

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

## **Пояснювальна записка**

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: «**ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ КОНФІГУРАЦІЙ  
СИСТЕМ КОСМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА МЕТОДІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ЇХ  
ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ**»

Виконав: студентб курсу, групи РТДМ-61  
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Сидоренко О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Макаренко А. О.

(прізвище та ініціали)

Київ – 2022

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Телекомунікаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Мобільних та  
відеоінформаційних технологій  
\_\_\_\_\_ Руденко Н.В.

« » \_\_\_\_\_ 2022 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ  
Сидоренко Олексію Вадимовичу**

1. Тема роботи: “ Дослідження багаторівневих конфігурацій систем космічного зв'язку та методів збільшення їх пропускної здатності”,  
керівник роботи Кременецька Яна Адольфівна, д.т.н., професор кафедри  
МВТ

затверджені наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи \_\_ \_\_\_\_\_ 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Відомості про телекомунікаційні системи супутникового зв'язку, їх структуру. Угрупування GEO, MEO, LEO.
2. Результати експериментальних досліджень. Рекомендації МСЕ.
3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Розвиток супутникових систем та нові концепції супутникових систем.
2. Проект Starlink.

3. Математичне моделювання каналу супутникового зв'язку.

5. Перелік графічного матеріалу (слайди презентації):

6. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

### 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.    | Аналіз інновацій проекту «Starlink»   |                               |          |
| 4.    | Визначення похилої дальності зв'язку, втрат енергії супутникового каналу, втрат сигналу при переході в приміщення |                               |          |
| 5.    | Висновки, вступ, реферат  |                               |          |
| 6.    | Розробка презентації  |                               |          |

**Студент**

**Сидоренко О.В.**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

**Кременецька Я.А.**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

# ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Сидоренко Олексія Вадимовича

**на тему:** “Дослідження багаторівневих конфігурацій систем космічного зв'язку та методів збільшення їх пропускної здатності”

**Актуальність:**

Магістерська робота присвячена аналізу напрямків розвитку супутникових технологій для телекомунікаційних систем наступних поколінь. Дослідження в технологіях супутникового зв'язку є предметом інтенсивних інвестицій для реалізації нових великих супутникових угруповань. Дослідження в області об'єднання багаторівневих технологій, що включають наземні безпроводові, волоконно-оптичні, супутникові системи GEO, MEO, LEO є актуальною задачею для вирішення проблем збільшення пропускної здатності та доступності телекомунікаційних систем.

**Позитивні сторони:**

Проведений аналіз та порівняння методів доступу через супутникові угруповання GEO і низькоорбітальні системи другого покоління, наземне волокно. Проведені дослідження свідчать про високий науково-технічний рівень використання інформаційних 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 не достатньо проаналізовано критерії обмеження пропускної здатності супутникових систем другого покоління.

2. В третьому розділі не достатньо пояснень до розрахунку ємності Шеннона для багаторівневих систем наземних та супутникових конфігурацій.

**Висновки:**

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку “**відмінно**”, а студент Сидоренко Олексій Вадимович - присвоєння кваліфікації “ Магістр з телекомунікацій та радіотехніки”.

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Якість проекту (роботи)            |  |
| Виконано на замовлення підприємств |  |
| 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 Сидоренко О.В. до захисту магістерської роботи  
(прізвище та ініціали)

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

на тему: Дослідження багаторівневих конфігурацій систем космічного зв'язку та методів збільшення їх пропускну здатності

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту \_\_\_\_\_

(підпис)

Кравченко В.І.

(прізвище та ініціали)

### Довідка про успішність

Сидоренко О.В. за період навчання в Навчально-науковому інституті телекомунікацій,  
(прізвище та ініціали)

з 20 року до 20 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 Сидоренко Олексій Вадимович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння аналізувати тенденції розвитку супутникових технологій для телекомунікаційних систем, технологічні особливості реалізації супутникових багаторівневих групувань, проводити математичне моделювання каналу супутникового зв'язку, аналізувати параметри супутникових конфігурацій ліній зв'язку на різних частотах та різної висоти орбіти супутників, 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 Сидоренко Олексій Вадимович - присвоєння кваліфікації "Магістр з телекомунікацій та радіотехніки".

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

“ ”

\_\_\_\_\_ 202\_ року

### Висновок кафедри про магістерську роботу

Магістерську роботу розглянуто. Студент

Сидоренко

О.В.

(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Державній екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Мобільних та відеоінформаційних технологій

\_\_\_\_\_ Руденко Н.В.

---

(підпис)

---

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 70 с., 22 рис., 4 табл., 31 дж.

*Об'єкт дослідження* – перспективи реалізації супутникових групувань наступних поколінь.

*Предмет дослідження* – багаторівневі конфігурації систем космічного зв'язку

*Мета роботи* – проаналізувати багаторівневі конфігурації систем космічного зв'язку та оцінити ємність Шеннона для інтеграції наземних та супутникових мереж.

*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 GEO, MEO, LEO. Проаналізовано методи математичного моделювання каналу супутникового зв'язку. Проведено порівняння розрахованих параметрів супутникових конфігурацій ліній зв'язку для різних частот та різної висоти орбіти супутників LEO супутників. Показано, що для подальших досліджень являється пріоритетом дослідження методів практичного та теоретичного інтегрування наземних і супутникових, що працюють на різних орбітах та різних частотних радіодіапазонах, а також різних гібридних технологій, що сприяють підвищенню пропускної здатності та доступності інформаційних мереж.

НИЗЬКООРБІТАЛЬНІ СУПУТНИКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ; LEO; GEO; SRARLINK; ЄМНІСТЬ ШЕННОНА; ІНТЕГРАЦІЯ МЕРЕЖ

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП  | 6  |
| 1 РОЗВИТОК СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ТА НОВІ<br>КОНЦЕПЦІЇ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ                                | 7  |
| 1.1 Основні події в розвитку супутникових систем зв'язку   | 7  |
| 1.2 Основні параметри супутникових угруповань  | 8  |
| 1.3 Класифікація супутникових орбіт за нахилом до площини<br>екватора                                  | 13 |
| 1.4 Класифікація супутникових орбіт за висотою   | 16 |
| 1.5 Традиційні та нові концепції супутникових систем   | 18 |
| 1.6 Групування GEO-зв'язку   | 24 |
| 1.7 Супутникові МEO-угруповання  | 28 |
| 1.8 Супутникові LEO-угруповання  | 30 |
| 2 ПРОЕКТ STARLINK  | 35 |
| 2.1 Архітектура мережі Starlink  | 38 |
| 2.2 Власні можливості Starlink   | 42 |
| 2.3 Відмінності в цільових ринках: споживчі, корпоративні,<br>державні та телекомунікаційні (backhaul) | 45 |
| 2.4 Центр керування мережею, шлюзові станції, абонентський<br>термінал                                 | 46 |
| 2.4.1 Центр керування мережею  | 46 |
| 2.4.2 Шлюзові станції  | 47 |
| 2.4.3 Абонентський термінал  | 49 |
| 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ<br>КАНАЛУ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ  | 51 |
| 3.1 Визначення похилої дальності зв'язку   |    |
| 3.2 Втрати енергії супутникового каналу  | 53 |
| 3.3 Втрати сигналу при переході в приміщення.  | 53 |
| 3.4 Основні втрати на трасі  | 54 |
| 3.5 Атмосферне поглинання  | 55 |
| 3.6 Іоносферні / Тропосферні мерехтіння  | 58 |
| 3.7 Визначення площини горизонту, похилої дальності<br>зв'язку, затримки сигналу супутника LEO         | 59 |
| 3.8 Проходження супутника над наземною станцією  | 62 |
| 3.9 Порівняння ефективності супутникових систем  | 64 |
| ВИСНОВКИ   | 69 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ   | 70 |
| ДОДАТОК 1  | 73 |



## ВСТУП

Оператори зв'язку стикаються з безпрецедентним зростанням попиту на трафік мобільної передачі даних. Очікується, що трафік мобільних даних буде рости із середньорічним темпом зростання на 43 відсотків, досягнувши до кінця 2023 року майже 107 ексабайт в місяць. Різке збільшення трафіку даних в основному пов'язано з поширенням інтелектуальних пристроїв і безпроводових додатків з інтенсивним використанням пропускну здатності. Крім проблем підвищення пропускну здатності інформаційних каналів, також важливими проблемами є забезпечення глобального покриття. На сьогоднішній день основним способом міжконтинентального зв'язку є оптоволоконні магістралі, прокладені по дну океанів і морів. Такі обмеження не дозволяють в глобальному масштабі реалізувати якість технологій 5G і наступний покоління. Тому в останні час почали реалізовувати проекти супутникових низькоорбітальних угруповань, в яких також передбачається підтримка міліметрового діапазону. Kuiper від Amazon, Starlink від SpaceX і OneWeb - це три проекти угруповання супутників на низькій навколосемній орбіті (LEO) наступного покоління, які в даний час розробляються, і всі вони обіцяють забезпечити високошвидкісне широкосмугове з'єднання з малою затримкою по всьому світу. 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 параметрів супутникових сузір'їв LEO наступного покоління. Проаналізувати методи математичного моделювання каналу супутникового зв'язку. Провести порівняння параметрів супутникових конфігурацій ліній зв'язку на різних частотах, та різної висоти орбіти супутників LEO супутників. Проаналізувати показники LEO, GEO, MEO і волоконно-оптичних систем для глобального покриття.

# 1 РОЗВИТОК СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ТА НОВІ КОНЦЕПЦІЇ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

## 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 широкопasmове 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 широкосмуговий 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 мегагрупування 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  $0^\circ$ ); 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  $\theta$  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  $K \approx 6,61$ ),  $\psi_0$  - 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  $\varphi_{3C}$  - 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  $5^\circ$  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  $5^\circ$  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  $5^\circ$  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

потоків потужності. Для цього необхідно провести енергетичний розрахунок радіолінії КА - Земля за напрямками, що з'єднує КА з різними точками земної поверхні.

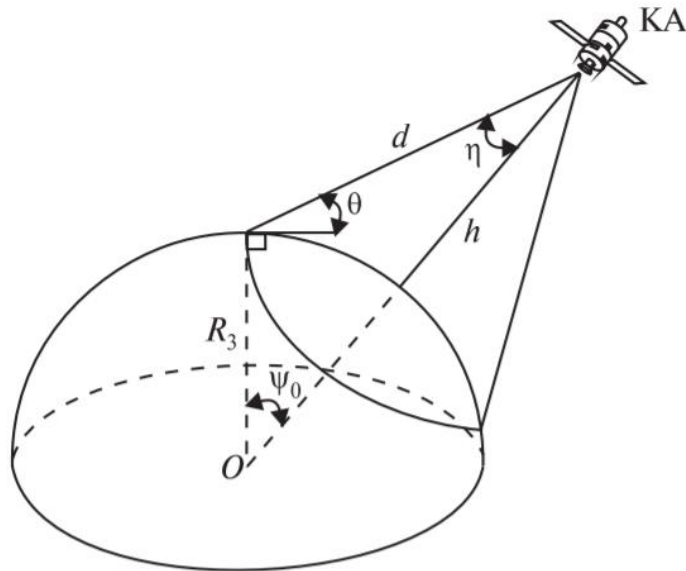


Рис. 1.1. Зона покриття КА для кутів місця антени ЗС величиною  $5^\circ$  і більше

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  $C$  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:

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

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.

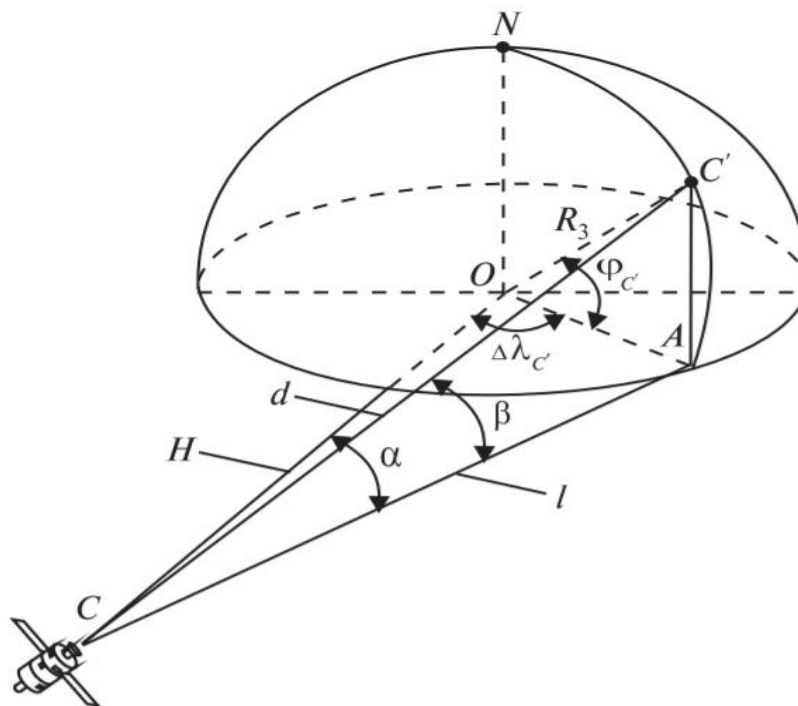


Рис. 1.2. Сферична система координат, початок якої поєднане з точкою розташування КА

Потім визначаємо щільність потоку потужності (ЩПП), створювану КА у поверхні Землі в даній точці, дБ×Вт/м<sup>2</sup>:

$$P_0 = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}}(\varphi) - b_{\text{пер}} - 20\lg(4\pi d) - A_G - A_P, \quad (1.5)$$

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<sub>ЗС</sub>, розташованої в будь-якій точці видимій області земної поверхні, достатній для прийому сигналів з необхідною якістю, дБ×Вт/Гц :

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

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

$G_{КА}(\varphi)$  - 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 огинача. 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 нахилу площини орбіти відносно площини екватора розрізняють низькі екваторіальні (нахилу  $0^\circ$ ), полярні (нахилу  $90^\circ$ ) 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.

