на канали та фільми від 70 гривень. Крім цієї суми, користувачам потрібно вносити оплату за інтернет. До мінусів онлайн-сервісів відноситься те, що для підключення подібних послуг потрібний телевізор, який підтримує трансляцію через Wi-Fi чи Ethernet кабель. Але такої техніки стає дедалі більше, у зв'язку із чим обладнання дешевшає. Крім онлайн-сервісів, людям доступне кабельне телебачення, яке за кількістю каналів та якістю трансляції не поступається супутниковому. При цьому в першому випадку за підключення не стягують платню, не потрібне спеціальне обладнання. А ціна за такі послуги нижча у 3-4 рази.

До цього слід додати, що якість трансляції із супутника залежить від погоди. Під час зливи, грози або мокрого снігу картинка пропадає через відсутність сигналу. Інтернет-з'єднання не залежить від погодних умов. Трансляція через мережу обривається тільки при:

- обриві кабелю;
- поломки обладнання (домашнього чи оператора);
- відсутність грошей на рахунку.

Також слід зазначити, що інтернет відкриває доступ до більшості каналів, які транслюються як Україною, так і іншими країнами світу. Супутникові оператори часто обмежують цей список. Однак на користь останніх говорить той факт, що низку трансляцій неможливо подивитися наживо через інтернет. Зокрема це стосується показу спортивних змагань. Подивитися подібні заходи можна за спеціальною передплатою. Але і онлайн-сервіси стали пропонувати аналогічну послугу, причому за ціною вона нижча, ніж оператори супутникового зв'язку.

Розвиток технологій змінило переваги людей. Смартфони стали невід'ємною

частиною повсякденного життя. За допомогою мобільної техніки люди не лише спілкуються між собою, а й переглядають відео та трансляції каналів, фільми та інші ролики.

Телебачення загалом зараз змушене конкурувати з інтернетом. А супутникове, через описані вище обставини, потрапило у скрутне становище. До цього слід додати ще й підвищення мобільності людини, а також збільшення навантажень, які зазнають люди в сучасних умовах. Тобто доросле населення, яке вважається основним споживачем телебачення, змушене переключати власну увагу на інші фактори.

Проте Україна вибивається із загальносвітових трендів. Якщо у великих містах населення переходить в онлайн, то в регіонах популярність супутникового та кабельного телебачення залишається на відносно високому рівні через розвинену інтернет-інфраструктуру.

3 СУПУТНИКОВИЙ ІНТЕРНЕТ

3.1 Розквіт та застій супутникового інтернету

Супутниковий інтернет доступний людям майже 20 років, але раніше технологія була нішевою через дорогі запуски ракет. Тепер, коли мільярдери вкладають гроші у власні космічні компанії, на орбіту щороку виходять тисячі літальних апаратів. 18 грудня 1958 р. військовий ретранслятор супутникового зв'язку (SCORE) був виведений на низьку навколоземну орбіту (LEO) за допомогою Атласу ВПС США. SCORE був розроблений для прийому передачі, запису її на плівку, а потім передачі в іншу точку Землі протягом декількох годин. Президент Ейзенхауер скористався можливістю, щоб продемонструвати американські технології, передавши світові записане привітання з Різдвом, вперше в історії супутник був використаний для зв'язку.

Визнаючи потенціал супутникового зв'язку, Джон Пірс, директор Bell Telephone Laboratories AT&T, розробив проекти, призначені для тестування різних концепцій супутників зв'язку. Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (NASA), якому всього два роки, планувало відправити в космос надувну сферу для наукових досліджень. Пірс хотів використати можливість відбивати сигнали від металевої поверхні повітряної кулі. 12 серпня 1960 року сферу під назвою Echo 1 було успішно запущено, і Пірс був підбадьорений випробуваннями світло-відбиваючих сигналів. Оскільки Echo 1 не мав електронного обладнання, супутник був описаний як пасивний. Щоб зв'язок був ефективним, Пірс вважав, що потрібні активні супутники.

Тим часом військові продовжували працювати над концепцією магнітофонного зв'язку, розробляючи нові супутники під назвою Courier. Перший був знищений під час вибуху ракети. «Кур'єр 2» був успішно запущений 4 жовтня 1960 року, але зазнав невдачі через сімнадцять днів роботи. За цей час значні військові ресурси були виділені на Атлас, Титан і розвідувальні супутники, які

мали пріоритет.

Через два роки після експериментів Echo 1 Bell Laboratories створила Telstar, активний супутник зв'язку, призначений для роботи на середній орбіті Землі (МЕО), приблизно на 5000 кілометрів (3107 миль) над поверхнею Землі. Протягом цього часу NASA вибрало проект супутника від RCA під назвою Relay для тестування зв'язку МЕО, але погодилося запустити Telstar, як тільки він буде готовий. Telstar 1 був запусканий 10 липня 1962 року, а Relay 1 був відправлений 13 грудня того ж року. Обидва були успішними, і, незважаючи на більшу витонченість Relay 1, люди пам'ятали прямі телевізійні трансляції Telstar зі Сполучених Штатів до місць у Європі.

Незабаром були вивчені переваги та недоліки супутників зв'язку LEO та МЕО. Однією з проблем супутників зв'язку на орбітах, менших за геосинхронні, є кількість супутників, необхідних для забезпечення безперервної передачі. У той час як один супутник GEO може покривати 34 відсотки поверхні Землі, окремі супутники LEO та МЕО покривають лише від 2 до 20 відсотків. Це означає, що для мережі зв'язку необхідний парк супутників, який називається «сузір'ям».

Основною перевагою використання супутників зв'язку LEO та МЕО є мінімізація затримки або затримки часу між переданим сигналом і відповіддю, яку часто називають «ефектом відлуння». Незважаючи на те, що передача йде зі швидкістю світла, затримка в 0,24 секунди для сигналу туди й назад через супутник GEO може зробити телефонні дзвінки проблематичними. Незважаючи на цей недолік, відправка трьох супутників зв'язку на GEO заощадить гроші, і людям не доведеться роками чекати, поки група LEO або МЕО буде завершена.

Незабаром після того, як Радянський Союз запустив першу людину в космос, президент Джон Кеннеді захотів створити національний план освоєння космосу і зупинився на серії програм, які включали знамениті місії Аполлона на Місяць. Менш знайомий, але, можливо, більш значущий для довгострокової перспективи, Конгрес за підтримки президента Кеннеді санкціонував створення організації, покликаної інтегрувати національну мережу космічного зв'язку.

Створена в лютому 1963 року згідно з Законом про супутники зв'язку 1962

року, Корпорація супутників зв'язку, або Комсат, отримала завдання якомога швидше створити національну супутникову систему зв'язку. Половина Comsat буде публічно продана, а інша половина буде придбана виробниками супутників. Першою серйозною перешкодою для Comsat було рішення, яку супутникову систему він буде переслідувати: LEO, MEO чи GEO. Оскільки Telstar і Relay були успішними, ці системи MEO здавалися вибором за замовчуванням. Однак для безперебійного зв'язку знадобилося близько двадцяти супутників, таких як Telstar або Relay, вартість яких оцінюється в 200 мільйонів доларів. Президент Comsat Джозеф Чарик, ветеран супутникових інженерних програм, не був упевнений, що це правильний шлях.

Тим часом Hughes Aircraft Company розробляла серію супутників Syncom, кожен з яких був розроблений для тестування комунікаційних технологій в GEO. Перші два супутники були не зовсім вдалими, але Syncom 3, запускений 19 серпня 1964 року, досяг стаціонарної GEO. Чарик рано знав про проект Syncom і уважно стежив за його ходом. Комсат почав усвідомлювати, що супутникова мережа зв'язку GEO є найбільш практичною з точки зору вартості. Тим не менш, Comsat звернувся до низки компаній з проханням вивчити доцільність сузір'їв зв'язку LEO у випадку, якщо система GEO виявилася невдалою. AT&T і RCA досліджували переваги випадкової системи, в якій супутники вільно дрейфували без будь-якого особливого зв'язку один з одним. STL та ITT вивчали поетапний підхід, коли ряди супутників, що обертаються навколо LEO, були розміщені таким чином, щоб забезпечити безперервний безперебійний зв'язок. Comsat нарешті вирішив використовувати систему GEO, і 6 квітня 1965 року він запустив Early Bird. Цей супутник також став тестовим стендом для вирішення проблеми затримки, і методи придушення ефекту відлуння були успішно використані. Протягом цього часу NASA продовжувало фінансувати дослідження в області супутникових технологій зв'язку, надаючи внесок у такі програми, як Applications Technology Satellites (ATS). Було розроблено та запусчено шість блоків ATS, кожен з яких був розроблений для тестування різних технологій, пов'язаних із пропускну здатністю та новими компонентами. Особливе значення мала пропускна здатність, діапазон частот, що

використовуються в супутнику.

Провайдери супутникового зв'язку були особливо зацікавлені у збільшенні пропускної здатності транспондерів, що використовуються для телефонних розмов та телевізійних передач. Наприклад, телефонний дзвінок використовує пропускну здатність близько 5 кілогерц. Супутник з пропускнуою здатністю 50 кілогерц може обробляти десять дзвінків одночасно. Ранні супутники могли обробляти лише близько тридцяти дзвінків одночасно і були легко перевантажені. Дослідження продовжували покращувати проблеми пропускної здатності, а цифрові технології значно збільшили кількість одночасних дзвінків. Інженери-супутники також розробили антени, які не заважали системам, що обертаються поблизу, і рекомендували адекватне відокремлення між супутниками для запобігання перешкодам сигналам.

Апарати NASA проекту Syncom транслювали телевізійну картинку з Олімпійських ігор у Токію, а пізніше забезпечували зв'язок вищого командування американської армії під час війни у В'єтнамі.

У квітні 1965 року американський Intelsat I став першим комерційним апаратом, через який працював телефонний зв'язок, телебачення та факс. Пробувши на орбіті більше чотирьох років, замість запланованих 18 місяців, Intelsat I показав, що один пристрій у космосі може забезпечити якісний та швидкий зв'язок із космосу між Америкою та Європою.

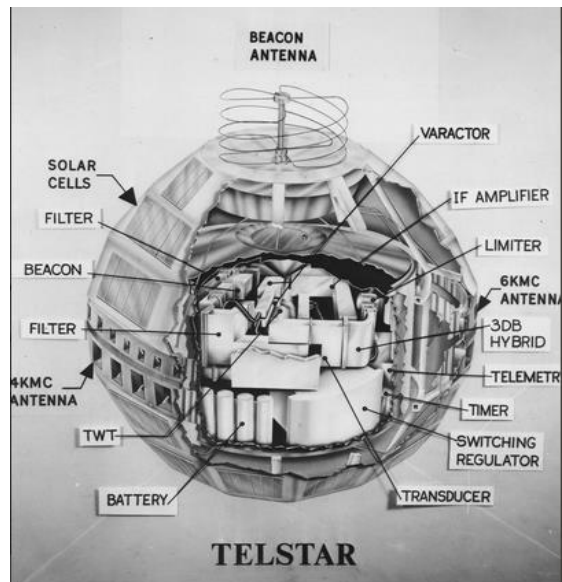


Рис. 3.1. Будова одного з перших супутників.