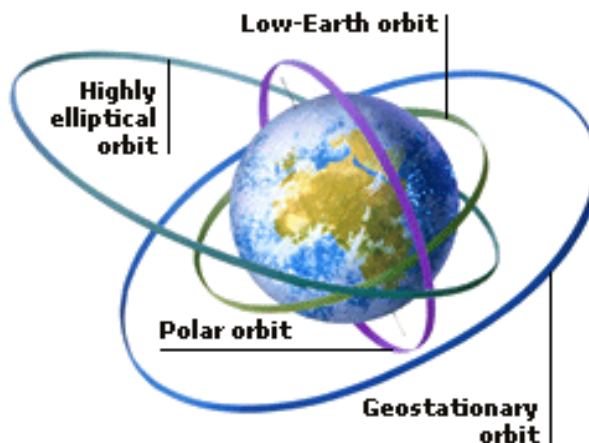


Рис.1.3. Класифікація супутникових орбіт за нахилом до площини екватора

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 відчують 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 круговою.

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 впливу 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 геостаціонарній орбіті (GEO) і на негеостаціонарних орбітах. У свою чергу, негеостаціонарні 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.

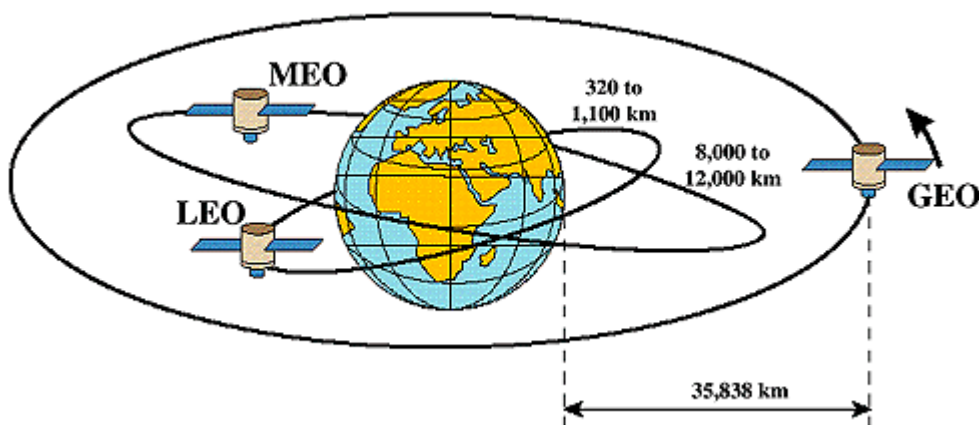


Рис.1.4. Класифікація супутникових орбіт за висотою GEO, MEO та LEO

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

**Геостаціонарні.** Більшість існуючих ССЗ використовують найбільш вигідну для розміщення супутників геостаціонарну 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 (Таблиця 1.1).

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.

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

Таблиця 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                        | $6 \times 10^{-8}$ | $6,6 \times 10^{-6}$ | $6(1,8-2,4) \times 10^{-5}$ |
| Кут радіовидимості КА на межі зон обслуговування, град              | 5                  | 15-25                | 10-15                       |

### 1.5 Традиційні та нові концепції супутникових систем

Нові супутникові угруповання перебувають на порозі розгортання, але їх довгостроковий успіх залежить від істотного скорочення витрат. В даний час на орбіті Землі обертається понад 2500 активних супутників, а астрономи-любителі

та інші спостерігачі бачать їх більше щомісяця. Якщо поточні пропозиції по супутниковому Інтернету стануть реальністю, близько 50 000 активних супутників вийдуть на орбіту над головою протягом десяти років. За останні 20 років багато що змінилося. Супутникова технологія просунулася вперед; попит на смугу пропускання різко виріс, і не передбачається ніякого уповільнення; компанії розробили креативні бізнес-моделі для отримання прибутку від підключення. Більш того, як технологічні компанії, так і інвестори тепер мають набагато більші запаси капіталу для інвестування, що дозволяє фінансувати великі групи - хоча цей капітал явно не володіє нескінченним терпінням. Ці зміни цілком можуть забезпечити успіх супутникового зв'язку. Аналіз показує, що компанії, які планують великі супутникові мережі Інтернет на LEO, як і раніше потребують значного скорочення ряду витрат, щоб забезпечити довгострокову життєздатність. Зниження витрат на запуск - це одна зі складових рівняння, але в рівній або більшій мірі важливо буде знизити вартість виробництва космічних апаратів, наземного обладнання і призначеного для користувача устаткування. Якщо постачальники і постачальники угруповань зможуть домогтися цих скорочень, вони зможуть відкрити достатній попит на великі сузір'я LEO, щоб перетворити ринки зв'язку як B2C, так і B2B2.

У найближчому майбутньому будь-яка компанія, яка спробує отримати фінансування, зіткнеться з проблемами, пов'язаними з економічною невизначеністю і безпосередніми проблемами суспільної охорони здоров'я. Ці проблеми будуть впливати на розвиток інших ліцензованих концепцій - Kuiper, Starlink і Telesat - по-різному, тому що їх підходи до володіння і фінансування розрізняються. Але криза також викликав сплеск попиту на підключення до Інтернету і підкреслив його важливість. Інвестиції в будь-яку нову інфраструктуру зв'язку будуть дорогими, але майже напевно будуть потрібні. У майбутньому великі концепції LEO можуть зіграти важливу роль в задоволенні цього зростлого попиту.

Традиційні супутники зв'язку з геостационарними орбітами довели свою ефективність з 1960-х років. Незважаючи на те, що вони дорогі, вони дуже

ефективні і мають тривалий термін служби. Їх висота - більше 35 000 км від Землі - забезпечує їм широке поле зору, дозволяючи операторам охопити більшу частину поверхні планети за допомогою трьох супутників, розташованих через відповідні інтервали. Останні технологічні досягнення, включаючи нові високопродуктивні і реконфігуровані конструкції, підвищили як ефективність, так і продуктивність.

Нові концепції супутників LEO, які обертаються на орбіті від 500 до 2000 кілометрів від Землі, пропонують більш швидкий зв'язок (вони мають меншу затримку) і часто забезпечують більш високу пропускну здатність на користувача, ніж супутники GEO, навіть більше, ніж кабельні, мідні і фіксовані безпроводові мережі до 5G. Зв'язок відбувається через сузір'я супутників LEO; глобальне покриття вимагає великої кількості космічних апаратів. Ці концепції зажадають серйозних змін в роботі супутників, включаючи виробництво і ланцюжок поставок, оскільки вони вимагають більшої кількості супутника і скорочують його середній термін служби (за оцінками, близько п'яти років зі Starlink. На сьогоднішній день аналітики галузі відстежують порядку 118 негеостаціонарних супутникових угруповань - вони знаходяться на різних етапах: хтось уже став історією, хтось поки існує тільки на папері, але є і такі, хто активно просуває свої проекти в реальній дійсності. Їх можна розділити на чотири великі класи: 1) системи дистанційного зондування Землі ( ДЗЗ) - 57 угруповань; 2) системи зв'язку - 45 угруповань; 3) системи ситуаційної обізнаності - 14 угруповань; 4) інші системи - 2 угруповання.

Далі виступаючий запропонував свій аналіз поточного статусу чотирьох найбільших низькоорбітальних мега-угруповань: One Web, SpaceX Starlink, Amazon Kuiper і Telesat LEO (Low Earth Orbit). Для SpaceX Starlink і Amazon Kuiper пріоритетними є масовий широкосмуговий доступ, в той час як One Web і Telesat LEO в першу чергу націлені для військових цілей, рухомого зв'язку, корпоративного сектору і бекхолл. До основних переваг проекту One Web відносить: закінчений вигляд системи, всі елементи взяті від лідерів галузі, присутність на ринку. Що ж стосується SpaceX Starlink, то незаперечною

перевагою цього проекту є наявність вертикальної інтеграції, повний контроль за цінами по всьому ланцюжку, наявність в США контракту на сільський інтернет (це позитивно впливає на інвесторів), капіталізація компанії SpaceX (наближається до \$ 100 млрд.). Перевагою проекту Amazon Kuiper є фінансування практично безмежне, оскільки є визнаним гравцем на ринку супутникових систем зв'язку на глобальному ринку.

Основними проблемами проекту OneWeb є висока ціну абонентських терміналів; незрозумілу схему фінансування; неясне позиціонування на цільовому ринку. Головною проблемою проекту Starlink є продажі поза територією США, які залежать не стільки від технічних деталей і бізнес-процесів, скільки від політики. Щодо проекту Amazon Kuiper немає ясності з тим, коли ж буде готовий носій для виведення на орбіту супутників зв'язку. У Telesat LEO очевидні проблеми з фінансуванням проекту.

Космічний сегмент мережі Starlink включають в себе супутники на низькій орбіті: на даний момент розгортаються перші +1584 супутників на орбіті заввишки 550 км з нахилом 53 градусів. Наземний сегмент складається з трьох частин: ЦУМ/NMS - це Центр управління мережею (Network Management System); Gateway - шлюзові станції; User Terminal - абонентські термінали.

Перший етап розгортання мережі StarLink буде являти собою 72 орбітальні площини на висоті 550 км - в кожній площині має бути по 22 супутника. Супутник є ретранслятором і не виробляє обробки інформації - на борту відбувається тільки зміна частоти сигналу і його посилення. Також супутники першого покоління не мають міжсупутникового зв'язку і можуть отримувати і передавати інформацію тільки на Землю. Між Gateway (шлюз) і супутником використовується Ка-діапазон, між абонентським терміналом і супутником - Ku-діапазон. На космічному апараті стоять 4 антени з фазованими антенними ґратами Ku-діапазону і 2 параболічні антени Ка-діапазону.

Шлюзові станції (Gateway) забезпечують передачу інформації в Ка-діапазоні (18/30 ГГц) з мережі Інтернет через супутник на абонентські термінали. У зоні покриття супутникового сигналу, через який працює в даний момент



абонентський термінал, повинен бути як мінімум один Gateway. Одна шлюзова станція може працювати з сотнями і навіть з тисячами абонентських терміналів. Типова шлюзова станція мережі Starlink має 8 антен, кожна з яких може передавати інформацію на «свій» супутник. В даний момент часу Starlink використовує на шлюзових станціях параболічні антени діаметром 1,5 м в «Радом» (радіопрозорі купола) власного виробництва з передавачем потужністю 50 Вт. Особливістю цих параболічних антен Starlink є те, що вони, на відміну від антен з фазованими антенними решітками, можуть працювати при малих кутах місця. Шлюзова станція повинна мати гарантоване енергозабезпечення та підключення до магістральних каналів мережі Інтернет (до бекбоном).

Абонентський термінал Starlink має антеною діаметром 55 см з фазованими антенними решітками, яка встановлюється поза домом так, щоб мати максимально відкритий вид на небо по всьому 360 градусам. Антена з'єднується з блоком живлення (до 180 Ватт) по кабелю з роз'ємом Ethernet, який одночасно служить кабелем живлення (технологія PoE - Power over Ethernet). Завдяки електроприводу така антена буде обертатися в горизонтальній площині на 360 градусів і може відхилитися на 70-80 градусів у вертикальній площині. У будинку розташовуються Wi-Fi-роутер і блок живлення. До речі, анонсована вартість абонентського комплекту складає 499 \$ (без урахування податків). При цьому продаж терміналу субсидується в рахунок майбутньої абонентської плати. Вартість самого сервісу становить \$ 99 в місяць з безлімітним трафіком.

Установка устаткування проводиться абонентом за принципом Plug & Play. У зв'язку з необхідністю огляду по всьому горизонту, абоненти Starlink часто стикаються з труднощами і змушені вдаватися до нестандартних рішень в процесі установки.

Аналізуючи можливості виходу проекту Starlink на міжнародний ринок, можна відзначити, що другим ринком, на якому почалося бета-тестування сервісу Starlink, є Канада - 14 листопада 2020 року SpaceX почав розсилати термінали для публічного бета тестування абонентам в Канаді, що живуть на південь від 50-ї паралелі . Зараз для SpaceX погоджено розміщення 4-х шлюзових станції на

території Австралії. 21 жовтня 2020 Французький телеком регулятор ARCEP погодив компанії TIBRO France SARL розміщення 3-х шлюзових станцій на території Франції. А 18 грудня 2020 роки було дозволено використання частот для Starlink в Німеччині. Комерційна ефективність проекту Starlink залишається на сьогодні під великим питанням, особливо з урахуванням того, що термін життя супутника становить 5-7 років, а значить, ця система потребує постійного оновлення орбітальної складової.

Друге покоління супутників OneWeb буде використовувати оптичні міжсупутникові канали, програмно визначаються радіостанції та мережі, а також вбудовану регенерацію сигналу і маршрутизацію трафіку. Компанія опублікувала подробиці своїх перспективних планів по створенню нового парку супутників а також, що буде введено в експлуатацію в 2024-2025 роках. Це піде за першим поколінням OneWeb, комерційне обслуговування якого почнеться в жовтні 2021 року в деяких частинах світу, а глобальне покриття - з травня по червень 2022 року. OneWeb буде виключно оптової операцією, почавши в цьому році над регіоном між 50 ° північної широти і північним полюсом і вийшовши на глобальний рівень в наступному році, коли все 648 супутників першого покоління будуть введені в експлуатацію.

Військові США купують послуги зв'язку у оператора супутників на низькій навколосемній орбіті Iridium і проводять експерименти з новими постачальниками, такими як SpaceX. P-LEO COMSATCOM стане першою спробою покупки широкопasmових послуг в більш широкому масштабі у провайдерів нового покоління. Space Force цікавиться пропозиціями від таких компаній, як SpaceX і OneWeb, у яких вже є операційні мережі, а також від підприємств, які планують почати розгортання угруповань в найближчому майбутньому, таких як Telesat LEO і Amazon Kuiper.

Сузір'я залишаються в центрі уваги, а системи наступного покоління заплановані для високопродуктивних супутників (HTS), спостереження Землі (EO), Інтернету речей (IoT) і навіть для навігації. Кожен з них являє собою постійний перехід до більшого охоплення, безперервному обслуговування і

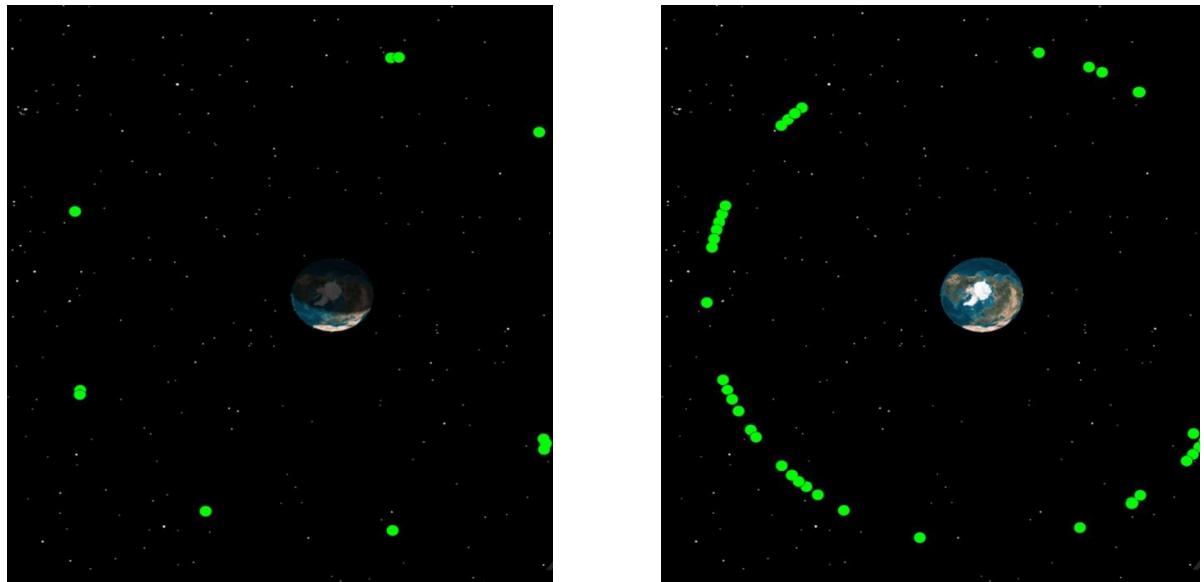
поліпшеним бортовим і мережевим можливостям.

У HTS і EO системи наступного покоління від SpaceX, Planet, Airbus, Maxar і, можливо, OneWeb розширюють можливості ринку. У IoT сузір'я прагнуть до низької затримки і глобальному охопленню і підтримки. Хоча бізнес-підходи та технологічні підходи для кожного сектора різні, кожен з них підтримується за рахунок економії на масштабі капітальних вкладень, диверсифікації варіантів запуску (виділений, спільний доступ) і гнучкості у виробництві, запуск і мережових можливостях.

## 1.6 Групування GEO-зв'язку

Теоретично, 3 супутників GEO має бути досить для глобального покриття. Головний недолік GEO-супутників зв'язку це велика затримка: мінімальна затримка передачі для супутника GEO становить 238 мс. На практиці, при використанні супутників GEO для надання доступу в Інтернет затримка може становити аж до 600 мс, що є неприпустимим для додатків, чутливих до затримок, таких як VoIP. Три класичних оператора GEO-зв'язку і їх супутникові угруповання: Inmarsat, Intelsat і Eutelsat рис.1.5.

**Inmarsat.** Перша назва Inmarsat - Міжнародна Організації Морський Супутникового Зв'язку (International Maritime Satellite Organization). До сих пір це як і раніше великий гравець в наданні послуг зв'язку для морських і повітряних суден з 12 активними супутниками GEO на орбіті. Поточна супутникова угруповання Inmarsat показана на рис. 1.5а.



а) Супутникове угруповання Inmarsat      б) Супутникове угруповання Intelsat

Рис. 1.5. Класичні оператори GEO-зв'язку

У поточному поколінні Inmarsat (Inmarsat-4 або I-4), кожен супутник важить 6 тонн і може надати глобальне покриття між широтами  $-82$  градусів і  $+82$  градусів, 19 регіональних зон покриття і близько 200 вузьких зон покриття. Останні здебільшого використовуються для надання доступу в Інтернет. Супутники I-4 працюють в L-діапазоні і перші три супутника I-4 склали першу в світі глобальну мережу 3G.

Супутники Inmarsat можуть надати цілий спектр сервісів, включаючи традиційні голосові дзвінки, низькорівневі системи відстеження даних, високошвидкісні Інтернет-послуги, а також передача сигналів лиха. Для послуг Інтернет, Inmarsat пропонує глобальну мережу супутникового широкосмугового зв'язку (BGAN), яка надає послуги мобільного цифрову мережу з інтеграцією служб (ISDN) «3G-типу» швидкістю до 492 кбіт/с. У порівнянні з традиційною земної 3G-осередком в 4 км, осередок BGAN покриває близько 800 км.

Inmarsat також спеціалізується на міжмашинній взаємодії (Machine-to-Machine - M2M), надаючи три типи послуг:

- BGAN M2M: Підходить для високочастотної передачі даних з низькою

затримкою. Це супутникова 3G-мережу, повністю підтримує IP-з'єднання і надає глобальний доступ (за винятком полярних регіонів). Даний сервіс посилає дані, використовуючи BGAN Standard IP зі швидкістю до 448 кбіт/с і затримкою від 800 мс.

- IsatM2M: Підходить для глобального сервісу зберігання та пересилання коротких пакетів даних. Цей сервіс може надати глобальний доступ (за винятком полярних регіонів). Може підтримувати швидкість в 10.5 або 22.5 байтів в напрямку відправлення та 100 байтів в напрямку отримання даних, з затримкою від 30 до 60 секунд.

- IsatData Pro: Надає двосторонню пересилку тексту і даних. Даний сервіс також надає глобальне покриття (за винятком полярних регіонів). Працює практично в реальному часі (із затримкою в 15-60 секунд в залежності від довжини повідомлення) в будь-якій точці світу і може бути ідеальним варіантом для віддаленого доступу до стаціонарних ресурсів. IsatData Pro може передавати 6400 байтів і отримувати до 10000 байтів.

Наступне покоління угруповання Inmarsat називається Inmarsat Global Xpress (Inmarsat GX), яку становить 3 супутника Inmarsat-5 (I-5). Це також перша глобальна комерційна служба супутникового зв'язку, що працює в Ka-діапазоні. Перший супутник I-5, I-5 F1, почав працювати в липні 2014 року. Inmarsat GX буде передавати дані в Ka-діапазоні (20-30 ГГц), кожен супутник може надати 89 малих фіксованих променя і 6 повністю керованих променів. Розроблено спеціально для задоволення постійно зростаючих вимог в доступі в Інтернет, надаючи при цьому швидкість до 60 Мбіт/с на користувача. Втім, незважаючи на приголомшливу швидкість доступу Інтернет, затримка складає близько 600 мс.

Супутники Inmarsat GX також оснащені деякими новими технологіями. До 72 з 90 точкових променів з високою пропускнуою здатністю можуть бути включені для динамічного регулювання покриття відповідно до щільністю трафіку. Вони також можуть використовувати кілька керованих точкових променів як частина корисного навантаження високої пропускнуої здатності (HCP), завдяки яким пропускну здатність для наземного користувача може бути

збільшена до 8 разів.

**Intelsat.** Intelsat, з англ. Міжнародна Організація Супутникового Зв'язку (International Telecommunications Satellite Organization), це конкурент Inmarsat з США. З угрупованням в 52 супутника зв'язку, Intelsat це також найбільший в світі оператор комерційної супутникового зв'язку. Частина поточної супутникового угруповання Intelsat показана на рис. 2.16. Intelsat надає рішення для служб в різних секторах: зберігання даних, телекомунікації, ЗМІ, мобільність, енергетика і уряд. Залежно від вибраного супутника, супутник буде передавати дані земним терміналів на частотах від С-діапазону до Ка-діапазону. Інші характеристики можуть відрізнятися в залежності від дати виробництва, сфери застосування і т.д.

Intelsat також стверджує, що є «першою і єдиною мережею», Intelsat Globalized Network, яка «дозволяє кожному зв'язатися з ким-завгодно в будь-якій точці планети». Об'єднуючи все супутники, наземні об'єкти і керовані служби, Intelsat Globalized Network може надавати високоякісні, рентабельні, масштабовані широкосмугові послуги зв'язку в будь-якій точці світу. Пріоритетна безпечна послуга з глобальним покриттям земної кулі доступна для корпоративних клієнтів.

Наступне покоління супутників Intelsat, під назвою Intelsat Epic, буде використовувати С-діапазон, Ku-діапазон і Ка-діапазон для надання різних типів точкових променів з різними можливостями підключення. Більше технічних подробиць можна дізнатися тільки зв'язавшись з Intelsat безпосередньо.

**Eutelsat.** З англ. Європейська Організація Супутникового Зв'язку (European Telecommunications Satellite Organisation), Eutelsat це оператор супутникового зв'язку, що спеціалізується на радіо і ТВ-передачі. З угрупованням в 40 супутників, що покривають Європу, Середню Азію, Азію, Африку і більш, Eutelsat на даний момент транслює сигнали 6600 телевізійних станцій (1200 з яких в HD) і 1100 радіостанцій. Частина поточної супутникового угруповання Eutelsat показана на рис. 31.7.

Крім ТВ- і радіотрансляцій, Eutelsat також надає інші послуги, такі як професійні мережі передачі даних (включаючи приватні мережі,

відеоконференції, трансляцію даних і т.д.) і широкомовні служби (включаючи магістральну IP-зв'язок, віртуальні приватні мережі, або VPN, широкосмуговий доступ в Інтернет і т.д.) використовуючи канали зв'язку С-, Ku- і Ka- діапазонів [42]. Eutelsat належить перший супутник високої пропускної здатності (High Throughput Satellite - HTS) в Європі, KA-SAT. Він надає 82 точкових променя Ka-діапазону діаметром 250 км. Для звичайних користувачів, KA-SAT надає швидкість низхідного потоку до 20 Мбіт/с і швидкість висхідного потоку до 6 Мбіт/с. Для професійних додатків швидкість підключення для користувача може бути підвищена до 50 Мбіт/с низхідного потоку і 20 Мбіт/с висхідного потоку - із загальною ємністю супутника більше 90 Гбіт/с.

### 1.7 Супутникові МЕО-угруповання

Середня навколосемна орбіта (Medium Earth Orbit - МЕО) це область космічного простору між геосинхронною орбітою (Geosynchronous Equatorial Orbit - GEO) і Низькою навколосемній орбітою (Low Earth Orbit - LEO). У порівнянні з супутниками GEO, супутники МЕО набагато більш легкі у виробництві і виведення на орбіту. У порівнянні з супутниками LEO, набагато менше супутників МЕО необхідно для глобального покриття земної кулі. Тому супутникові угруповання МЕО найчастіше використовуються для різних цілей, включаючи зв'язок і навігацію.

**О3b.** Мережа О3b (англ. «The Other 3 billion people») створена для надання широкосмугового Інтернет-доступу для зростаючого ринку, як впливає з назви. Система складається з 12 МЕО-супутників, що надає глобальне покриття на широтах +/- 62 °. Угруповання показана на рис. 2.2.

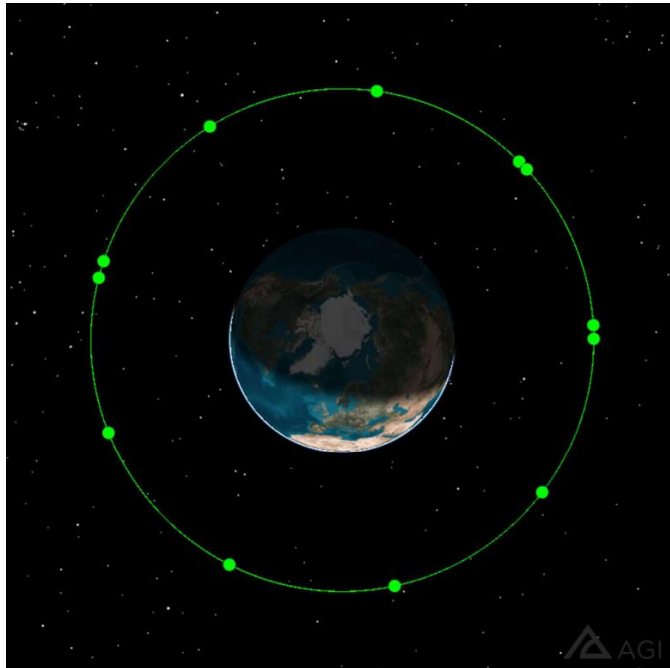


Рис. 1.6. Супутникове угруповання O3b (12 супутників)

Супутники O3b працюють на висоті 8000 км, передаючи сигнали в Ка-діапазоні. Через висоти орбіти, O3b гарантує затримку менше 150 мс, і завдяки використанню Ка-діапазону, O3b це перший оператор, що надає пропускну здатність 1.6 Гбіт/с через один транспондер. SES Network (Оператор мережі O3b) заявляє, що O3b надає якість досвіду (Quality of Experience - QoE) порівнянне з оптичним волокном, і є більш економним в порівнянні з GEO в разі рідкісного використання (Occasional Use - OU) на > 100 Мбіт/с.

Зокрема, O3b пропонує 5 типів сервісів, а саме:

- O3bTrunk. Сервіс, що надає високошвидкісний, бюджетний безлімітний широкопasmовий доступ.
- O3bCell. Сервіс, в основному працює як транспортна мережа зв'язку для 2G, 3G і 4G передач даних і голосу.
- O3bEnergy. МЕО-супутники O3b, що працюють в Ка-діапазоні, який працюють разом з додатковими GEO-супутниками С-діапазону для надання передачі даних з високою пропускну здатність і низькою затримкою енергетичним компаніям для моніторингу прибережних нафтогазових платформ в реальному часі.



- O3bMaritime. Крім надання широкосмугового доступу в Інтернет, спеціальної функцією цього сервісу є служба відстеження судів, що дозволяє клієнтам відслідковувати статус своїх кораблів в морі.