Intelsat I знаходився на геостаціонарній орбіті. Це означає, що супутник розташований над екватором та його кутова швидкість руху дорівнює швидкості обертання Землі. Він хіба що зафіксований над однією точкою і наземні тарілки налаштовуються точно нього. Висота такої орбіти – 35786 кілометрів.

Геосинхронні супутники описують вісімку, а геостаціонарні статичні по відношенню до наземного спостерігача і покривають майже половину земної кулі.

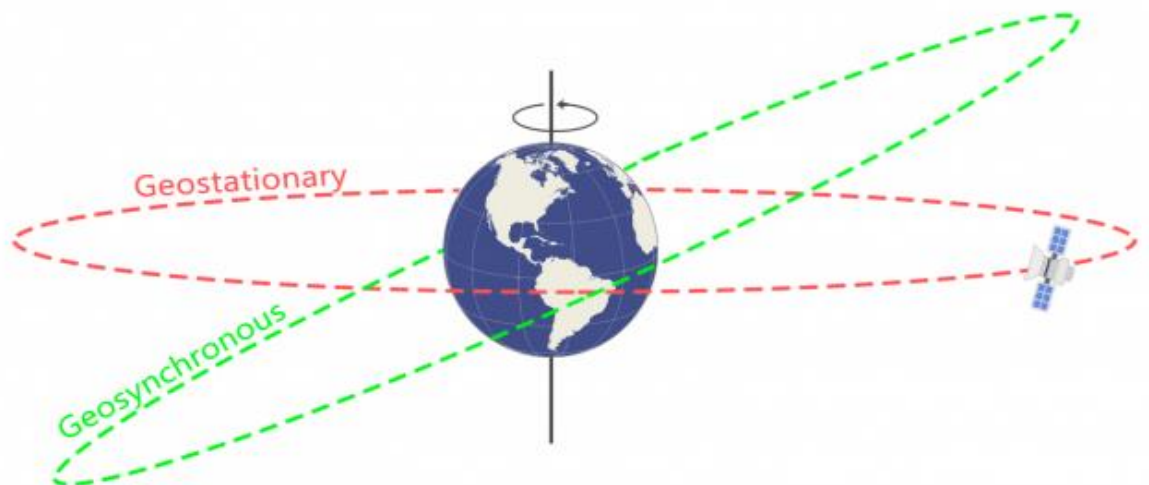


Рис. 3.2. Геостаціонарна та геосинхронна орбіти.

До 1970-х супутників ставало більше — і СРСР, і США запускали апарати

для побутового, комерційного та військового зв'язку. Технології розвивалися та нові апарати регулярно збільшували зону покриття. У 1990-х з'явилися технології малих наземних станцій (VSAT), які вже можна було розмістити в офісі чи невеликому селищі. Незабаром ТВ приймачі отримували сигнал безпосередньо з космосу завдяки освоєнню нових діапазонів частот радіохвиль.

Нові супутники передавали інформацію швидше і надійніше - виникла індустрія індивідуального супутникового телефонного зв'язку. У цей час активно розвивався інтернет, який вимагав прокладання фізичних мереж. У Європі та США виникла ідея передавати сигнал через супутник, як це вже робилося для телефонії та телебачення.

Наприкінці 2000-х кілька телекомунікаційних компаній у світі пропонували супутниковий інтернет бізнесу та приватним клієнтам. Комплект обладнання коштував від 199 до 650 доларів, а мінімальний щомісячний платіж — понад 40 доларів. Це приблизно вдвічі дорожче за комутований доступ через модем (dial-up), але й у кілька разів швидше. Модеми видавали близько 35-40 кбіт/с проти 150-200 кбіт/с супутникового інтернету.

Існує два види супутникового інтернету: асинхронний та синхронний. Перший спосіб має на увазі, що крім тарілки у клієнта є додатково передавальний пристрій. Так як обсяг вихідного трафіку зазвичай набагато менше, то для відправки запитів підійде повільний (9600 біт / с) і дешевий канал зв'язку.

При синхронному способі підключення тарілка приймає і відправляє запити. Середня швидкість з'єднання може бути 2-3 Мбіт/с, але для проходження радіосигналом всього шляху від супутника і назад потрібно близько 500 мілісекунд. Для провідних з'єднань показник затримки зазвичай дорівнює 3-5 мілісекунд.

На початку 2000-х супутниковий асинхронний інтернет завойовував ринок: користувачі платили окремо за вхідний та вихідний трафік, але отримували контент на швидкості в 2-3 рази більше. Типовий набір обладнання складався з невеликої тарілки, терміналу (або спеціальної плати) для з'єднання із супутником та модему для надсилання запитів.

Устаткування потребувало точного налаштування. Оператори попереджали

про метеозалежність супутникового інтернету та неможливість грати в онлайн-ігри через високі показники затримки. Втім, це не позначалося на веб-серфінгу, а файли завантажувалися швидше, ніж при роботі через модем. Користувачі з ентузіазмом купували комплекти та ділилися враженнями від використання.

Обсяг трафіку постійно зростав – в інтернеті з'являлася нова музика, фільми та онлайн-ігри. Дротовий інтернет, в основному за технологією xDSL (дозволяла не займати телефонний канал на відміну від dial-up), приходив у невеликі міста. З обладнання потрібен був діляк каналу і модем, що не вимагає частого налаштування, а тарифи ставали доступнішими з кожним роком.

Користувачі супутникового інтернету були незадоволені обмеженнями часу з'єднання — багатьом не вистачало стандартних 25 годин на тиждень, враховуючи час, коли інтернет працював з перебоями через погану погоду або випадкове зміщення тарілки.

Провайдери боролися із затримками, але безуспішно. Ні софт, ні обладнання не могли компенсувати відстань, що проходить сигналом, тому компанії задумали скоротити відстань до космічних об'єктів. Для цього супутники можна виводити на низьку навколоземну орбіту, втративши переваги геостаціонарної.

Згодом тарілки стали критикувати за зовнішній вигляд — вони псували архітектурний вигляд будівель і швидко іржавіли (рис. 3.3.).

Висота від 160 до 2000 км над поверхнею Землі придатна для розміщення невеликих супутників вагою до тисячі кілограмів. Для сталого зв'язку їх знадобиться кілька десятків чи сотень, але виведення апаратів на орбіту дешевше, а затримки зв'язку скорочуються через меншу висоту польоту.

У 1998 році компанія Iridium вивела в космос понад 60 пристроїв, які передають сигнал для телефонного зв'язку. Від задуму до реалізації пройшло більше 10 років і технологія прогнала GSM — хвилина розмови коштувала щонайменше шість доларів, а апарати архаїчного дизайну за дві тисячі доларів не подобалися покупцям. Система пізніше знайшла клієнтів, пройшовши

банкрутство, зміну власників та переосмислення стратегії розвитку.

Супутники Iridium першого покоління запам'яталися спалахами в небі — антени супутників відбивають сонячне світло на кілька секунд, що виглядає як «зірка, що падає»

Компанія Motorola в цей же час задумала вивести на низьку навколоземну орбіту 63 супутники для стабільного інтернету. На висоті близько 1400 кілометрів космічна радіація менше впливає на пристрої, зменшується час затримки, а подібні запуски набагато дешевші. Проте проект Celestri все одно виходив надзвичайно дорогим — майже 13 мільярдів доларів.

Motorola вийшла з проекту, вклавши гроші у Teledesic. Компанія планувала вивести на орбіту висотою приблизно 700 кілометрів більше ніж 800 супутників, але пізніше скоригувала плани — 288 супутників на висоті 1400 кілометрів. Компанія, в яку інвестували Білл Гейтс і Boeing, так і не побудувала робочих супутників, а 2003 року відмовилася від використання виділеного їй діапазону частот.

3.2 Як зараз працює супутниковий інтернет

З початку 2000-х провайдери по всьому світу пропонують синхронний та асинхронний доступ до інтернету. У Україні тарілки досі використовують для прийому у віддалених частинах міста чи населених пунктах, де немає провідного з'єднання.

Оператори пропонують комплекти обладнання вартістю від 8 тисяч гривень та абонентською платою з лімітованим трафіком від 5 до 10 гігабайт приблизно за 350 гривень. На сайтах відгуків повідомлення користувачів схожі на огляди супутникового інтернету початку 2000-х - люди скаржаться на затримки в 600 мілісекунд і просадки швидкості до 512 Кбіт/с.

Для порівняння швидкість мобільного інтернету стандарту 4G-мережа забезпечує швидкість завантаження даних до 700 Мбіт/с та передачі - до 90 Мбіт/с. І навіть використовуючи VPN сервіси швидкість мобільного інтернету буде вищою. [6]

Найбільші гравці в Європі та США — ті ж компанії, що просували супутники двадцять років тому. Hughes Network Systems та Viasat Inc. були піонерами супутникової передачі, але заробили стан передачі ТБ-сигналу. У США, як і раніше, понад 8 мільйонів людей користуються супутниковим синхронним інтернетом.

Більшість компаній, що надають супутниковий інтернет, працюють із геостаціонарними супутниками. Саме тому в різних країнах умови та вартість роботи супутникового інтернету однакові. Вирішити проблеми затримок, як і раніше, неможливо через відстань, на якій знаходяться супутники.

Однією з причин провалу перших проектів розміщення супутників на низькій навколосемній орбіті була вартість запусків. Польоти приватних космічних компаній обходяться дешевше за партнерство з державними структурами та їх кількість зростає. Власники телекомунікаційних компаній розраховують, що співпраця з приватними аерокосмічними фірмами допоможе розвивати супутниковий зв'язок, включаючи інтернет.

3.3 Актуальні проекти супутникового інтернету на низькій орбіті

- Iridium Communications: супутники першого покоління зведені з орбіти, але збереження концепції низької орбіти. Американська компанія пропонує телефонний зв'язок та інтернет на швидкості 704 Кбіт/с.
- Viasat Inc.: один із світових лідерів супутникового зв'язку (через супутники на геостаціонарній орбіті) кілька років працює над проектом

малих супутників, плануючи запустити майже три сотні до 2026 року. Деякі ключові топ-менеджери сумніваються в необхідності таких програм, пропонуючи зосередитися на традиційному для компанії бізнес.

- Telesat: компанія планує до 2024 року відправити угруповання з 298 супутників на низьку навколоземну орбіту. Фінансують проект влади Канади та приватні інвестори. Компанія запропонує традиційні рішення на високих орбітах, так і швидкісний проект Lightspeed.

- Project Kuiper: компанія Джеффа Безоса працює над власними супутниками та планує запустити прототипи на орбіту у 2022 році. У програмі більше 3000 супутників, але терміни залежить від аерокосмічного проекту Blue Origin.