- O3bGovernment. Цей сервіс надає захищену передачу сигналів з дуже низькою затримкою (<65 мс) для державного і військового використання.

Наступне покоління мережі O3b називається O3b mPOWER. Систему mPOWER становитимуть сім супутників MEO з 30000 повністю сформованими і керованими променями (більше 4000 променів на супутник), які можуть бути зміщені і переключені в реальному часі. Повна місткість мережі становитиме кілька терабіт. Запуск запланований на 2021, більше технічних подробиць про O3b mPOWER ще не оприлюднене. Як сказано вище, мережі супутникового зв'язку мають можливість надавати різні типи послуг для самих різних випадків. Супутникові мережі могли б навіть розширити зону зв'язку та використання за умови належної якості проектування і використання.

## 1.8 Супутникові LEO-угруповання

Супутники LEO працюють на значно нижчих висотах в порівнянні з супутниками MEO і GEO. Ця особливість привносить унікальні переваги угрупованням LEO:

- Низька затримка. Час двосторонньої передачі з найвищою орбіти LEO становить всього 13.3 мс;

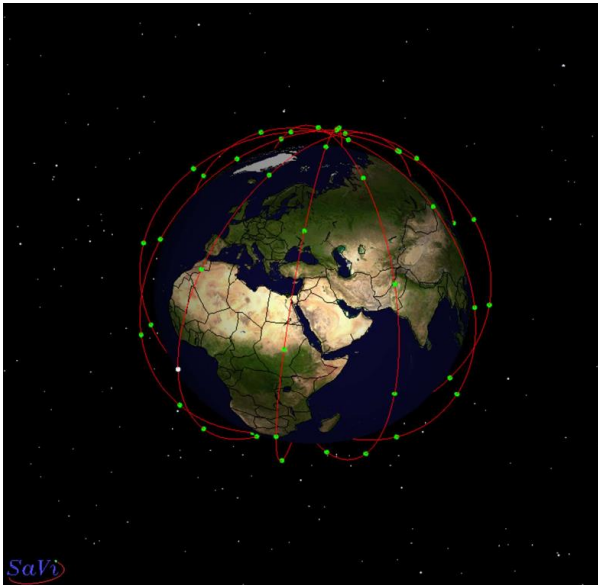
- Висока пропускна здатність. Оскільки для глобального покриття потрібно набагато більше супутників, загальна ємність мережі LEO-угруповання часто набагато вище ніж у MEO- і GEO-угруповань, тому кожному користувачеві може бути виділено більше ресурсів мережі.

- Менша втрата сигналу. Довжина шляху сигналу набагато коротше в порівнянні з MEO і GEO.

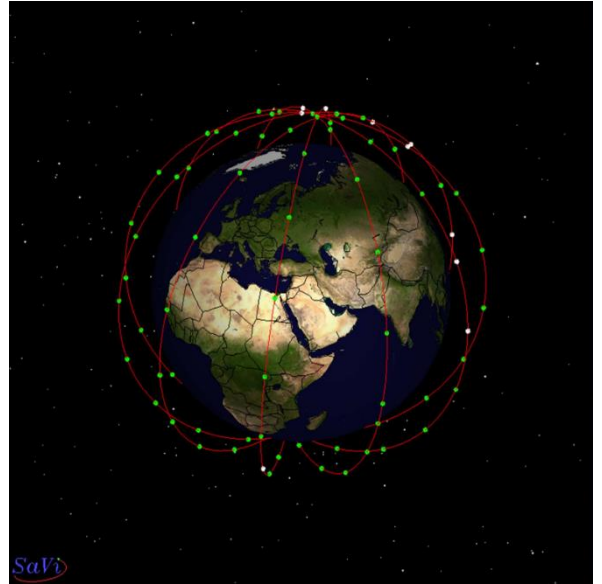
Головний недолік LEO-угруповань це висока мобільність супутників, через що відбуваються часті «хендовери» між супутниками при зв'язку з наземними

терміналами. Для нерухомого наземного користувача час зв'язку із супутником становить менш ніж 20 хвилин. Це повинно бути враховано при розробці протоколів маршрутизації.

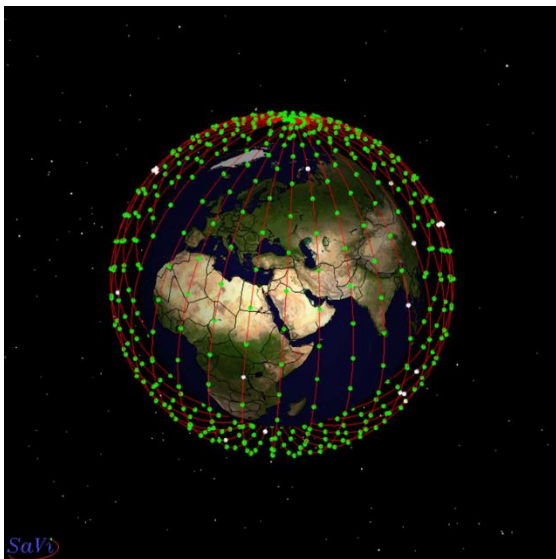
П'ять LEO-угруповань, а саме Iridium, LeoSat, OneWeb, Starlink і Hongyun Project, будуть розглянуті в цьому розділі (рис.1.7).



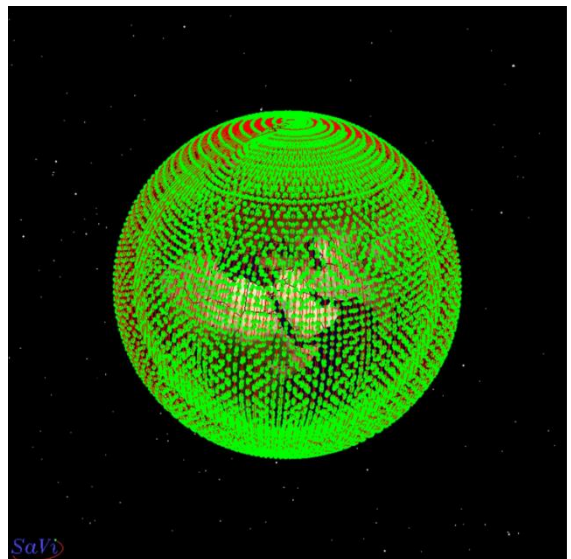
а) Супутникове угруповання Iridium (66 супутників)



б) Супутникове угруповання LeoSat (108 супутників)



в) Супутникове угруповання OneWeb (648 супутників)



г) Супутникове угруповання Starlink (11943 супутників в проєкті)

Рис. 1.7. Супутникові LEO угруповання

**Iridium.** Система Iridium офіційно стала доступна в кінці 1998 року. Вона складається з 66 активних супутників, що працюють на висоті 781 км, в той час як деякі знаходяться на орбіті запасні супутники (на випадок відмови системи) знаходяться на висоті 666 км. Кожен супутник обертається навколо Землі приблизно кожні 100 хвилин. Іншими словами, середній час перебування наземного терміналу в промені супутника становить приблизно 9 хвилин. Угруповання Iridium показана на рис. 1.7 а.

Iridium може надавати глобальне покриття для голосової служби, служби SMS, служби передачі даних і навіть для широкосмугової служби. Завдяки унікальним характеристикам LEO-угруповань, Iridium це єдина доступна на даний момент мережа супутникового зв'язку яка надає даний глобальне (від полюса до полюса) покриття. Перевага в покритті значно збільшує корисність системи. Супутники підтримують зв'язок один з одним за допомогою міжсупутникового зв'язку в Ka-діапазоні, що працює зі швидкістю 10 Мбіт/с.

З 2015-року, компанія-оператор Iridium, Iridium Communications Inc., будує «Iridium NEXT» для підтримки широкосмугового доступу. Нова угруповання також буде містити 66 активних супутників LEO, і кілька запасних супутників, для надання швидкості передачі даних 1.5 Мбіт/с в L-діапазоні і 8 Мбіт/с в Ka-діапазоні.

Згідно з офіційним опису, Iridium NEXT прискорить процес глобальної еволюції зв'язку надаючи послуги межмашинного взаємодії (Machine-to-Machine - M2M), більш потужну і надійну наземну мобільний зв'язок, а також більш швидкі й доступні широкосмугові послуги доступу.

**LeoSat.** LeoSat це супутникова угруповання LEO, що надає послуги в підприємницькому, фінансовому, державному, енергетичному і морському секторах. Вся угруповання складається з 108 супутників на орбіті 1400 км. Пропонована угруповання показана на рис. 2.2б. Можливості підключення супутника виглядає наступним чином: 10 керованих користувачем антен Ka-діапазону (надають швидкість підключення до Інтернет для кожного користувача

від 50 Мбіт/с до 1.6 Гбіт/с), 2 керовані шлюзові антени (надають сумарну швидкість підключення до 10 Гбіт/с або 5.2 Гбіт/с на користувача) і 4 оптичних міжсупутникових каналів зв'язку (ISL). Угрупування створена забезпечити затримку земля-космос меншу ніж 20 мс. Можливо, LeoSat може надати кращу продуктивність мережі, ніж наземні мережі. Наприклад, затримка сигналу з Лондона в Сінгапур через оптичне волокно становить понад 180 мс, в той час як по LeoSat затримка складе менше 120 мс.

Ранні супутники будуть запуснені в 2019. Угрупування почне надавати сервіс по всьому світу з 2022.

**OneWeb.** Будучи спочатку запропонованої в кінці 2014, OneWeb (відома як WorldVu або L5) це LEO-угрупування, що складається з 648 супутників на висоті 1200 км в 18 площинах. Підтримувана такими міжнародними підприємствами як Qualcomm, Virgin Group і Airbus, OneWeb це одна з найбільш відомих мереж супутникового зв'язку LEO наступного покоління. Пропонована угрупування показана на рис.2.1в.

Зв'язок земля-космос буде використовувати Ku- і Ka- діапазони, надаючи кожному наземному користувачеві спадну швидкість підключення до Інтернет 50 Мбіт/с і висхідну швидкість 25 Мбіт/с. Кожен супутник буде надавати сумарну ємність до 7.5 Гбіт/с. Зона обслуговування кожного супутника становитиме 1080x1080 км. Очікується, що затримка сигналу становитиме 50 мс, в той час як затримка в поточних супутникових Інтернет-провайдерів (ISP) становить не менше 600 мс. Для реалізації таку угрупування, супутники OneWeb мають модульну конструкцію і виробляються по конвеєру - до 15 супутників може бути вироблено в тиждень. Така практика значно здешевлює витрати на виробництво.

Повна угрупування почне роботу в 2019-2020. Велика частина ємності початкових 648 супутників вже продана, тому OneWeb думає над тим, щоб додати до поточної структури додаткові тисячі дев'яцот сімдесят дві супутника. Втім, все ще невідомо, як нова угрупування буде виглядати.

**Starlink.** Starlink це LEO-угрупування, запропонована SpaceX, і це угрупування з найбільшою кількістю супутників з усіх на даний момент

запропонований LEO-угруповань наступного покоління. Супутникове угруповання Starlink містить 4425 супутників на висоті 1200 км в 83 площинах і 7518 супутників на висоті 340 км (також відомої як Дуже низька навколосемну орбіту, з англ. Very Low Earth Orbit - VLEO). Загальна кількість супутників в цій пропозиції вельми амбітно - 11943. Віртуальне уявлення запропонованої угруповання Starlink показано на рис. 2.2г. З такою кількістю супутників на орбіті LEO, Starlink в змозі надати найбільш конкурентоспроможну продуктивність мережі. «Гігабітна» швидкість буде надаватися користувачам з затримкою в 25 мс. Робоча угруповання буде запущена в 2019, однак повна збірка відбудеться не раніше 2024. Starlink все ще на стадії ранніх досліджень, більше технічних подробиць опубліковано ще не було.

**Hongyun Project.** Hongyun Project, раніше відома як «Star of Happiness», це китайський еквівалент LEO-мегагруппіровкі, запропонованої China Aerospace Science and Industry Corporation. Вона буде складатися з 156 супутників на висоті 1000 км. Hongyun Project все ще на стадії ранніх досліджень, більше технічних подробиць опубліковано ще не було.

Кожен супутник матиме ємність 6 Гбіт/с, в той час як кожному користувачеві буде запропоновано 40 Мбіт/с. Зв'язок земля-космос буде використовувати Ка-діапазон. Повна угруповання імовірно почне роботу в 2024 р.

## 2 ПРОЕКТ STARLINK

### 2.1 Архітектура мережі Starlink

Космічний сегмент – це супутники на низькій орбіті (наприклад, перші 1600 супутників були розгорнуті на орбіті висотою 550 км з нахилом 53 градуси);

Наземний сегмент (рис.2.1):

- 1) система керування мережею (network management system);
- 2) шлюзові станції (gateways);
- 3) абонентський термінал (user terminal).

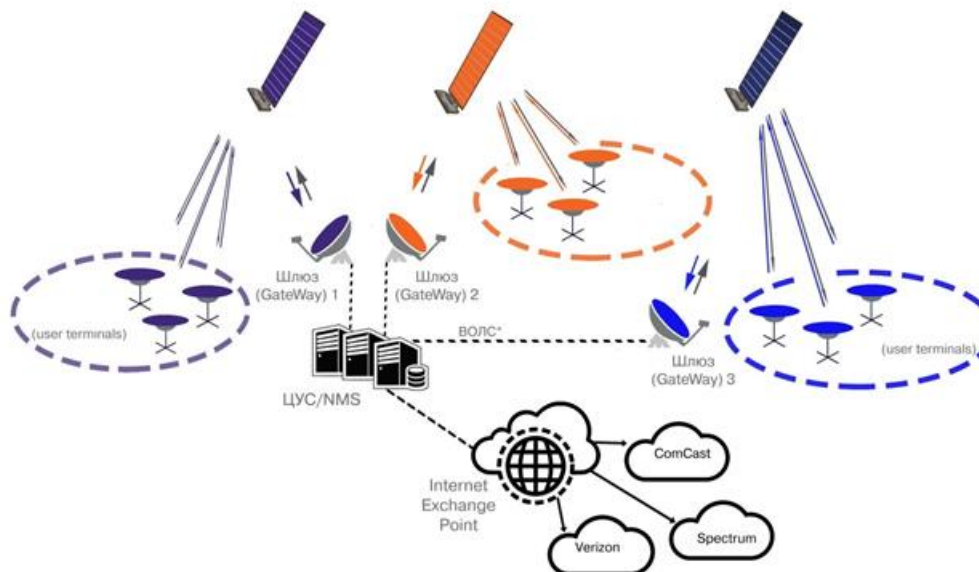


Рис.2.1. Схема супутниково зв'язку Starlink

Наземна мережа побудована на базі мережі Google. На компанію SpaceX зареєстровано дві автономні мережі – AS14593 та AS27277 (остання використовується для внутрішньої IT-мережі SpaceX). Трафік абонентів маршрутизується по орендованих ВОЛЗ (переважно власної мережі Google, де це можливо) на найближчі вузли/точки обміну трафіком у США: LAX (Лос

Анжелес), SEA (Сієтл), ORD (Орландо), LGA (Нью-Йорк), SJC (Сан-Хосе), DFW (Даллас), IAD (Вашингтон).

Космічні апарати Starlink спеціально сконструйовані для групового запуску двома стопками по 30 супутників під обтікачем ракети Falcon 9 та мають розміри: довжина – 3,2 м, ширина – 1,6 м, висота – 0,2 м. На супутниках розташовані параболічні антени для зв'язку з наземними шлюзовими станціями у Ka-діапазоні.

Після виведення групи супутників на опорну орбіту (зазвичай це 280 км) супутники розкривають сонячні батареї, встановлюють контакт із наземним центром керування і проводять перевірку на роботоспроможність та відсутність пошкоджень при відокремленні від ракети, після чого активують електроракетні двигуни (ЕРД) на криптоні і починають рух на робочую орбіту, що займає 2–3 місяці.

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

Розміри кожного сегмента  $3 \times 0,8$  м. Таким чином, загальна площа сонячної батареї складає  $12 \times 3 \times 0,8 = 28,8$  м<sup>2</sup>. Через втрати між сонячними елементами і по краях (коефіцієнт заповнення дорівнює 0,9) можна округлити це значення до 26 м<sup>2</sup>. Прийmemo щільність потоку сонячного випромінювання як 1300 Вт/м<sup>2</sup>, 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). Реальна потужність залежить від положення панелей сонячних батарей відносно Сонця: оптимальне падіння променів на панель – під прямим кутом.

Для переміщення спутника з опорної орбіти 280 км на робочу 550 км і утримання його на ній використовуються плазмові двигуни або ЕРД. Якщо відштовхуватися от ЕРД для малих супутників на зразок російських СПД-100 або зарубіжних ВНТ-1500, то їхня потужність споживання равна приблизно 1,5 кВт, а тяга – 100 мН, при питомому імпульсі на рівні 1700–1800 секунд.

ЕРД мають запас криптону орієнтовно 5–10 кг, що заправлений у шаровидні балони високого тиску. Даний запас дозволить підняти супутник на кругову

орбіту 550 км, утримати спутник на ній протягом п'яти років, а потім змінити орбіту з кругової на еліптичну, змінивши перигей з 550 км до, наприклад, 250 км, де за рахунок тертя об залишки атмосфери спутник достатньо швидко загальмується і згорить. Основним корисним навантаженням спутника Starlink є 2 антенні комплекси для зв'язку зі шлюзовими станціями з абонентськими терміналами.

Антенний комплекс для зв'язку зі станціями (або фідерна лінія) являє собою параболічні антени, що наводяться в процесі польоту на точку Землі, де знаходиться станція. Фідерна лінія працює в Ka-діапазоні (18/30 МГц).

Таблиця 2.1

## Діапазони частот, в яких працює проект Starlink

| Тип каналу зв'язку і напрямку прийому-передачі                                       | Діапазони частот, ГГц          |
|--|--------------------------------|
| Передача даних у від шлюзової напрямку вниз (до абонентського терміналу)             | 10,7 – 12,7                    |
| Передача даних від супутника у напрямку вниз (до шлюзової станції)                   | 17,8 – 18,6<br>18,8 – 19,3     |
| Передача даних від абонентського терміналу у напрямку вгору (до шлюзової станції)    | 14,0 – 14,5                    |
| Передача даних від шлюзової станції у напрямку вгору (до супутника)                  | 27,5 – 29,1<br>29,5 – 30,0     |
| Телеметрія і сигнали керування у напрямку вниз (від супутника до станції керування)  | 12,15 – 12,25<br>18,55 – 18,60 |
| Телеметрія і сигнали керування у напрямку вгору (від станції керування до супутника) | 13,85 – 14,00                  |

Як виходить із таблиці, у розпорядженні супутника є 2100 МГц у напрямку від шлюзової станції до супутника та 1300 МГц в оберненому напрямку. При використанні обох варіантів поляризації (лівої і правої у випадку кругової) це



дозволяє використовувати для передачі трафіка 4200 МГц від шлюзової станції до супутника та 2600 МГц в оберненому напрямку.

Також на борту знаходяться 4 плоскі квадратні антени с фазованою ґраткою – три на передачу інформації від супутника до абонентського терміналу і 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 – тільки 500 МГц. З урахуванням двох поляризацій для передачі трафіка супутник володіє 4000 МГц на передачу 1000 МГц на прийом.

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

Супутник Starlink є ретранслятором та не виконує обробки даних: на його борту здійснюється лише зміна частоти прийманого сигналу та його підсилення. Також супутники першого покоління не мають міжсупутникового зв'язку (ISL – intersatellite link) та можуть отримувати і передавати інформацію тільки на Землю. В якості станції TT&C (керування, контролю та телеметрії) використовується телепорт Брюстнер, розташований у штаті Вашингтон. Не дивлячись на те, що в мережі лише одна станція TT&C, в зоні видимості якої супутник Starlink знаходиться не більше п'яти хвилин, об'єм даних, що збираються з угруповання, складає в середньому 5 ТБ на добу, тобто не менше 10 ГБ з одного супутника за добу.

На борту кожного супутника знаходиться близько 70 окремих процесорів під управлінням Linux і близько 10 мікроконтролерів. Знаходячись на орбіті у 550 км, супутник може покрити своїм сигналом пляму на Землі діаметром приблизно 1900 км за умови, що кут місця для абонентського терміналу не буде менше 25°. Слід зазначити, що ефективна робота антен з плоскою фазованою ґраткою можлива за кута місця 40° і більше (Таблиця 2.2).

Таблиця 2.2

Радіус зони видимості супутника під кутом 25 градусів в залежності від його висоти.

|                         |       |       |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| Орбіта, км              | 540   | 560   | 570   |
| Макс. кут відхилення, ° | 56,7  | 56,4  | 56,3  |
| Зона покриття, км       | 926,8 | 954,6 | 968,4 |

Швидкість, з якою супутник рухається відносно абонентського терміналу, складає приблизно 410 км/хв. Таким чином, в зоні видимості одного абонентського терміналу та/або шлюзової станції супутник буде не більше п'яти хвилин (для шлюзової станції може бути довше, оскільки для його параболічних антен можлива робота за менших кутів месця – до 10° и навіть 5°, якщо не буде перешкод). Відповідно, наземні термінали з параболічними антенами (наприклад, на шлюзових станціях) повинні мати достатньо швидкісний привід, що забезпечує кутову швидкість не менше 25° за хвилину.

Необхідно зазначити, що за даними SpaceX один супутник має забезпечити пропускну спроможність не менше 17 Гбіт/с. Враховуючи, що у напрямку передачі даних до абонента супутник володіє тільки 4000 МГц, і малі розміри антен абонентських терміналів, в системі буде застосовуватися повторне використання (reuse) частот, як це зроблено в діючих супутниках типу HTS (High Throughput Satellite) – наприклад, ViaSat-2, KA-SAT, Jupiter. В цьому випадку всередині зони видимості з супутника формуються міні-зони покриття, кожна зі своєю частотою і поляризацією. Зазвичай використовується 4 типи таких зон.

Для мережі Starlink це може виглядати так:

- 1) частоти з 10700 до 11700, поляризація ліва;
- 2) частоти з 11700 до 12700, поляризація ліва;
- 3) частоти з 10700 до 11700, поляризація права;
- 4) частоти з 11700 до 12700, поляризація права.

У цьому випадку для передачі трафіку вже наявні не 4000 МГц, а 14000 МГц, але для абонентського терміналу це означає, що зміна його робочої частоти має відбуватися не 1 раз за 5 хвилин, а мінімум у 4 рази частіше. Для супутника задача дещо простіша. Фазована ґратка його антени формує подібні «плями» на Землі, при цьому підвищується потужність сигналу, оскільки кожна ділянка формується своїм променем, і щільність потужності сигналу (ЕІІМ) в ньому вища, ніж якби вона була розподілена по всій ділянці діаметром 1900 км. У первинній заявці SpaceX від 2016 року вказано, що діаметр такого «шестигранного променя» складає 45 км.

У 2020 році в документах, поданих у FCC, вказано наступні значення в Таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

#### Частотні смуги висхідних та низхідних каналів Starlink

| Link Type                           | Frequency     | Modulation   | Emission Designator | Maximum EIRP | Half Power Beamwidth                |
|-------------------------------------|---------------|--------------|---------------------|--------------|-------------------------------------|
| Broadband Downlink (space-to-Earth) | 10.7-12.7 GHz | Up to 64 QAM | 240MD7W             | N/A          | 3.5° (boresight)<br>5.5° (at slant) |
| Broadband Uplink (Earth-to-space)   | 14.0-14.5 GHz | Up to 64 QAM | 60M0D7W             | 38.2 dBW     | 2.8° (boresight)<br>4.5° (at slant) |

При цьому кут діаграми направленості променя супутника (з космосу на Землю) змінюється від 3,5 до 5,5 градусів, що добре корелює з параметрами плоскої антени таких розмірів.

Діаграма направленості антени – доволі важливий параметр, і характеризуючим критерієм тут є кут, на якому потужність сигналу в 2 рази (а в децибелах це відповідає 3 дБ) вища.

Чим менший кут діаграми направленості, тим антена ефективніша, більше енергії випромінюється на робочій частоті і менше йду в «бокові» пелюстки, які по суті є перешкодою для сусідніх частот/сигналів.

Розрахунки діаметру зони покриття показують, що діаметр променя, що

відповідає куту ДН  $3,5^\circ$ , безпосередньо під супутником складе 34 км. По мірі відхилення променя в сторону від лінії надиру, кут діаграми напрямленості збільшується: згідно даних SpaceX у таблиці вище, для краю зони складе  $5,5^\circ$ , при цьому діаметр зони покриття одного променя на Землі збільшується і досягає приблизно 210 км на периферії зони видимості ІСЗ з кутом нахилу в  $25^\circ$ .

Один супутник таким чином може теоретично мати до 300 таких променів (beams) в зоні свого обслуговування.

Відмітимо, що для фідерного променя в Ка-діапазоні, який забезпечує «підйом» інтернет-трафіку на борт супутника, на ньому використовується параболічна антена. Для того щоб забезпечити максимальну пропускну спроможність при фіксованій доступній полосі частот у Ка-діапазоні, необхідно забезпечити максимальне співвідношення «сигнал/шум» за рахунок збільшення потужності сигналу з борту супутника, і для цього потрібно максимально звужити зону покриття на Землі – в сучасних системах, що працюють з HTS-супутниками, її діаметр складає близько 100 км. Додатковою перевагою вузької плями в Ка-діапазоні є те, що сигнал з супутника не створює перешкоди іншим системам на Землі, що працюють у Ка-діапазоні.

Також тут виникає питання про те, що коли орбіти двох супутників пересікаються, має відбуватися відхилення «конфліктуючих» плям з ідентичними частотами і поляризацією, при цьому інформація про працюючу в даний момент пляму має доводитися і до терміналу, щоб він встиг перемкнутися в цей момент інший супутник.

Загальну координацію і керування всією мережею з супутників, шлюзових станцій і абонентських терміналів веде центр керування мережею – частина системи Starlink, що не афішується.

Строк життя супутника Starlink на орбіті 550 км складає приблизно 5 років, після чого запас робочого тіла криптону закінчується і спутник або по команді здійснює зниження орбіти до густих шарів атмосфери, або, у випадку втрати зв'язку з Землею, поступово знижується, гальмується залишками атмосфери, і згоряє.

Супутники Starlink першими в світі виробляються практично в режимі крупносерійного виробництва. За даними SpaceX, її виробничі потужності дозволяють виробляти до 120 супутників Starlink на місяць. Відмітимо, що середній строк виробництва супутника зв'язку для геостаціонарної орбіти складає наразі 2–3 роки.

Безумовно такий темп виробництва сильно скорочує цикл випробувань та перевірок, а також відмітимо, що для економії коштів у супутнику використовуються дешевші комплектуючі та компоненти, зокрема дорогий ксенон замінено на значно дешевший криптон в якості робочого тіла ЕРД.

Таким чином, зниження вимог до комплектуючих і циклу наземних випробувань відбивається і на ресурсі, і на надійності супутників, конструкція яких допрацьовується за результатами випробувань у космосі.

## **2.2 Власні можливості Starlink**

Власні можливості та досвід із запуску супутників можуть дати конкурентну перевагу для Starlink, а в майбутньому і для Project Kuiper.

Оскільки Starlink отримує вигоду з власної пускової потужності SpaceX, його вартість запуску дорівнює граничній вартості запуску (без урахування рентабельності) Space X, що в даний час дає їм значну перевагу у вартості та потужності порівняно з іншими конкурентами. На веб-сайті Space X вказано стандартний план оплати для запуску Falcon 9 у 62 мільйони доларів. Цей рівень цін залишається стабільним з 2016 року, до нинішніх розробок багаторазових ракет Stage 1. За такою ціною він уже виграв контракти над іншими ракетами-носіями.