- OneWeb: британська компанія до осені 2021 року відправила на орбіту понад 320 супутників. Угруповання працює на висоті 1200 кілометрів, а з 2020 року запускають супутники до космосу російські ракети. Продукт британців заточений під бізнес, а чи не під приватних клієнтів.

- SpaceX Starlink: проект доступного для кожного супутникового інтернету існує з 2015 року і вивела більше 1000 апаратів на орбіту. Компанія Ілона Маска досягла дозволу на виведення 12 тисяч супутників, що дозволить покрити всю земну кулю єдиною мережею зв'язку.

Про виведення супутників на низьку орбіту повідомляли Китай та Росія. В Азії одночасно існують кілька програм доступу до інтернету через супутники, але найперспективнішою вважається інфраструктура для промисловості та інтернету речей.

Більшість проектів супутникового Інтернету не торкнуться життя пересічних

користувачів Інтернету. Багато хто з них будується під потреби промисловості, судноплавства чи урядового зв'язку. Серед них виділяється Starlink, який спочатку замислювалися для забезпечення інтернетом населення, а не компаній.

4 ПРОЕКТ STARLINK

4.1. Народження проекту Starlink

Якщо шукати, звідки виріс цей проект, то швидше за все за точку відліку треба взяти 2007 рік, коли Грег Уайлер заснував компанію O3b Networks, акціонерами якої стали супутниковий оператор SES (йому належало 49,5% акцій), Google, банк HSBC, Фонд Liberty Global.

У 2016 році SES викупила частки решти акціонерів O3b Networks, і це стало визнанням успіху і компанії, і Грега Уайлера як керівника, і перспективності цього напряму бізнесу. Нагадаємо, що O3b — це скорочення від Other 3 billion: нагадування про три мільярди землян, які не мали у 2007 році доступу до Інтернету. Суть того проекту була у створенні угруповання супутників на орбіті висотою 8000 км від Землі над екватором, що дозволяє забезпечити широкосмуговим інтернетом населення планети, що мешкає між 45 градусами південної та 45 градусами північної широти. Очевидним недоліком проекту було те, що для прийому інтернету був потрібен комплекс з двох антен діаметром 2,4 м і вартістю \$120 тис. Дві антени потрібні були тому, що одна приймала сигнал, стежачи за супутником, а друга антена в цей час наводилася на наступний космічний апарат, щоб змінити першу, коли її супутник сховається за горизонтом.

Такий сервіс був сприйнятий урядами і телекомами країн Африки, острівних країн у Тихому океані, і навіть Пентагоном його зарубіжних баз. Тобто бізнес вдався, ресурс мережі було розпродано. Але через величезну вартість антен цією послугою не могли скористатися жителі сіл у глибині Африки, та й просто приватні особи. Потрібен був проект "персонального супутникового інтернету" на базі супутників на низькій орбіті.

І такий проект з'явився всередині компанії Google, куди 2013 року влаштувався на роботу Марк Кребс.

30 вересня 2014 року Google подала заявку на патент на супутникове

угруповання для широкосмугового доступу в інтернет із мережею наземних шлюзових станцій та міжсупутниковими лініями зв'язку, в якій Марк Кребс значився як винахідник.

Патент був виданий вже в 2017 році, ось як мало виглядати угруповання супутників:

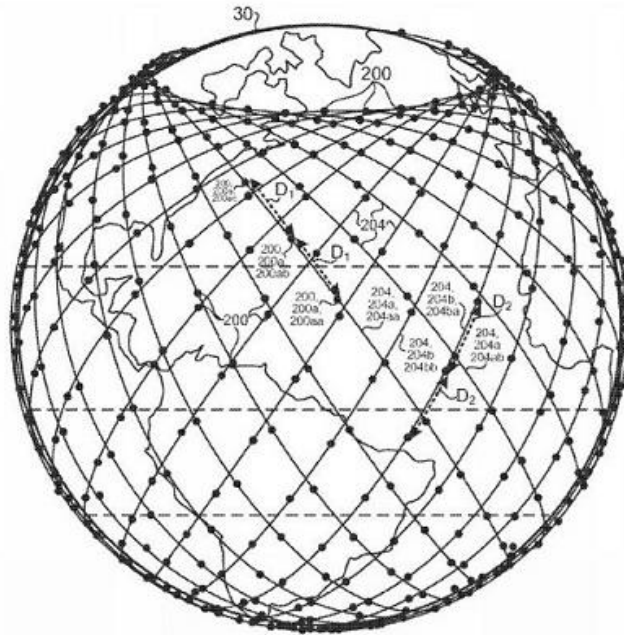


Рис 4.1. Угруповання супутників Starlink

Таким чином, можна точно стверджувати, що у 2013-2014 роках, всередині Google велася робота над супутниковим проектом для широкосмугового доступу до інтернету, і його активними учасниками були Марк Кребс та Грег Уайлер. Останній вирішив залучити до цього проекту Ілона Маска, який тільки-но закладав основи свого майбутнього успіху, переходячи на версію 1.1 ракети Falcon 9 і стикуючи вантажний космічний корабель Dragon до МКС. Маску відводилася роль «візника» по доставці супутників до космосу та «слюсаря» з їх виготовлення.

Що і як сталося у 2014 році між керівництвом Google, Ілоном Маском та Грегом Уайлером, я сказати не можу: треба чекати, поки всі вони не випустять мемуари і читатимуть, хто, що, кому сказав і хто куди послав, але результат відомий. Грег Уайлер розлучився з Google та заснував власний проект OneWeb

(WorldVu), а Ілон Маск заручився фінансуванням від Google та у 2014 році розпочав аналогічний проект.

Зазначимо, що, швидше за все, 2014 рік був дуже бурхливим, а переговори сторін досить напруженими, і сторони готувалися до того, що їхній спільний бізнес не відбудеться. Принаймні відомо, що 27 червня 2014 року до Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ) було подано заявку від імені норвезького регулятора в галузі зв'язку на супутникову мережу з 4257 супутників під назвою STEAM. При цьому мережа складалася з двох угруповань: STEAM-1 була заявлена у діапазоні Ku (11/14 ГГц), а STEAM-2 – спроектована як угруповання у діапазоні Ka (18/30 ГГц); її 4257 супутників розподілялися між 43 орбітальними площинами. Ініціатором цієї заявки у МСЕ була компанія Steam Systems, заснована у 2014 році юридичною фірмою Schjødt. У 2018 році у реєстрі власників Steam Systems відбулися зміни і тепер 100% власником є SpaceX. Перевага Норвегії перед США полягала у відсутності збору, який стягував американський галузевий регулятор Federal Communication Commission (FCC) — він вимагав майже \$1 млн, і без бюрократії. Нагадаємо, що FCC розглядала заявку SpaceX від 2016 майже два роки, ретельно вивчаючи претензії від усіх конкурентів.

Таким чином, можна сказати, що батьківський будинок для проекту Starlink - це Google, а на роль батьків претендують Грег Уайлер і Марк Кребс (2016 Марк перейшов у SpaceX, 2018 Ілон Маск його звідти вигнав, і з 2018 Кребс працює над проектом Amazon Kuiper у Джеффа Безоса). Але справжнє життя в Starlink вдихнув Ілон Маск, який загорівся цією ідеєю у 2014 році.

4.2. Основні події проекту Starlink

Січень 2015 р. – відкриття офісу в Редмонді, штат Вашингтон, створеного спеціально для розвитку проекту Starlink.

15 листопада 2016 р. — подання заявки до FCC на використання частотного спектру діапазонів Ku та Ka супутниковим угрупованням із 4425 космічних апаратів.

1 березня 2017 р. — подання заявки на використання частотного спектру V-діапазону супутниковим угрупованням із 7518 космічних апаратів.

30 березня 2018 р. — отримано дозвіл FCC на заявку від листопада 2016 року на мережу із 4425 супутників.

22 лютого 2018 р. — Ракетою-носієм Falcon 9 як попутне навантаження успішно запущені два тестові супутники (Microsat-2a та Microsat-2b). Згодом вони були перейменовані в Тінтін-А та Тінтін-В.

Жовтень 2018 р. — реорганізація офісу в Редмонді зі звільненням семи співробітників, у тому числі двох топ-менеджерів проекту Starlink. Серед звільнених опинилися віце-президент супутникового напрямку Раджив Бадьял і один з головних конструкторів Марк Кребс, який займався проектом супутникового інтернету ще в Google. Ілон Маск замінив їх, поставивши новим керівникам завдання розпочати запуск супутників уже у середині 2019 року.

8 листопада 2018 р. — подання заявки до FCC на зміну заявки мережі Ku і Ka діапазонів (4425 супутників) з виділенням першого етапу з 1600 супутників та зменшенням для них висоти орбіти з 1100 км до 550 км.

15 листопада 2018 р. — отримано дозвіл FCC на мережу за заявкою від 1 березня 2017 р. із 7518 супутників у V-діапазоні частот.

20 грудня 2018 р. — Відділ планування стратегічного розвитку та експериментів ВПС США уклав із SpaceX контракт на суму \$28 млн на випробування протягом наступних трьох років різних способів використання військовими сервісу супутникової мережі Starlink.

1 лютого 2019 р. — SpaceX направив у FCC заявку на включення та роботу 1 мільйона абонентських терміналів.

8 квітня 2019 р. — схвалено заявку SpaceX на ліцензію для роботи приватної системи дистанційного зондування Землі. Таким чином, SpaceX отримує право займатися зйомкою як своїх супутників, так і Землі. Роздільна здатність видана на кольорову зйомку з низькою роздільною здатністю для 60 космічних апаратів на круговій орбіті з нахилом 53°.

26 квітня 2019 р. — FCC схвалила заявку SpaceX на зміну раніше заявленої

мережі в Ku-діапазоні. Тепер йдеться про 1584 супутники на висоті 550 (замість 1150) км та з нахилом 53°.

Травень 2019 р. — в мережі інтернет починають з'являтися відео зі Starlink train – численні супутники цього угруповання виглядали в нічному небі як поїзд, що рухається. Захоплені вигуки глядачів починають супроводжуватись обуренням астрономів. Починається епопея «SpaceX vs астрономічна спільнота».

23 травня 2019 р. – запуск 60 супутників Starlink у версії v0.9 (фідерна лінія Земля-космос у Ku-діапазоні). Перші публічні фото супутників та їх укладання під обтічник ракети Falcon 9.

28 червня 2019 р. — SpaceX подала до FCC повідомлення про початок тестів наземних терміналів. Йдеться приблизно про 200 терміналів з плоскими фазованими ґратами і десять — з параболічною антеною.

30 серпня 2019 р. — SpaceX подає до FCC чергову заявку на зміну характеристик угруповання: тепер перший етап мережі Starlink має складатися з 72 орбітальних площин, а не з 24. Відповідно змінюється і кількість супутників у кожній площині: замість 66 їх буде лише 22.

7 жовтня 2019 р. — SpaceX попросила FCC подати 20 заявок до МСЕ на 30 тис. супутників на низькій орбіті.

11 листопада 2019 р. - запуск 60 космічних апаратів Starlink версії 1.0. Висота кругової орбіти відділення супутників від ракети — 280 км, тобто значно нижчі, ніж у першому пуску.

20 листопада 2019 р. — на Всесвітній конференції з радіозв'язку (WRC), яку проводить МСЕ, прийнято рішення про час, який мають оператори супутникових угруповань на низькій орбіті для повного розгортання своїх систем. З моменту отримання МСЕ заявки (їх подає національна адміністрація країни, де знаходиться оператор угруповання) на виділення частотного спектра для супутникової мережі оператора починається відлік у 7 років. Не пізніше ніж через 7 років (інакше заявка анулюється) оператор зобов'язаний розпочати розгортання своєї супутникової мережі таким чином, щоб у перші 2 роки було запущено 10% космічних апаратів, 50% - протягом перших п'яти років, а все угруповання (100% заявлених супутників)

) через 7 років. Якщо оператор не зміг це виконати, його права на спектр обмежуються пропорційно до кількості запускених супутників до кінця цих семи років.

7 січня 2020 р. - третій запуск 60 космічних апаратів Starlink (другий запуск супутників версії 1.0).

29 січня 2020 р. - четвертий запуск 60 космічних апаратів Starlink (третій запуск супутників версії 1.0).

4 лютого 2020 р. — австралійський регулятор у сфері телекомунікацій (The Australian Communications and Media Authority) відкрив для SpaceX доступ до ліцензії з правом надавати послуги в Австралії.

17 лютого 2020 р. - п'ятий запуск 60 космічних апаратів Starlink (четвертий запуск супутників версії 1.0).

18 березня 2020 р. - шостий запуск 60 космічних апаратів Starlink (п'ятий запуск супутників версії 1.0).

17 квітня 2020 р. — SpaceX надсилає до FCC заявку на зміну архітектури мережі Starlink Ku/Ка-діапазонів. Усі супутники працюватимуть на орбіті між 540 та 570 км.

22 квітня 2020 р. - сьомий запуск 60 космічних апаратів Starlink (шостий запуск супутників версії 1.0).

23 квітня 2020 р. — Ілон Маск анонсує у Twitter, що закриті бета-тести послуг Starlink розпочнуться приблизно через 3 місяці, а публічні — приблизно через 6 місяців.

17 травня 2020 р. з'явилися перші фото абонентського терміналу для мережі Starlink, фото знято на гейтвеї в місті Меррілан (штат Вісконсін).

20 травня 2020 р. SpaceX подала заявку на ліцензію Basic International Telecommunications Services (BITS), яка дає право надавати послуги зв'язку в Канаді.

1 червня 2020 р. - SpaceX подала у FCC заявку на 2-ге покоління мережі Starlink у складі 30 тис. супутників на орбітах від 328 до 614 км.

4 червня 2020 р. - восьмий запуск 60 космічних апаратів Starlink (сьомий

запуск супутників версії 1.0). Один із супутників має козирок VisorSat для зменшення його видимості.

13 червня 2020 р. - дев'ятий запуск 58 космічних апаратів Starlink (восьмий запуск супутників версії 1.0). Додатково запущено три супутники SkySat.

14 червня 2020 р. – на сайті www.starlink.com відкривається реєстрація бажаючих брати участь у бета-тестуванні.

21 червня 2020 р. – з'явилася інформація про Wi-Fi роутер для терміналу Starlink. Роутер отримав сертифікат FCC і буде проводитись на Тайвані.

1 серпня 2020 р. – в інтернеті з'явилися перші результати тестів сервісу Starlink: швидкості до 60 Мбіт/с, затримка від 31 мс.

4 серпня 2020 р. — SpaceX звернувся до FCC з проханням розширити до 5 млн дозволений раніше дозвіл на 1 млн абонентських терміналів, обґрунтувавши це тим, що до її системи виявлено величезний інтерес і компанія отримала 700 тисяч заявок на тестування.

7 серпня 2020 р. - десятий запуск 57 космічних апаратів Starlink (дев'ятий запуск супутників версії 1.0). Додатково запущені 2 супутники BlackSky.

18 серпня 2020 р. - одинадцятий запуск 58 космічних апаратів Starlink (десятий запуск супутників версії 1.0). Додатково запущено 3 супутники SkySat.

3 вересня 2020 - дванадцятий пуск 60 космічних апаратів Starlink (одинадцятий пуск супутників версії 1.0).

3 вересня 2020 р. — SpaceX оголошує про успішні тести лазерного каналу зв'язку між двома супутниками Starlink.

6 жовтня 2020 р. - тринадцятий запуск 60 космічних апаратів Starlink (дванадцятий запуск супутників версії 1.0).

15 жовтня 2020 р. - канадський телеком регулятор CRTC схвалив видачу SpaceX ліцензії ВІТS на право надання базових послуг зв'язку в Канаді

18 жовтня 2020 р. – чотирнадцятий запуск 60 космічних апаратів Starlink (тринадцятий запуск супутників версії 1.0).

24 жовтня 2020 р. – п'ятнадцятий запуск 60 космічних апаратів Starlink

(чотирнадцятий запуск супутників версії 1.0).

27 жовтня 2020 р. — Space X розпочинає програму публічного бета тестування під гаслом 'Better Than Nothing' («Краще ніж нічого»). Учасникам бета тестування пропонується викупити термінали по 499 доларів (плюс податок штату та вартість доставки) та абонентська плата 99 доларів на місяць без обмеження обсягу трафіку. Обіцяна швидкість у діапазоні 50-150 Мбіт, при цьому можливі перерви у зв'язку. У 2021 році обіцяно суттєве покращення якості сервісу за рахунок оновлення ПЗ та збільшення числа супутників.

01 листопада 2020 р. — Space X отримує схвалення від ISED (Innovation, Science and Economic Development Canada) використання частот, і відповідно легальну роботу у Канаді

14 листопада 2020 р. — SpaceX почав розсилати термінали для публічного бета тестування абонентам у Канаді, що живуть на південь від 50-ї паралелі.

25 листопада 2020 р. – шістнадцятий запуск 60 космічних апаратів Starlink (п'ятнадцятий запуск супутників версії 1.0).

2 грудня 2020 - SpaceX отримав дозвіл на використання частотного ресурсу на території Аргентини для сервісу Starlink

18 грудня 2020 р. — SpaceX отримав дозвіл на використання частотного ресурсу на території Німеччини для сервісу Starlink

Друга половина грудня 2020 р. — SpaceX почав розсилати термінали для публічного бета тестування абонентам у Великій Британії, що живуть на південь від 50-ї паралелі.

10 січня 2020 р. — Space X отримав до цього дозвіл на використання його сервісу у Великій Британії, Німеччині, Греції та Австралії (<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-01-10/elon-musk-s-starlink-broadband-terminals-gets-approval-in-uk>)

20 січня 2021 р. – сімнадцятий запуск 60 космічних апаратів Starlink (шістнадцятий запуск супутників версії 1.0).

24 січня 2021 - перший пуск 10 космічних апаратів Starlink версії 1.0 на полярну орбіту.

24 січня 2021 р. – опубліковано знімок обладнання InterSatellite Link на супутниках для місії Transporter 1 з інформацією, що вони стануть стандартною комплектацією для всіх ШСЗ у 2022 році.

28 січня 2021 р. - у документі направленому Space X у FCC повідомляється, що розмір мережі StarLink досяг 10 000 терміналів

4 лютого 2021 р. – вісімнадцятий запуск 60 космічних апаратів Starlink (сімнадцятий запуск супутників версії 1.0). [2]

4.3 Цілі та вартість проекту

У січні 2015 року при відкритті офісу в Редмонді Ілон Маск зазначив:

«Ми хочемо змінити ситуацію з інтернет-трафіком у космосі. Наша мета - щоб приблизно 10% місцевого трафіку і 50% "далекого" (міжміського та міжнародного) інтернет трафіку йшла через супутникову мережу.

Це [інтернет] не може бути безкоштовним для користувача, я так не думаю.

Це [проект Starlink] коштуватиме дуже дорого. Повна версія системи - \$10-15 млрд, а може й більше.

Користувальницькі термінали коштуватимуть від \$100 до \$300 в залежності від типу терміналу.

Передбачається, що Starlink принесе значний прибуток та допоможе фінансувати місто на Марсі».

У січні 2017 року в газеті Wall Street Journal було опубліковано статтю двох американських журналістів — Енді Пазстора та Рольфа Вінклера, які якимось чином отримали доступ до бізнес-планів SpaceX зразка 2015 року. Згідно з цими бізнес-планами, проект Starlink повинен був уже в 2020 році обігнати за виручкою бізнес SpaceX щодо виведення супутників у космос, а до 2025 року SpaceX розраховувала, що виручка Starlink становитиме до \$30 млрд на рік (в 6 разів більше, ніж давав би ракетний бізнес) та компанія обслуговуватиме 40 млн абонентів (рівень ARPU становив би в цьому випадку \$62 на місяць). При цьому

операційний прибуток Starlink мав перевищити \$ 15 млрд на рік.

Наскільки заявлені у 2015-2016 роках цілі будуть відповідати суворій дійсності, ми, швидше за все, побачимо вже у 2021 році. Однак зазначимо, що сукупний дохід п'яти найбільших супутникових операторів у світі: Intelsat, SES, Inmarsat, Telesat і Eutelsat — склав у 2019 році \$7,75 млрд, на тлі яких мета SpaceX має оборот у \$30 млрд у 2025 році виглядає досить оптимістичною. .

Фінансування проекту відбувається за рахунок залучення коштів від нових та старих акціонерів SpaceX. Розміщення акцій йде у закритому режимі, і відомі лише обсяги залучених коштів. Так, наприклад, лише у першій половині 2019 року SpaceX залучила від акціонерів \$1,02 млрд. У серпні 2020 року SpaceX відвітувала перед SEC про залучення ще майже \$2 млрд у капітал компанії.

За оцінками аналітиків Morgan Stanley, опублікованими у липні 2020 року, проект Starlink не вийде на позитивний грошовий потік до 2033 року.

4.4 Склад угруповання Starlink

Говорячи про склад низькоорбітального угруповання Starlink компанії SpaceX треба зазначити, що воно складається як мінімум із двох окремих супутникових мереж. Перша мережа спочатку (згідно з заявкою SpaceX в FCC від 15 листопада 2016 р.) планувалася з 4425 супутників. Ця заявка схвалена FCC 29 березня 2018 р.

Табл.4.1

Данні заявки що схвалена FCC29 березня 2018 р.

Висота орбіти, км.	Нахил орбіти, градусів	Число орбіт/площин з даним нахилом	Кількість супутників у кожній площині
1150	53	32	50

Продовження табл.4.1

Данні заявки що схвалена FCC29 березня 2018 р.