З розробкою багаторазових ракет, починаючи з першого компонента Falcon 9 стандартна ціна на запуск Falcon 9, схоже, впала до 50 мільйонів доларів. За оцінками, ця сума може впасти ще до 36 мільйонів доларів за повторного використання при всіх витратах на запуск, і навіть головний виконавчий директор SpaceX Ілон Маск припустив, що при подальшій оптимізації операцій запуску та

повній можливості повторного використання граничні витрати можуть знизитися до 5-6 мільйонів доларів на запуск Falcon 9. Це говорить про те, що навіть при рівні цін 36 мільйонів доларів стартова ціна за корисне навантаження вже є однією з найдешевших на планеті. Корисне навантаження Falcon Heavy приблизно в 3 рази більше при 1,5 ціни, і в даний час компанія розробляє ще більшу ракетну систему, міжпланетну транспортну систему (Interplanetary Transport System), перейменовану в StarShip, яка призначена для значного збільшення корисного навантаження космічного простору до 150 000 кг, або до 400 супутників Starlink за запуск.

Власне виробництво супутників також може стати перевагою у плані витрат та управління для Starlink у порівнянні з іншими угрупованнями на низькій навколоземній орбіті, які виробляють супутники на стороні.

SpaceX сама виробляє супутники Starlink, тоді як інші постачальники LEO покладаються на джерела супутників від зовнішніх сторін, особливо Boeing і Airbus (рис.2.2, рис.2.3). OneWeb, наприклад, співпрацює з Airbus над своїми супутниками, а Telesat, працює з Airbus, Thales Alenia Space та Maxar. Amazon оголосила, що будуватиме власні супутники на своїх об'єктах у штаті Вашингтон у США.

Вертикальна інтеграція у виробництві та запуску як Amazon, так і Starlink дасть їм переваги при розгортанні та в плані економічної ефективності. Хоча вартість виробництва супутників є приватною інформацією, згідно з даними SpaceX, капітальні витрати на кожен супутник не перевищують 500 000 доларів. Варто зазначити, що кожен супутник Starlink може передавати приблизно 20 Гбіт/с на супутник, у той час як HTS GEO має капітальні витрати в діапазоні від 200 мільйонів доларів на 10 Гбіт/с на нижньому рівні до 700 мільйонів доларів на 1000 Гбіт/с в верхній межі, включаючи витрати на запуск. Це значно здешевлює LEO у розрахунку на Гбіт/с, але для кожної географічної зони обслуговування потрібно більше LEO-супутників на орбіті порівняно з одним GEO. Слід зазначити, що супутники LEO спроектовані для коротшого терміну служби (показує тривалість життя LEO в діапазоні від 5 до 12 років) порівняно з

супутниками GEO з мінімальним терміном служби 15 років.

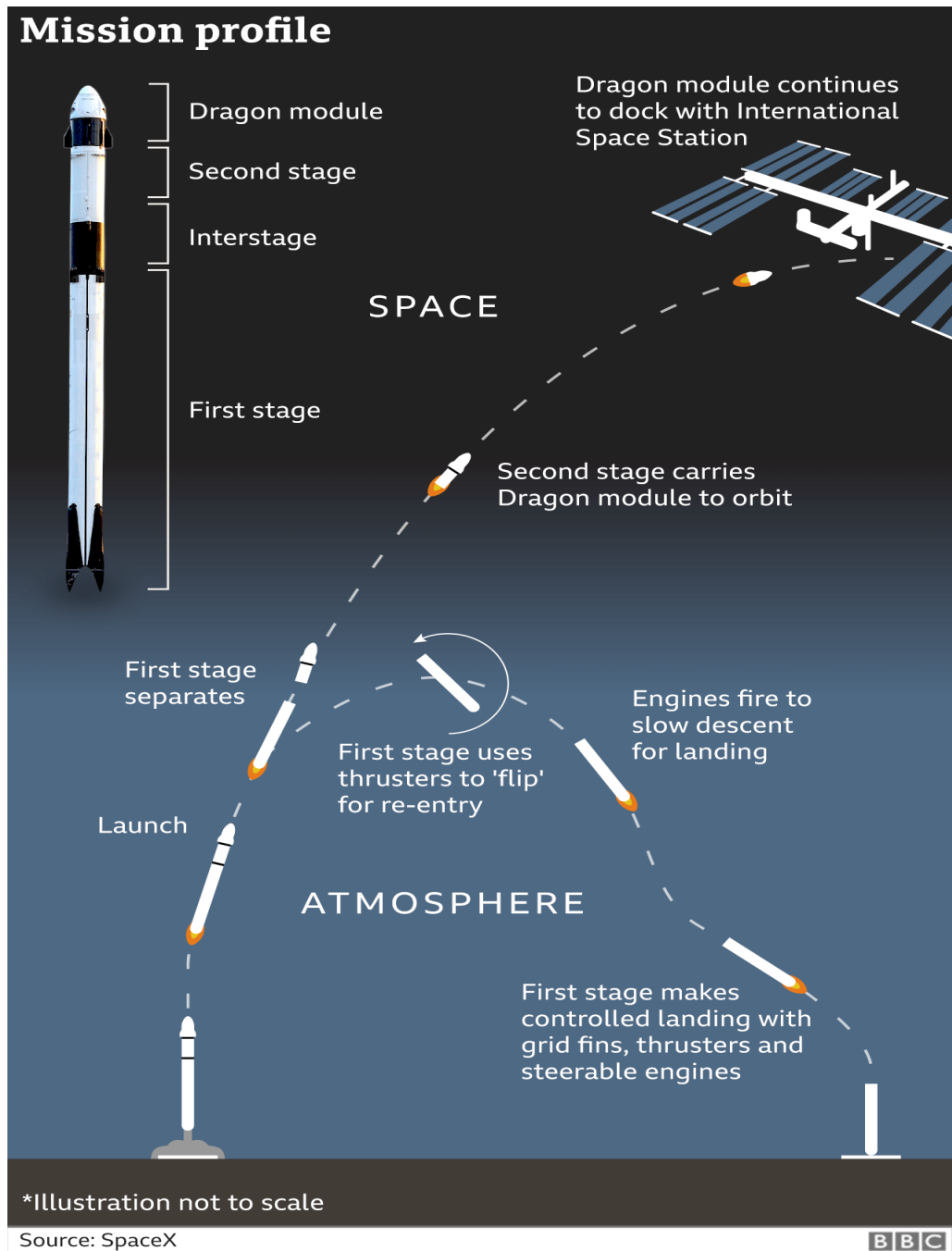


Рис.2.2. Особливості SpaceX

### 2.3 Відмінності в цільових ринках: споживчі, корпоративні, державні та телекомунікаційні (backhaul)

До запуску комерційних послуг складно визначити розбіжності у цільових ринках та клієнтській базі. Проте компанія Telesat, наприклад, публічно заявила, що приділяє особливу увагу державним клієнтам та великим підприємствам, які потребують глобального зв'язку.

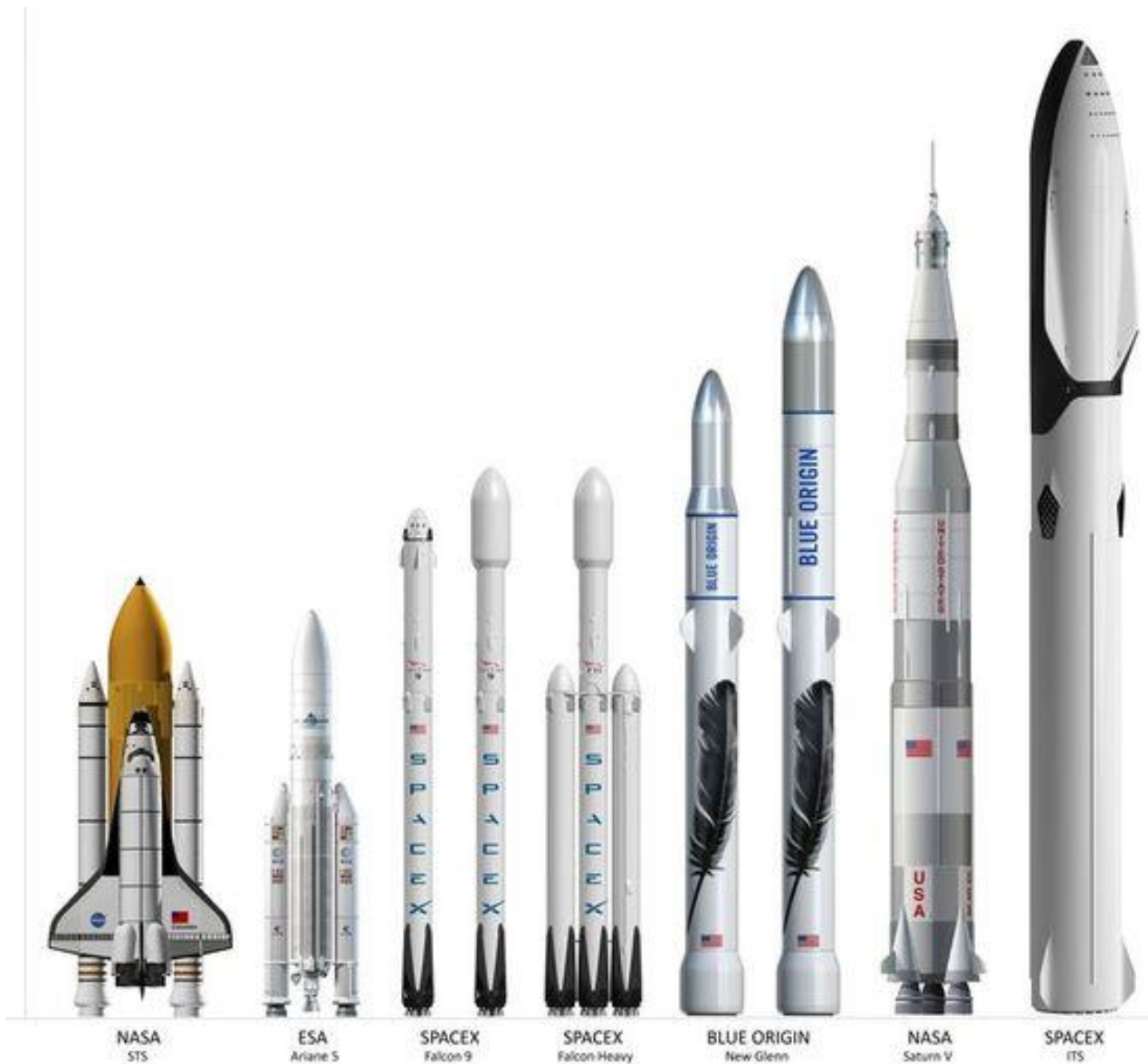


Рис.2.3. SpaceX StarShip у порівнянні з візуалізацією корисних навантажень Falcon 9 та Dragon



До реструктуризації OneWeb фокусувалася на з'єднанні «останньої милі» і непідключених спільнот на ринках, що розвиваються, а також на транзитній мережі мобільного стільникового зв'язку. Starlink зосередила увагу на необслуговуваних споживачах з рівнем доходу, які можуть дозволити собі послуги, а також відзначила потенційну стратегію з розгортання моделей забезпечення надійності загальнодоступного безпроводового зв'язку (Wi-Fi). Слід зазначити, що Starlink у партнерстві з Microsoft підключила свою мережу безпосередньо до хмари Azure та інфраструктури центру обробки даних останньої, що передбачає зосередження уваги на корпоративних та державних клієнтах. Аналогічно, Amazon Project Kuiper, безсумнівно, буде використовувати хмару Amazon Web Services як частину своєї пропозиції послуг.

## **2.4 Центр керування мережею, шлюзові станції, абонентський термінал**

### **2.4.1 Центр керування мережею**

Центр керування мережею (ЦКМ) забезпечує керування всією мережею супутникового зв'язку, координацію роботи шлюзових і абонентських станцій, завдання єдиного часу в мережі, виділення частотних комірок на супутниках для роботи (передачі даних) шлюзових і абонентських станцій, ведення білінгу, збір даних про передану та отриману інформацію, збір даних про стан системи.

Враховуючи критичну важливість ЦКМ, в мережі, як правило, передбачається основний ЦКМ і резервний ЦКМ, що працює в стані гарячого резерву.

По суті ЦКМ – це набір серверів, з'єднаних оптоволоконними лініями зв'язку зі шлюзовими станціями. Зв'язок ЦКМ і шлюзових станцій по оптичним каналам дуже важливий, оскільки забезпечує передачу пакетів інформації ЦУС на шлюзову станцію з постійною затримкою, що дозволяє ефективно керувати процесом передачі інформації на спутник і, найголовніше, процесом перемикання супутника з однієї шлюзової станції на іншу, а терміналу – між супутниками. Використання будь-яких систем зв'язку, наприклад сотової чи бездротової, якщо

в них є протоколи, що допускають плаваючу затримку, тут неприпустимо.

Згідно заяві виробника, в мережі використовується власний пропрієтарний протокол, простіший, ніж IPv6, і має невеликий розмір заголовків. Також в мережі використовується скрізне шифрування трафіку.

Больше про ЦКМ мережі Starlink наразі практично нічого невідомо.

#### **2.4.2 Шлюзові станції**

Шлюзові станції забезпечують передачу інформації з мережі інтернет через супутник на абонентські термінали. Таким чином, за відсутності міжсупутникового зв'язку, для функціонування абонентського термінала необхідно, щоб в зоні покриття сигналу спутника, через який працює в даний момент абонентський термінал, знаходилася як мінімум одна шлюзова станція.

Одна шлюзова станція може працювати з сотнями й тисячами абонентських терміналів. Типовий гейтвей мережі Starlink має 8 антен, кожна з яких може передавати інформацію на «свій» супутник.

Тому під шлюзовою станцією в рамках мережі Starlink треба розуміти сукупність окремих антенних постів, що розташовані в одному місці і працюють у Ка-діапазоні. Зазвичай у шлюзовій станції знаходяться і абонентські термінали, що служать для контрольних цілей: вони перевіряють, на яких модуляціях в даних погодних умовах працює мережа в даному районі.