1110	53,8	32	50
1130	74	8	50
1275	81	5	75
1325	70	6	75

Це повинно виглядати так:

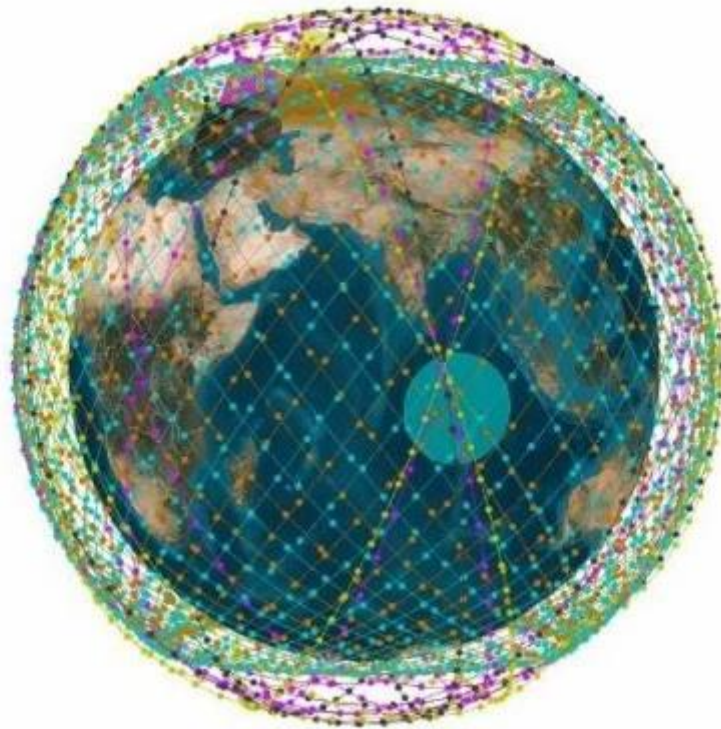


Рис 4.2. Рисунок заявки що схвалена FCC29 березня 2018 р.

Друга мережа з 7518 супутників має працювати в V-діпазоні (заявку подано 1 березня 2017 р., схвалено 19 листопада 2018 р.).

Угруповання VLEO системи Starlink:

Табл. 4.2.

Угруповання VLEO системи Starlink

Кількість супутників на орбіті	2,547	2,478	2,493
Висота орбіти, км.	345,6	340,8	335,9
Нахил орбіти, градусів	53	48	42

Потім SpaceX вносила зміни у 2018 році, знизивши орбіту до 550 км. У таблиці нижче наведено склад угруповання, згідно з останньою заявкою SpaceX до FCC (Федеральної комісії з зв'язку США) 17 квітня 2020 р. (заявка на даний момент ще не схвалена FCC):

Табл.4.3

Склад угруповання, згідно з останньою заявкою

Число орбіт/площин з даним нахилом	72	72	36	6	4
Кількість супутників у кожній площині	22	22	20	58	43

Продовження Табл. 4.3

Склад угруповання, згідно з останньою заявкою

Висота орбіти, км	550	540	570	560	560
Нахил орбіти, градусів	53	53,2	70	97,6	97,6

Також зазначимо, що на початку червня 2020 року SpaceX направила до FCC ще одну заявку, названу Generation 2, згідно з якою планується ще майже 30

тис. супутників на наступних орбітах:

Табл. 4.4

Угрупування Generation 2

Висота орбіти, км	Нахил орбіти, градусів	Число орбіт/площин з даним нахилом	Кількість супутників у кожній площині
328	30	1	7 178
334	40	1	7 178
345	53	1	7 178
360	96,9	40	50
373	75	1	1 998
499	53	1	4 000
604	148	12	12
614	115,7	18	18

Однак, у цьому огляді ми сконцентруємося на аналізі першого етапу мережі в Ku/Ka-діапазонах, яка реально розгорнуто зараз. На даний момент SpaceX бачить її в наступному вигляді: 72 орбітальні площини з нахилом 53 градуси по 22 супутники у кожній на висоті 550 кілометрів. Виглядає так:



Рис. 4.3. Схема першого етапу мережі

4.5 Архітектура мережі Starlink

На малюнку зображено архітектуру мережі Starlink та її найважливіші компоненти, а саме:

Космічний сегмент - це супутники на низькій орбіті (на даний момент розгортаються перші 1600 супутників на орбіті висотою 550 км із нахилом 53 градуси);

Наземний сегмент:

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

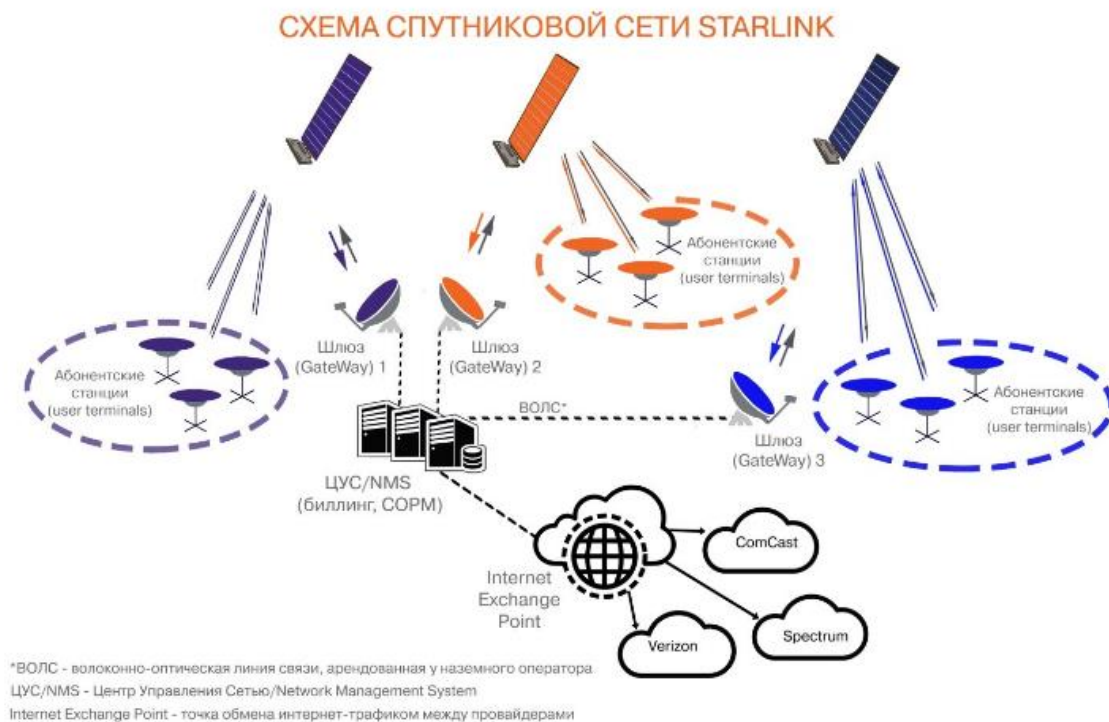


Рис. 4.4. Структура глобальної супутникової мережі Starlink

Щодо наземної мережі, то, по суті, вона побудована на мережі Google. На саму SpaceX зареєстровано дві автономні мережі - AS14593 та AS27277 (остання, можливо, використовується для внутрішньої IT-мережі SpaceX). Судячи з наявних даних, трафік абонентів SpaceX маршрутизуватиметься орендованим ВОЛЗ (переважно власною мережею Google, де це можливо) на найближчі вузли/точки обміну трафіком у США: LAX (Лос Анджелос), SEA (Сіетл), ORD (Орландо), LGA (Нью-Йорк), SJC (Сан-Хосе), DFW (Даллас), IAD (Вашингтон). У своєму твіті від 2.10.2020 Elon Musk повідомив, що компанія намагатиметься розміщувати гейтвеї прямо на будинках, де знаходяться «сервера», маючи на увазі, мабуть, саме центри обміну інтернет трафіком.

За даними на 2.11.2020 SpaceX має IP-адреси Австралії, Нової Зеландії, Канади, Великобританії, Німеччини та Іспанії, зареєстровані в AS (автономна система, по суті, ідентифікатор провайдера, під яким зареєстровані IP-адреси). AS36492 використовується Google під назвою "GOOGLEWIFI" для запуску загальнодоступних точок доступу Wi-Fi, але також використовується Starlink для

своїх IP-адрес).

Для Австралії та Нової Зеландії є два діапазони:

IPv4

103.152.126.0/24 Starlink Sydney PoP 1 user addresses (New Zealand)

103.152.127.0/24 Starlink Sydney PoP 2 user addresses

IPv6

2406:2d40:1000::/36 Starlink Sydney PoP 2 user addresses

2406:2d40::/36 Starlink Sydney PoP 1 user addresses (New Zealand)

Канада:

143.131.2.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.3.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.4.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.5.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.6.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.7.0/24 SpaceX Canada Corp.

Для Європи:

162.43.192.0/24 SpaceX Services, Inc. (ES, Madrid)

162.43.193.0/24 SpaceX Services, Inc. (ES, Madrid)

176.116.124.0/24 SpaceX Services, Inc. (UK, London)

176.116.125.0/24 SpaceX Services, Inc. (UK, London)

188.95.144.0/24 SpaceX Services, Inc. (DE, Frankfurt)

188.95.145.0/24 SpaceX Services, Inc. (DE, Frankfurt)

4.6 Космічний сегмент.

Космічні апарати Starlink спеціально сконструйовані для групового запуску двома стопками по 30 супутників під обтічником ракети Falcon 9 та мають розміри: довжина – 3,2 м, ширина – 1,6 м, висота – 0,2 м

Після виведення групи супутників на опорну орбіту (як правило це 280 км) супутники розкривають сонячні батареї, встановлюють контакт із наземним Центром управління та проводять перевірку на працездатність та відсутність пошкоджень при відділенні від ракети, далі вони активують електроракетні двигуни (ЕРД) на криптоні та починають рух на робочу орбіту, що займає 2-3 місяці.

Сонячні батареї при запуску складені «гармошкою» і мають 12 сегментів, де довга сторона кожного сегмента дорівнює ширині супутника (3,2 м).

Ми можемо оцінити розміри кожного сегмента $3\text{ м} \times 0,8\text{ м}$. Таким чином, загальна площа сонячної батареї становить $12 \times 3 \times 0,8 = 28,8\text{ м}^2$

Через втрати між сонячними елементами та по краях (коефіцієнт заповнення дорівнює 0,9) можна округлити це значення до 26 м^2 . Прийmemo щільність потоку сонячного випромінювання як $1300 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, ККД панелей 18% і отримаємо приблизно 6 кВт максимальної (пікової) електричної потужності. (Для порівняння супутники «Експрес» на платформі «Експрес-1000» вагою 1450 кг мають потужність сонячних батарей близько 3 кВт, але це можливе середнє значення).

Реальна потужність залежить від положення панелей сонячних батарей щодо Сонця: оптимальне падіння променів на панель – під прямим кутом.

Для переміщення супутника з опорної орбіти 280 км. на робочу 550 км. і утримання його на ній використовуються плазмові двигуни або ЕРД. Якщо відштовхуватися від ЕРД для малих супутників типу російських СПД-100 чи зарубіжних ВНТ-1500, їх споживана потужність дорівнює приблизно 1,5 кВт, а тяга 100 мН, при питомому імпульсі лише на рівні 1700-1800 секунд. ЕРД виглядає приблизно так (див. рис. нижче) та має габарити приблизно $20 \times 20 \times 15\text{ см}$.

ЕРД мають запас криптону орієнтовно 5-10 кг, який заправлений у сферичні балони високого тиску. Даний запас дозволить підняти супутник на кругову орбіту 550 км, утримати супутник на ній протягом п'яти років, а потім змінити орбіту з кругової на еліптичну, змінивши перигей з 550 км до, припустимо, 250 км, де за рахунок гальмування залишки атмосфери супутник достатньо швидко

загальмується та згорить.

Основним корисним навантаженням супутника Starlink є 2 антенні комплекси для зв'язку зі шлюзовими станціями (гейтвеями) та з абонентськими терміналами.

Антенний комплекс для зв'язку з гейтвеями (або фідерна лінія) є параболічні антени, що наводяться в процесі польоту на точку Землі, де знаходиться гейтвей. Фідерна лінія працює у Ка-діапазоні ($\frac{18}{30}$ ГГц).

Табл. 4.5.

Діапазони частот каналів зв'язку та напрямки прийому-передачі

Тип каналу зв'язку та напрямок прийому-передачі	Діапазони частот, ГГц	Доступно МГц в одній поляризації
Послуга: Вниз на абонентський термінал (із супутника на абонентський термінал)	10,7-12,7	200
Послуга: Вниз на гейтвей (з супутника на гейтвей)	17,8-18,6 18,8-19,3	800 500
Послуга: Уверх від абонентського терміналу (від абонентського терміналу на супутник)	14,0-14,5	500
Послуга: Уверх від гейтвея (від гейтвея на супутник)	27,5-29,1 29,5-30	1600 500
Телеметрія та керування униз (з супутнику на станцію контролю)	12,15-12,25 18,55- 18,60	100 50
Телеметрія та керування уверх (з станції контролю на супутник)	13,85- 14,00	150

Як впливає з таблиці, у розпорядженні супутника є 2100 МГц у напрямі від станції шлюзи до супутника і 1300 МГц у зворотному напрямку. При використанні обох варіантів поляризації (лівої та правої у разі кругової) це дозволяє використовувати для передачі трафіку максимум 4200 МГц від гейтвею на супутник та 2600 МГц у зворотному напрямку.

Також на борту знаходяться 4 плоскі квадратні антени з фазовими ґратами — три на передачу інформації від супутника на абонентський термінал та одна для прийому сигналу від терміналу.

Зв'язок між абонентським терміналом та супутником здійснюється в Ku-діапазоні, при цьому для передачі від супутника до абонента можна використовувати 2000 МГц, а від абонента до супутника лише 500 МГц. З урахуванням двох поляризацій для передачі трафіку супутник має 4000 МГц вниз і прийом на 1000 МГц.

Також на борту є комплекс обладнання для командної радіолінії та передачі телеметрії, що використовує по 150 МГц відповідно в Ka та Ku діапазонах.

Супутник Starlink є ретранслятором і не робить обробки інформації: на його борту відбувається лише зміна частоти сигналу, що приймається, і його посилення. Також супутники першого покоління немає між супутникового зв'язку (ISL – Inter Satellite Link) і можуть отримувати і передавати інформацію лише Землю. Як станція TT&C (управління, контролю, прийому телеметрії) заявлені 4 земні станції, у тому числі телепорт Брюстнер, розташований у штаті Вашингтон. У зоні видимості станції TT&C супутник Starlink знаходиться не більше п'яти хвилин, при цьому обсяг даних, що збираються з угруповання, становив у червні 2020 близько 5 Тбайт на добу, тобто не менше 10 Гбайт з одного супутника на добу.

На борту кожного супутника Starlink знаходиться близько 70 окремих процесорів під керуванням Linux та близько 10 мікроконтролерів.

Перебуваючи на орбіті 550 км, супутник може покрити своїм сигналом пляма на Землі радіусом 950 км (тобто діаметром приблизно 1900 км) за умови, що кут місця для абонентського терміналу не буде менше 25°. Зазначимо, що ефективна робота антен з плоскою фазовою решіткою можлива при куті 40° і більше.

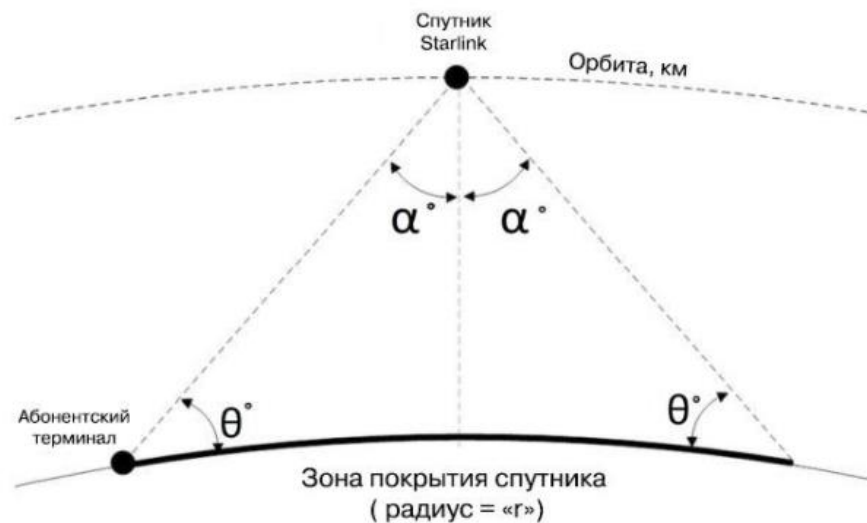


Рис. 4.12. Радіус зони видимості супутника під кутом 25 градусів, залежно від його висоти.

Табл. 4.6

Ефективна робота антен з плоскою фазовою решіткою у супутників Starlink

Орбіта "a", км	540	560	570
Мах кут відхилення α (у градусах)	56,7	56,4	56,3
Зона покриття "r", км	926,8	954,6	968,4

Можна легко розрахувати скільки потрібно супутників, щоб забезпечити 100% покриття Землі між північною та південною 50 паралелями за умови, що сигнал із супутника покриває всю зону видимості супутника на Землі. Площа поверхні Землі між північною та південною 50 паралелями дорівнює 300,4 млн кв. км (вся поверхня земної кулі 510 млн. кв.км). Так як нам необхідно 100% покриття без пробілів, кола зон накладатимуться один на одного і 100% покриття забезпечене, якщо ми будемо використовувати тільки квадрати в колі зони освітлення. Сторона такого квадрата дорівнює $L=D/\sqrt{2}$

Або в нашому випадку $L = 1356$ км, а площа, що закривається квадратом 1,84 млн. квадратних кілометрів. Таким чином, лише 164 супутники забезпечать 100%

покриття Землі між 50 північною та південною паралелями.

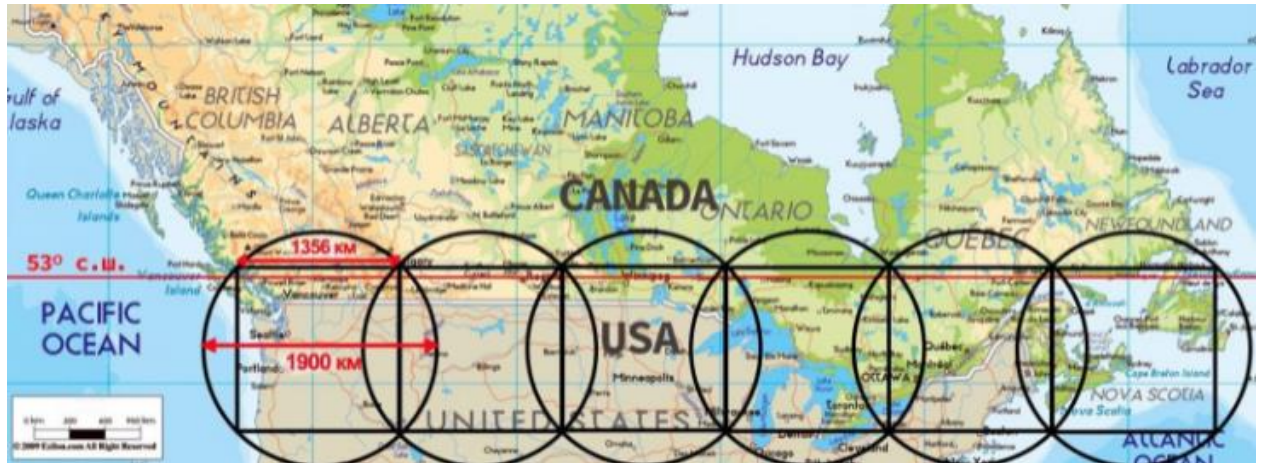


Рис. 4.13. Графічне зображення

4.7 Моделювання параметрів орбітальних оболонок сузір'я супутників Starlink

4.7. 1 Визначення площини горизонту, похилої дальності зв'язку, затримки сигналу супутника LEO

Усього для проекту Starlink планується розгорнути близько 12000 супутників та організувати їх у трьох орбітальних оболонках наступним чином.

- Перший рівень: 1440 ретрансляторів на висоті 550 км.
- Другий рівень: 2825 на висоті 1110 км.
- Третій рівень: 7500 супутників на висоті 340 км.

Перша оболонка з 1440 супутників складатиметься з 72 орбітальних площин по 20 супутників у кожній, а решту планується завершити до 2024 року для надання широкосмугових послуг у реальному часі.

Для угруповання супутників LEO як частини супутниково-наземної мережі, що призначена для глобальних широкосмугових послуг, слід використовувати наземні станції двох типів. Перший - це станція користувача (точка доступу користувача) з відповідною тарілкою і транс-приймачем для блокування / розблокування зв'язку з супутниками. Спочатку користувачі будуть спілкуватися з супутниками під кутом підвищення користувачів 40° , але це можна змінити. Starlink надіслав запит до FCC (Федеральна комісія з зв'язку) на кут піднесення нижніх користувачів 25° , а не 40° , щоб покращити прийом. Для цього супутники обмінюються даними з трьома випробувальними наземними станціями для короткострокових експериментів тривалістю менше 10 хвилин кілька разів на добу. Наземні станції, призначені для управління та експлуатації, зазвичай зв'язуються із супутниками на висоті 10° . До 1 квітня 2020 року Союз зацікавлених вченими (Union of Concerned Scientists, UCS), який веде базу даних активних супутників на орбітах, оголосив загалом 2666 супутників у космосі, з яких 1918 знаходяться на низьких навколоземних орбітах. Завдяки діям, вжитим SpaceX та іншими компаніями, найближчим часом супутники охоплять Землю, що обов'язково

вплине на небо і перетворить його. Що стосується перспективи зв'язку, робляться багато зусиль для охоплення Землі супутниками для повсюдних широкосмугових послуг, є дуже гігантським технологічним кроком, але з безліччю проблем, з якими доведеться зіткнутися в майбутньому.