Шлюзова станція повинна мати гарантоване енергозабезпечення і підключення до магістральних каналів мережі інтернет (backbone). При цьому точкою входу абонента в мережу інтернет будуть не найближчий до гейтвея вузол будь-якого місцевого провайдера, а тільки власні сервери SpaceX, на яких буде стояти система білінгу, керування трафіком клієнта і обладнання COP3 (система оперативно-розшукових заходів; американська назва аналогічного закону про обов'язки оператора зв'язку надавати поліції і спецслужбам можливість переглядати трафік – Communications Assistance for Law Enforcement Act, скорочено – CALEA).

Оскільки вимоги до серверів для вказаних вище сервісів досить високі, у

Starlink є декілька точок входу в інтернет на території США на найвідоміших точках обміну трафіком (IX) між інтернет-провайдерами. До речі, це додає до 20 мс до загальної затримки в мережі.

У даний момент Starlink використовує на шлюзових станціях параболічні антени діаметром 1,5 м в радах (радіопрозорі куполи) власного виробництва і з передавачем потужністю 50 Вт. Особливістю параболічних антен є те, що вони, на відміну від антен із фазованою ґраткою, можуть працювати за малих кутів місця (в заявці SpaceX вказано, що до  $5^\circ$ ). У сукупності с тим, що антени на супутнику для зв'язку зі шлюзовою станцією теж параболічні і мають можливість відхилятися в потрібному напрямку, що дозволяє суттєво розширити робочу зону передачі інформації від шлюзової станції на супутник.

Однією з проблем, з якою стикається SpaceX при розгортанні мережі шлюзових станцій в США – те, що в США частина Ka-діапазону закріплена за сервісом UMFUS. Остання аббревіатура – це загальне поняття, яким FCC позначає інноваційні послуги фіксованого або рухомого зв'язку, а також інтернету речей (IoT), що використовують смугу частот 27,5–28,35 ГГц у Ka-діапазоні. Послуги (чи мережі), які можуть надавати ліцензіати UMFUS, відносяться тільки до технологій фіксованого та наземного стільникового зв'язку, а також фіксованої супутникової служби, тобто рухомий супутниковий зв'язок (така, як Starlink) до них не відносяться. Тому SpaceX має шукати в США райони с дуже низькою густиною населення – не більше 450 людей в зоні, де щільність випромінювання (PFD) від антен супутникового зв'язку шлюзової станції Starlink складає деяку фіксовану межу  $X$  ( $-77,6$  дБм/м<sup>2</sup>/МГц) – там, за думкою FCC, система Starlink не зможе завадити сервісам UMFUS.

Враховуючи, що для шлюзових станцій бажаний відкритий вид на небо і можливість роботи по всім 360 градусам і з мінімальними кутами місця, ця умова суттєво ускладнює процес пошука підходящого места для ґейтвея.

Шлюзові станції мають у своєму складі модулятори та демодулятори, які забезпечують перетворення модульованого радіосигналу в цифровий потік даних і видачу його в наземну мережу.

Як вказувалось вище, єдиний час і фіксована затримка в проходженні пакета між ЦКМ і шлюзовою станцією грає абсолютно критичну роль у системі Starlink, тому розміщення шлюзових станцій на об'єктах, що рухаються навіть із мінімальною швидкістю (наприклад, плавучих платформах в океані) може бути задачею, що важко вирішується.

На даний момент інформації про розміщення шлюзових станцій Starlink поза континентальною територією США немає.

### **2.4.3 Абонентський термінал**

Абонентський термінал – це індивідуальна станція, що встановлюється на стаціонарному об'єкті (будинку) і розрахована на обслуговування одного абонента (облікового запису). Тобто користуватися інтернетом, який роздається по Wi-Fi, можуть усі проживаючі в будинку, але це буде один рахунок у білінгу. Технічні параметри терміналу практично невідомі.

Абонентський термінал складається з двох частин. Антена діаметром 47 см з фазованою ґраткою, яка встановлюється поза будинком так, щоб мати максимально відкритий вид на небо по всіх 360°.

Антена з'єднується з блоком живлення по кабелю з роз'ємом Ethernet, який одночасно слугує і кабелем живлення (технологія PoE – power over Ethernet). В будинку розміщується роутер Wi-Fi та блок живлення.

Найскладніше під час монтажу – не пошкодити наявну на даху гідроізоляцію і забезпечити її в місці, де кабель потрапляє в будинок.

Внутрішня конструкція антени є корпоративним секретом SpaceX. Найнесподіванішим у конструкції антени є наявність електроприводу. Антена обертається в горизонтальній площині на 360° і відхилятися на 50–60° градусів в вертикальній площині. Дане рішення (введення електроприводу в конструкцію) є доволі суперечливим, оскільки будь-який вузол, що обертається – це причина можливих відмов, особливо з урахуванням найрізноманітніших кліматичних умов, коли антена може покриватися крижаною кригою, в щілини може потрапляти пил, пісок и т. п.

Введення електроприводу в конструкцію зроблене для того, щоб піти від необхідності роботи при малих кутах місця – нахил антени в сторону «робочого» в даний момент супутника збільшує ефективну площу антени і, відповідно, швидкість передачі і прийому інформації.

Ефективна площа антени дорівнює синусу кута місця помножити на геометрична площа.

Тобто при куті місця  $25^\circ$  ефективна площа антени складає всього 42 % від її геометричної площі. Створення терміналу з фазованою ґраткою не є складною технічною проблемою, однак головний виклик несе, скоріше, технологія.

## 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 3.1 Визначення похилої дальності зв'язку

Супутниковий сигнал проходить кілька етапів загасання, як описано в 3GPP. Втрати на трасі дійсно збільшуються зі збільшенням несучої частоти і відстані поширення між наземним і супутниковим вузлами і залежать від загасання в тіні і втрат від перешкод, які моделюють ослаблення сигналу, викликане навколишніми об'єктами. Більш того, в разі відсутності прямої видимості (NLOS) зв'язок з внутрішнім наземним терміналом, додаткові втрати на вході в будівлю, величина яких залежить від типу та місця розташування будівлі, також повинні бути прийняті до уваги.

Найбільш важливо, що супутниковий зв'язок на міліметрових хвилях погіршується через сильний атмосферного поглинання, тобто ослаблення через сухого повітря (кисень, азот під тиском і нерезонансного дебаєвського загасання) і водяної пари. При нормальних атмосферних умовах атмосферні втрати можуть досягати 15 дБ/км в смузі поглинання кисню близько 60 ГГц. Крім того, на поширення сигналу від Землі до супутника впливає мерехтіння, яке відповідає швидким коливанням амплітуди і фази сигналу. При передачі міліметрових хвиль в тропосфері проявляється поглинання, що проявляється у формі раптових змін показника заломлення через зміни температури, вмісту водяної пари і барометричного тиску.

При заданій висоті розташування супутника(платформи)  $h$  і куті місця  $\beta$ , який визначається як кут між напрямком на горизонт і напрямком осі променя антени земної станції на супутникову антену похила дальність зв'язку (рис.3.1):

$$D = R_3^2 + (R_3 + h)^2 - 2R_3(R_3 + h)\cos\gamma \quad (3.1)$$

де  $R_3$  - радіус Землі (6378 км),  $\gamma$  - геоцентричний кут, визначається з формули:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\cos\beta}{1+h/R_3}\right) - \beta. \quad (3.2)$$

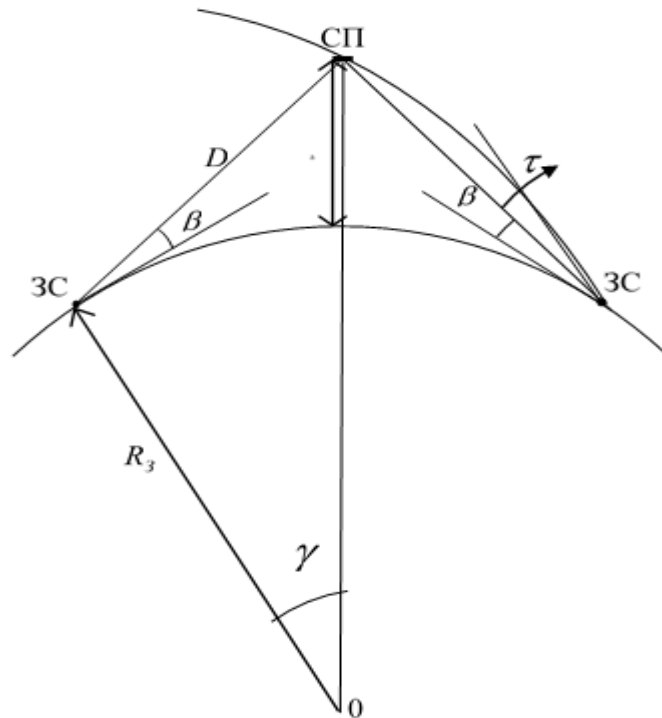


Рис.3.1. Визначення похилої дальності зв'язку; ЗС –земна станція, СП – стратосферна платформа

Для максимальної похилої дальності, при  $\beta = 0$ :

$$D_{\max} = \sqrt{h(2R_3 + h)} \quad (3.3)$$

При  $\beta = 90^\circ$  мінімальна похила дальність  $D_{\min} = h$ .

Діаметр зони обслуговування без урахування рефракції з формул (3.2) і (3.3) може бути обчислений за формулою:

$$d = R_3 \sqrt{2(1 - \cos \gamma)} \quad (3.4)$$

або так як  $\gamma \leq 10^\circ$  тоді

$$d = 2R_3 \cdot \left( \arccos \left[ \frac{\cos \beta}{1 + h/R_3} \right] - \beta \right) (\text{рад}) \quad (3.5)$$

Однак траєкторія радіопроменя внаслідок атмосферної рефракції буде згинатися в бік поверхні Землі. Кут рефракції, що представляє собою кут в точці прийому між істинним і уявним напрямком на джерело випромінювання, не залежить від частоти падаючого випромінювання.

### 3.2 Втрати енергії супутникового каналу

У цьому розділі ми описуємо характеристики каналу, які 3GPP розглядає для супутникового зв'язку на міліметрових хвилях [10]. Зокрема, сигнал між наземного і супутникового станціями піддається кількома стадіями загасання, а втрати на трасі (PL -Path Loss) складаються з наступних елементів:

$$PL[dB] = PL_e + PL_b + PL_g + PL_s. \quad (3.6)$$

В (1)  $PL_e$  – втрати сигналу при переході в приміщення,  $PL_b$  – основні втрати сигналу в каналі,  $PL_g$  – поглинання сигналу в атмосфері та  $PL_s$  – загасання сигналу та тропосферних та іоносферних мерехтіннях.

### 3.3 Втрати сигналу при переході в приміщення.

Супутникове розповсюдження сигналу може здійснюватися в межах прямої видимості (LOS - Line of Sight) або поза прямої видимості (NLOS - Non Line of



Sight) з ймовірністю, зазначеної в [3GPP], яка залежить від навколишнього середовища (наприклад, міський чи сільський сценарій) і кута піднесення  $\alpha$ . У випадку NLOS-зв'язку з внутрішнім наземним терміналом, 3GPP також визначає втрати на вході в будівлю ( $PL_e$  – Building Entry Loss) у формі функції розподілу ймовірності  $p$  того, що дана втрата не буде перевищена, і визначається як:

$$PL_e(p) = 10 \log_{10}(10^{0.1A} + 10^{0.1B} + 10^{0.1C}), \quad (3.7)$$

В (4.7) параметри  $A$ ,  $B$  і  $C$  залежать від робочої частоти  $f_c$ , типу забудови, місця розташування всередині будівлі і руху в будівлі, як описано в [3GPP].

### 3.4 Основні втрати на трасі

Основні втрати на трасі враховують поширення сигналу у вільному просторі (FSPL - Free Space Propagation), тіньовий загасання (SF - Shadow Fading) і втрати через перешкоди (CL - Clutter Loss) і подаються як:

$$PL_b(d, f_c, \beta) = FSPL(d, f_c) + SF + CL(\alpha, f_c), \quad (3.8)$$

Втрати у вільному просторі залежать від несучої частоти  $f_c$  в ГГц і відстані  $d$  (тобто похилій дальності) між наземного і супутникового станціями і задаються виразом:

$$FSPL(d, f_c) = 32.45 + 20 \log_{10}(f_c) + 20 \log_{10}(d), \quad (3.9)$$

В (4.9)  $d$  виражається в метрах як функція радіуса Землі  $R_E$ , висоти орбіти супутника  $h$  і кутового піднесення супутника  $\beta$ , тобто:

$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \beta + h^2 + 2hR_E} - R_E \sin \beta, \quad (3.10)$$

SF моделюється як нормальна випадкова величина, яка виражається в децибелах і має нормальний розподіл з нульовим середнім і стандартними відхиленнями  $\sigma_{SF}$ . CL моделює загасання потужності сигналу, викликане існуючими будівлями та об'єктами на землі. Це залежить від кута піднесення  $\beta$ , частоти несівної  $f_c$  та параметрів навколишнього середовища. Значення  $\sigma_{SF}$  і CL вибрані в 3GPP для різних еталонних сценаріїв в залежності від  $\beta$  та  $f_c$ . Для

сценарію щільної міської забудови та з урахуванням роботи в діапазонах Ка,  $\sigma_{SF}$  коливається від 12.3 до 17.1 дБ в NLOS (от 0.6 до 2.9 дБ в LOS) при значеннях  $\alpha$ , що зменшуються, в той же час CL знаходиться в діапазоні від 32.9 до 44.3 дБ в NLOS (в LOS, CL дуже малий і може бути вважатися 0 дБ).

### 3.5 Атмосферне поглинання

Загасання через атмосферних газів описується як функція несучої частоти  $f_c$ , кута піднесення  $\beta$ , висоти орбіти супутника  $h$  і щільності водяної пари (тобто абсолютної вологості). На частотах нижче 10 ГГц їм зазвичай можна знехтувати. Однак при  $\beta > 10^\circ$  рекомендується виконувати розрахунок для будь-якої частоти вище 1 ГГц. Зокрема, параметр  $PL_g$  розраховується як:

$$PL_g(\beta, f_c) = \frac{A_{\text{зенит}}(f_c)}{\sin \beta}, \quad (3.11)$$

В (4.11)  $A_{\text{зенит}}(f_c)$  є зенітне загасання (тобто загасання в точці безпосередньо над спостерігачем на Землі), і обумовлено сухим повітрям (киснем, індукованим тиском азотом і нерезонансна дебаєвського загасання) і водяною парою. У нормальних атмосферних умовах  $A_{\text{зенит}}(f_c)$  нижче 10 дБ.