Проаналізуємо параметри космічної орбіти, що впливають на процес хендовера між супутниками LEO. Хендовер (англ. Handover) - в стільникового зв'язку процес передачі сесії абонента від однієї базової станції до іншої. В супутникового зв'язку процес передачі контролю над супутником від одного науково-вимірального пункту до іншого без порушення і втрати обслуговування.

Кожна кругова орбіта характеризується своєю висотою H відповідно з радіусом орбіти r , взаємопов'язаним наступним чином:

$$r = H + R_E \quad (4.1)$$

де $R_E = 6371$ км - радіус Землі. Швидкість супутника v на круговій орбіті дорівнює:

$$v = \sqrt{\mu/r}, \quad (4.2)$$

$\mu = M \cdot G = 3,986 \times 10^5$ км³/с² – постійна величина, що є добутком маси M Землі та гравітаційної постійної Землі G .

Період обертання супутника виражається як:

$$T = 2\pi\sqrt{r^3/\mu}, \quad (4.3)$$

а кількість щоденних проходів (n) – це відношення сидеральної доби ($T = 23$ год 56 хв 4,1 с) до періоду обігу.

Дальність зв'язку математично задається як:

$$d = R_E \sqrt{\left(\frac{H + R_E}{R_E}\right) - \cos^2 \varepsilon_0} - \sin \varepsilon_0, \quad (4.4)$$

де d – похила відстань під кутом місця ε_0 , H — орбітальна висота, а $R_E=6371$ км — радіус Землі (рис.4.14). І навпаки, кут місця ε_0 , виражений через d , дорівнює:

$$\sin \varepsilon_0 = \frac{H(H + R_E) - d^2}{2dR_E}. \quad (4.5)$$

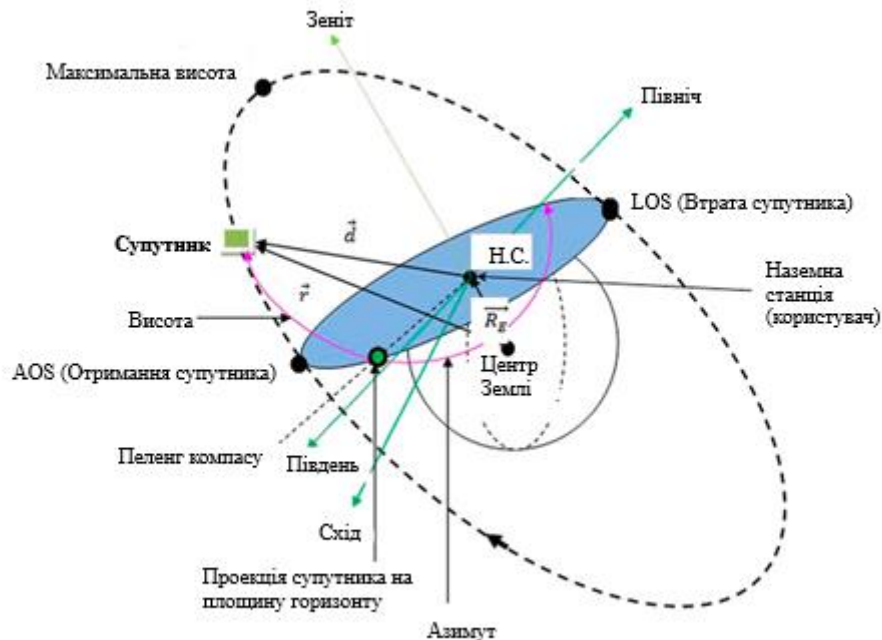


Рис.4.14. Моделювання положення супутника із космосу відносно наземної станції

Для $d^2 = H(H + 2R_E)$ виходить $\sin \varepsilon_0 = 0 \Rightarrow \varepsilon_0 = 0$, що представляє найбільшу відстань між супутником і наземною станцією (користувачем), як:

$$d_{\max} = d(\varepsilon_0 = 0) = \sqrt{H(H + 2R_E)} \quad (4.6)$$

Відстань d_{\max} під найменшим можливим кутом місця $\varepsilon_0 = 0$ являє собою максимально можливу відстань між наземною станцією (користувачем) і супутником висоти H , і, отже, найгірший випадок бюджету лінії. Виходячи з наведеного вище обговорення, пов'язаного з рис.4.15, ця відстань фактично представляє відстань між наземною станцією (користувачем) і точкою в просторі події AOS (Отримання супутника) або LOS (Втрата супутника) при $\varepsilon_0 = 0$, оскільки AOS і LOS симетрично пов'язані з наземною станцією (користувачем). Математично можна виразити як:

$$d_{\max} = d_{AOS} = d_{LOS} \cdot \quad (4.7)$$

Події AOS (захоплення супутника, англ. Acquisition of the Satellite) та LOS (втрати сигналу від супутника) на куті елевації супутника в 0° географічно визначають ідеальну площину горизонту (рис.4.15).

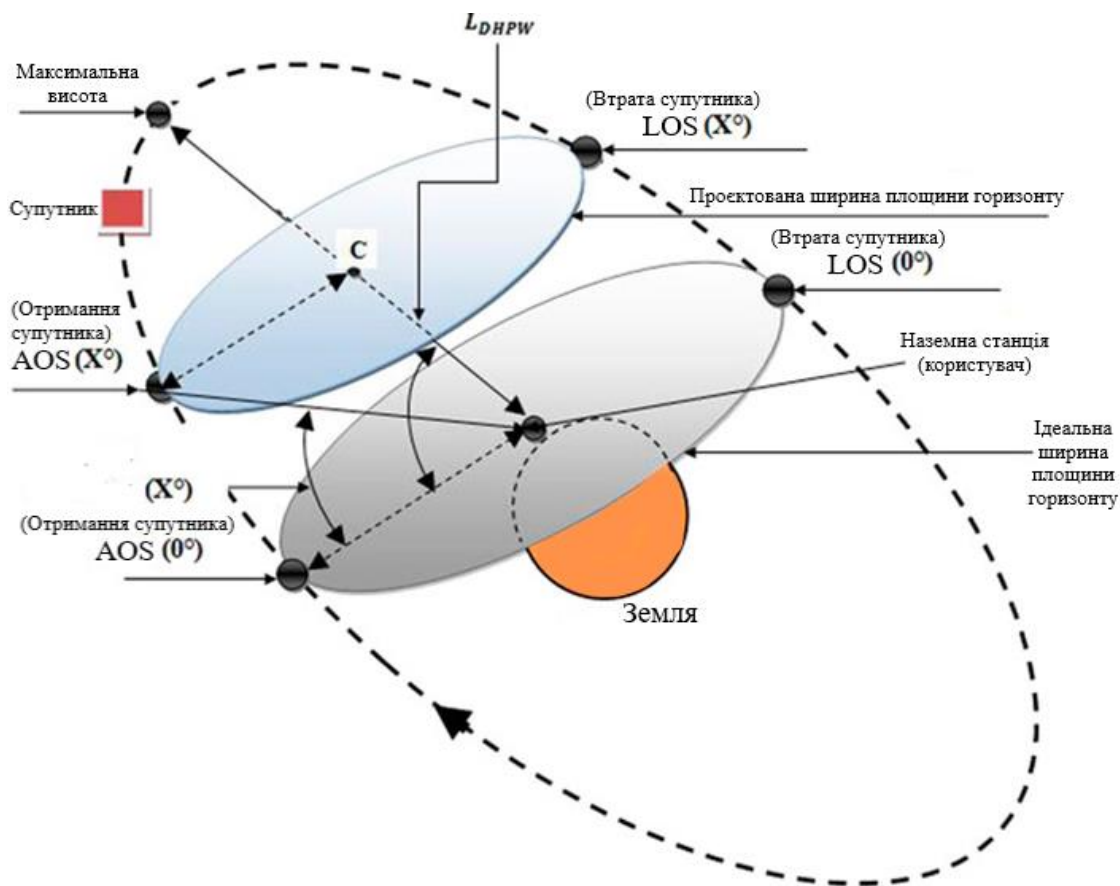


Рис.4.15. Моделювання ідеальної і спроектованої площин горизонту

Перша подія ідентифікує випадок, коли супутник з'являється тільки в площині горизонту для захоплення та зв'язку з наземною станцією (користувачем), а друга - випадок, коли супутник просто зникає з площини горизонту, розблокується та відключає зв'язок із наземною станцією (користувачем). наземна станція (користувач). Віртуальна лінія, що з'єднує точки в космосі, коли AOS та LOS відбуваються на куті елевації 0° , визначають ідеальну ширину площини горизонту (IHPW, англ. ideal horizon plane wideness), що представлена на рис.4.15. Ширина площини горизонту залежить від висоти орбіти супутника.

Ідеальна площина горизонту насправді являє собою область видимості під 0° кута місця. Але зазвичай через різні бар'єри (природні чи штучні) ця область

видимості могла бути прихована, і, отже, не можна було заблокувати/розблокувати зв'язок між супутником і користувачем. Щоб уникнути проблеми з такими перешкодами, оскільки область видимості могла бути прихована, конструктори заздалегідь визначають найнижчу висоту площини горизонту для безпечного зв'язку, яка буде заблокована/розблокована.

Нарешті, віртуальна географічна відстань між точками AOS і LOS в просторі, під кутом $\varepsilon_0=0$ представляє ідеальну ширину площини горизонту (IHPW), математично можна виразити як:

$$IHPW = d_{AOS} = d_{LOS} \quad (4.8)$$

$$IHPW = 2d_{\max} = 2d(\varepsilon_0 = 0) = 2\sqrt{H(H + 2R_E)}. \quad (4.9)$$

Мінімальна відстань між супутником і наземною станцією відбувається в разі ε_{\max} (Максимального кута елевації ε_0), тоді:

$$d_{\min}(\varepsilon_{\max}) = R_E \left(\sqrt{\left(\frac{H + R_E}{R_E} \right) - \cos^2 \varepsilon_{\max}} - \sin \varepsilon_{\max} \right), \quad (4.10)$$

$$d_{\min}(\varepsilon_{\max}) = H(90^\circ). \quad (4.11)$$

Похила дальність між супутником і користувачем змінюється з часом, викликаючи різні затримки сигналу від супутника до користувача або навпаки.

Позначаючи затримку сигналу (затримку) через τ , для супутникового шляху, який бачить користувач, при односторонньому зв'язку, затримка сигналу має значення:

$$\tau_{\min}(\text{зв'язуючи з } d_{\min}) < \tau < \tau_{\max}(\text{зв'язуючи з } d_{\max}). \quad (4.14)$$

4.7.2 Розрахунок зони покриття

Основною проблемою для глобального покриття є процес міжсупутникової передачі. Зона покриття супутника визначається як частка поверхні Землі і зазвичай виражається у відсотках. Концепція зони покриття наведена на рис.4.16,

де зображено два трикутники.

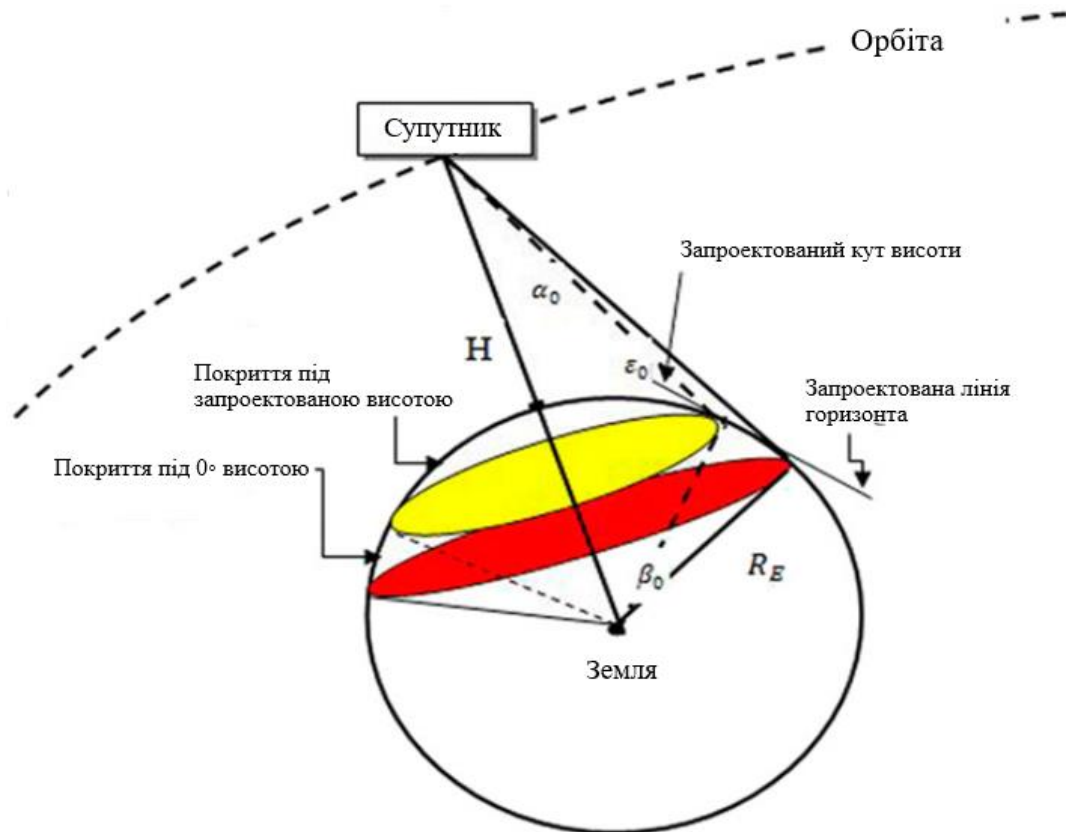


Рис.4.16 Випадок повного покриття супутником LEO

Більший із них представляє випадок повного покриття LEO під висотою $\varepsilon_0=0^\circ$. Відповідне покриття дає більший коло. Менший коло представляє зону покриття LEO на поверхні Землі під проектованим висотою. Для обох трикутників: ε_0 — кут місця, α_0 — кут надиру (точка небесної сфери, що знаходиться під горизонтом, протилежна зеніту), β_0 — центральний кут, d — похила дальність. H — висота орбіти, $R_E=6371$ км – радіус Землі.

Оскільки ідеальна площина горизонту завжди перпендикулярна радіус-вектору Землі, можна виразити:

$$\varepsilon_0 + \alpha_0 + \beta_0 = 90^\circ \quad (4.15)$$

Подальше обчислення виглядає так:

$$\sin \alpha_0 = \frac{R_E}{R_E + H} \cos \varepsilon_0 \quad (4.16)$$

Повне покриття досягається для $\varepsilon_0=0$, і ця умова визначає найбільший

найнижчий кут поширення низхідної лінії супутника, і він становить:

$$\alpha_{0,\max} = \sin^{-1} \left(\frac{R_E}{R_E + H} \right) \quad (4.17)$$

За визначенням, покриття C (%) — це частка поверхні Землі, яку охоплює супутник, виражена як відношення площі покриття супутника S_{SATCOV} до поверхні Землі S_E як:

$$C(\%) = \frac{S_{SATCOV}}{S_E} \quad (4.18)$$

$$C(\%) = \frac{1}{2}(1 - \cos \beta_0) \quad (4.19)$$

4.7.3 Порівняння параметрів супутників трьох орбітальних оболонок сузір'я Starlink

Порівняння параметрів супутників трьох орбітальних оболонок 550 км, 1110 км і 340 км сузір'я Starlink LEO (для кута елевації $\varepsilon_0=40^\circ$) за формулам (4.1)-(4.19) зроблено розрахунки основних параметрів, що впливають на процес хендоверу.

Табл.4.7

Порівняльний аналіз параметрів що впливають на процес хендоверу в сузір'ї Starlink LEO

Параметри	Перша оболонка H=550 км	Друга оболонка H=1,100 км	Третя оболонка H=340 км
Радіус, r (км)	6,921	7,481	6,711
Швидкість, v (км/с)	7.589	7.299	7.706
Орбітальний період, T (min)	95.5	107.3	91.2
Кількість щоденних проходжень, n	15.03	13.38	15.74

Порівняльний аналіз параметрів що впливають на процес хендоверу в
сузір'ї Starlink LEO

Похила дальність, d_{max} (км)	809.5	1,569.9	506.5
Затримка сигналу в один бік, τ	2,69	5.23	1.68
Ідеальна ширина площини горизонту (км)	5,405.8	7,833.9	4,206.8
Проектована ширина площини горизонту (км)	1,240.1	2,405.1	775.9
Відхилена від Надіра, α_0 (°)	44.8	40.7	46.6
Центральний половинний кут видимості, β_0 (°)	5.2	9.3	3.4
Покриття Земної поверхні, %	0.206	0.657	0.088

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі проведено аналіз розвитку супутникових систем leo для застосування в мережах наступних поколінь. Досліджено технологічні особливості реалізації супутникових групувань LEO. Проведено аналіз актуальності супутникового інтернету та супутникового телебачення. Проведений розрахунок параметрів космічної орбіти, що впливають на процес хендовера між супутниками LEO. Зроблено наступні висновки:

1. У напрямі супутникового телебачення спостерігається занепад у зв'язку з розвитком IPTV.

2. Впровадження супутникових технологій є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності, глобального охоплення та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу.

3. Найактуальніші у наш час супутникові системи — це системи LEO. Не дивлячись на більшу кількість супутників ніж у інших системах (GEO, MEO), супутникові системи LEO надають можливість зменшити затримки сигналу при підвищенні швидкості передачі інформації. Також сучасні проєкти передбачають знищення відпрацьованих супутників у верхніх шарах атмосфери за рахунок чого не буде збільшуватися кількість космічного сміття.

4. Надана геометрична інтерпретації та підтвердження процесу хендовера між супутниками для забезпечення безперебійних послуг, та оцінено, що LEO сузір'я Starlink може забезпечити надійний широкосмуговий зв'язок з низькою затримкою менше 20 мс.

Впровадження супутникових технологій є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності, глобального охоплення та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу. Тому прогнозується, що розвиток мереж зв'язку 5G та майбутньої технології 6G будуть реалізовані із застосуванням супутникових технологій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1) Гугл малюнки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.google.com.ua/imghp?hl=ua> (Дата звернення: 25.11.21)
- 2) Новітні проекти низькоорбітальних супутникових систем [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://habr.com/ru/top/daily/> (Дати звернення: 15.10.21-15.11.21)
- 3) Орбіти штучних супутників Землі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lib.qrz.ru/node/1357> (Дати звернення: 25.10.21-15.11.21)
- 4) Низькоорбітальні системи супутникового зв'язку [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://kunegin.com/ref1/sput/loworb.htm> (Дата звернення: 10.10.21)
- 5) Архітектура і основні принципи роботи супутникових систем зв'язку [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docplayer.ru/75447592-4-arhitekturai-osnovnye-principy-raboty-sputnikovyh-sistem-svyazi.html> (Дата звернення: 12.11.21)
- 6) XII Науково-технічна конференція студентів та молодих вчених «Сучасні інфокомунікаційні технології» [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://lsd.dut.edu.ua/uploads/n_244_30881721.pdf (Дата звернення: 30.11.21)
- 7) Кременецька Я.А., Яковець В.П., Сподарцев І.М. Багаторівнева модель наземних і неназемних телекомунікацій із застосуванням технологій оптичного безпроводного зв'язку. Зв'язок, №3 (151). Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.
- 8) The Focus Group Network 2030 welcomes you to join and participate. <https://itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx>.
- 9) W. Saad, M. Bennis, and M. Chen / A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems // IEEE network, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2019.
- 10) M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies," IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020.

11) F. Babich, M. Comisso, A. Cuttin, M. Marchese, and F. Patrone, "Nanosatellite-5G Integration in the Millimeter Wave Domain: A Full Top-Down Approach," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, no. 2, pp. 390–404, Feb. 2020.

12) M. Giordani and M. Zorzi, "Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities," *IEEE Network*, pp. 12–19, 2020. 3GPP, "Solutions for NR support for Non-Terrestrial Networks (NTN)," TR 38.821 (Release 16), 2020.

13) Recommendation ITU-R P.676, 2005. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf

14) List of spacecrafts deployed from the International Space Station (2020). https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_spacecraft_deployed_from_the_International_Space_Station (Accessed December 25, 2020).

15) Sheetz, M. (2019). Data from: Investing in Space: Amazon Wants to Launch Thousands of Satellites So It Can Offer Broadband Internet From Space. Washington D.C.: CNBC. <https://www.cnbc.com/2019/04/04/amazon-project-kuiper-broadbandinternet-small-satellite-network.html> [Accessed January 17, 2021].

16) Starlink (2020). https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink#Global_broadband_Internet (Accessed January 17, 2021).

17) Starlink Satellite Missions (2020). <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/starlink> (Accessed January 17, 2021).

18) Van Allen radiation belt (2020). https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt (Accessed December 15, 2020).

19) Yang, X. (2018). *Low Earth orbit (LEO) Mega constellations – satellite and terrestrial integrated communication networks*. Surrey GU2 7XH, UK: Institute for Communication Systems Faculty of Engineering and Physical Sciences University of Surrey Guildford, 196. [dissertation thesis].

20) Foust, J. (2018). *Data From: Telesat to Announce Manufacturing Plans for LEO Constellation in Coming Months*. Toronto: SpaceNews. Available at <https://spacenews.com/telesat-toannounce-manufacturing-plans-for-leo-constellation-in-coming-months>. (Accessed January 17, 2021).

21) The Parameters Comparison of the “Starlink” LEO Satellites Constellation for Different Orbital Shells. May 2021. DOI:10.3389/frcmn.2021.643095.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