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

$$L_{a0} = \frac{(\gamma_{O_2} h_{O_2} + \gamma_{H_2O} h_{H_2O})}{\sin \varphi_0}, \quad \varphi_0 > 0, \quad (3.12)$$

$\varphi_0$  - кут місця земної станції, град;  $\gamma_{O_2}$  та  $\gamma_{H_2O}$  - 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:

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

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

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. 3.2.

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. 3.1.

Таблиця 3.1.

## 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                     |
| 15,0         | 0,02                      | 0,03  | 0,08   | 0,03                      |
| 20,0         | 0,02                      | 0,3   | 0,3  | 0,05                      |
|              |                           |   |  | 0,1                       |
|              |                           |   |  | 0,12                      |
|              |                           |   |  | 0,32                      |

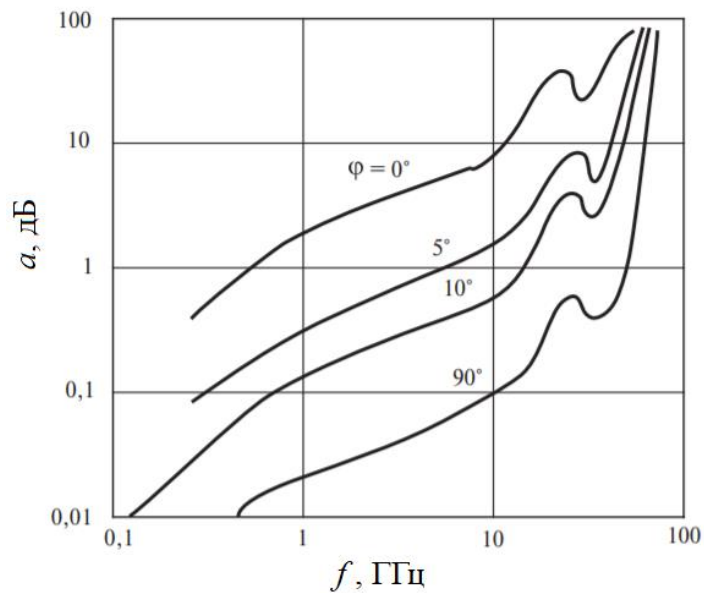


Рис. 3.2. Частотні залежності сумарного молекулярного послаблення радіосигналу

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  $\rho$ ,  $\text{г/м}^3$ . 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.

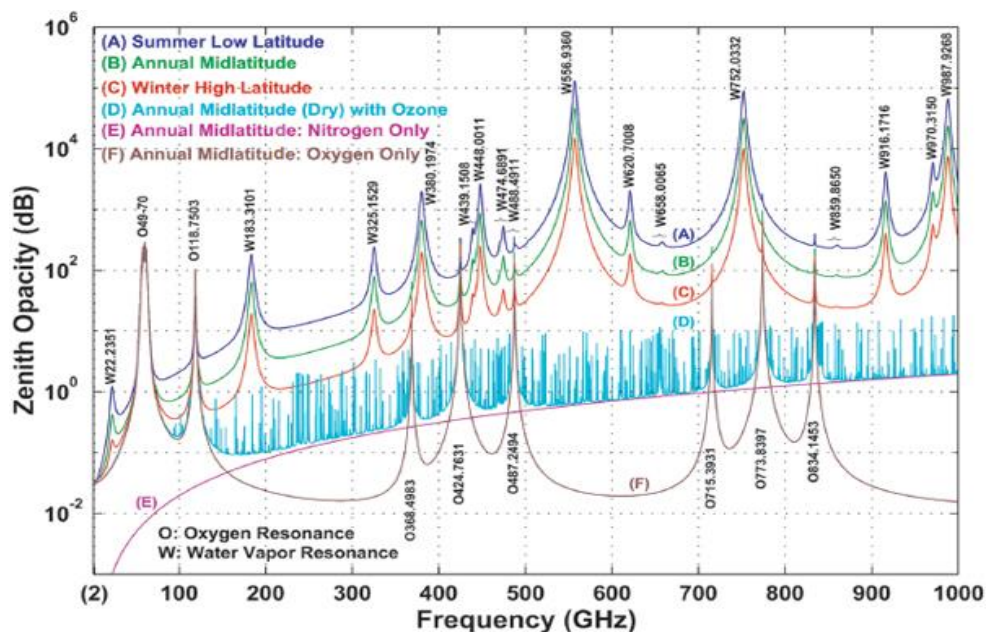


Рис. 3.3. Згасання в атмосферній вертикальній лінії в радіо спектрі, що спільно використовується для EESS.

### 3.6 Іоносферні / Тропосферні мерехтіння

Мерехтіння відповідає швидким коливанням амплітуди і фази сигналу. Залежно від несучої частоти іоносферні і / або тропосферні мерехтіння можуть впливати на супутниковий зв'язок. Простіше кажучи, явища іоносферних (тропосферних) мерехтіння застосовні тільки для зв'язку діапазоном нижче (вище) 6 ГГц.

а) Іоносферне мерехтіння: для поширення сигналу в діапазоні частот нижче

6 ГГц іоносферне мерехтіння залежить від місця розташування, часу доби, пори року, а також сонячної і геомагнітної активності (табл.4.2). У звичайних умовах на середніх широтах (від  $\pm 20^\circ$  до  $\pm 60^\circ$ ), сильні рівні мерехтіння спостерігаються рідко, і ми можемо прийняти, що  $PL_s = 0$ . Для всіх інших широт ми маємо:

$$PL_s(f_c) = \frac{27.5 \cdot S_4^{1.26} \cdot (f_c / 4)^{-1.5}}{\sqrt{2}}, \quad (3.13)$$

$S_4$  - індекс мерехтіннь амплітуди і залежить від широти. На низьких широтах (між  $\pm 20^\circ$ , тобто в екваторіальних областях) мерехтіння виникає через великі обсягів збідненої іонізації, створюваної конвективними плазмовими процесами, тому  $S_4 = 0.4$ . На високих широтах (вище  $\pm 60^\circ$ , тобто в авроральній і полярній областях) мерехтіння в основному походить від краю зовнішнього пояса Ван-Аллена, тому  $S_4 = 0.7$ .

### 3.7 Визначення площини горизонту, похилої дальності зв'язку, затримки сигналу супутника LEO

Відношення між ідеальною та проектною шириною площини горизонту визначається та аналізується на предмет оптимальних значень.

Швидкість супутника, період та кількість денних проходів розраховуються в таблиці 1. Кожна кругова орбіта характеризується своєю висотою  $H$  відповідно з радіусом орбіти  $r$ , взаємопов'язаним наступним чином:

$$r = H + R_E \quad (3.16)$$

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

$$v = \sqrt{\mu/r}, \quad (3.17)$$

$\mu = M \cdot G = 3,986 \times 10^5$  км<sup>3</sup>/с<sup>2</sup> – постійна величина, що є добутком маси  $M$  Землі та гравітаційної постійної Землі  $G$ .

Період обертання супутника виражається як:

$$T = 2\pi\sqrt{r^3/\mu}, \quad (3.18)$$

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

Площина орбіти супутника в космосі визначається параметрами орбіти, які в ідеальних умовах залишаються незмінними по відношенню до спостерігача з Землі. Оскільки LEO літають надто низько і, отже, мають короткий період прольоту, вони здійснюють кілька щоденних прольотів над Землею з однаковими параметрами орбіти.

Таблиця 3.2

Параметри супутників LEO на різних орбітах

| Parameters | The first shell<br>$H = 550$ km | The second shell<br>$H = 1110$ km | The third shell<br>$H = 340$ km |
|------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| $r$ (km)   | 6,921                           | 7,481                             | 6,711                           |
| $v$ (km/s) | 7.589                           | 7.299                             | 7.706                           |
| $T$ (min)  | 95.5                            | 107.3                             | 91.2                            |
| $n$        | 15.03                           | 13.38                             | 15.74                           |

Коли LEO летить своєю орбітою над Землею, Земля також обертається навколо своєї осі північ-південь під орбітою супутника. Через обертання Землі наземна станція на поверхні Землі змінює своє положення щодо площини просторової орбіти, тому наведення від наземної станції (користувача) на супутник не є ідентичним для різних супутників, що проходять щодня по одній і тій же орбіті. Таким чином, вид супутника з наземної станції (користувача) відрізняється для кожного денного проходу (Табл. 3.1). Різний вид супутника з боку користувача (наземної станції) означає різну тривалість видимості між користувачем та супутником і, як наслідок, різну тривалість зв'язку. Це характерно для супутників LEO. На закінчення, з однієї наземної станції (точка розташування користувача) супутник на своїй орбіті видно по-різному при різних проходах супутника по одній і тій же орбіті, отже, кожен прохід LEO забезпечує різну тривалість зв'язку з відповідною точкою на землі (користувачем). Це

стосується будь-якої наземної станції (користувача) на Землі. Геометричний опис, що забезпечує вигляд із космосу між супутником та наземною станцією, наведено на рис.3.4.

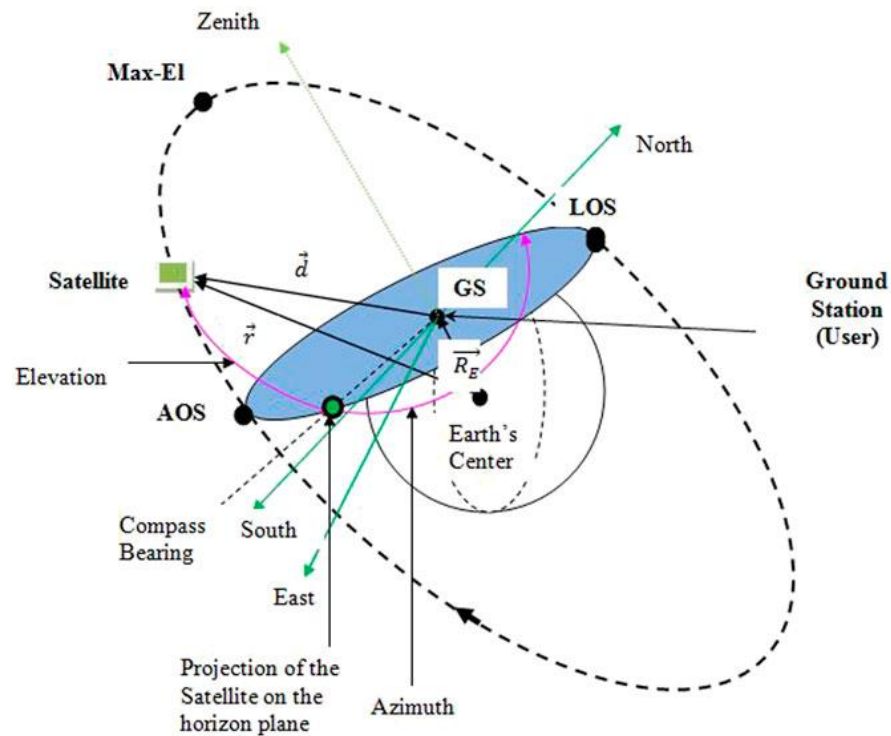


Рис.3.4. Геометричні параметри, що характеризують положення супутника із космосу відносно наземної станції

Площина горизонту розглядається як дотична площина (перпендикуляр) до вектора користувача (наземної станції) із центром Землі ( $\vec{R}_E$ ). Сині еліпси на рис.3.1 є ідеальною площиною горизонту, видимою з боку користувача (наземна станція-GS). Теоретично кожна точка на поверхні Землі має різну площину горизонту, а це означає, що з кожної точки на Землі супутник на низькій навколосемній орбіті видно під різними кутами огляду. З погляду наземної станції (користувача) становище супутника у просторі не більше його орбіти визначається азимутом і кутами піднесення. Азимут – це кут на пряму на супутник, виміряний у площині горизонту від географічної півночі за годинниковою стрілкою в діапазоні від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Піднесення – це кут між супутником та горизонтальною площиною користувача (наземної станції) в діапазоні від  $0^\circ$  до



90°.

На рис.3.1 показано, що зв'язок між супутником LEO та користувачем заблокований, коли супутник з'являється прямо в площині горизонту користувача, і зв'язок розблокується, коли супутник зникає з площини горизонту користувача.

### 3.8 Проходження супутника над наземною станцією

Проходження супутника над наземною станцією характеризується трьома типовими подіями, що відбуваються у порядку. По-перше, коли супутник з'являється прямо в площині горизонту, визначеної як подія виявлення супутника (AOS), це встановлює зв'язок з станцією користувача. Теоретично це відбувається за вугілля піднесення 0°. Друга подія - коли супутник досягає максимальної висоти (Мах-ЕІ) відповідного прольоту супутника над станцією користувача. Третя подія відбувається, коли супутник зникає з площини горизонту, відомий як подія втрати супутника (LOS), яка теоретично також відбувається на висоті 0°. Ці події малюнку 3 позначені як AOS, Мах-ЕІ і LOS.

Кожен прохід супутника над станцією користувача характеризується своїм максимальним піднесенням (Мах-ЕІ), видимим зі станції користувача (подія Мах-ЕІ). Для переходу супутника від події AOS до події Мах-ЕІ висота збільшується (до Мах-ЕІ), а події Мах-ЕІ до події LOS висота симетрично зменшується. Очевидно, що чим більший кут у випадку Мах-ЕІ, тим довший шлях супутника, і зворотне також вірно: що менше кут Мах-ЕІ, тим коротший шлях супутника. Коротший супутниковий шлях (нижчий Мах-ЕІ) забезпечує більш короткий зв'язок з наземною станцією (користувачем), а більш довгий супутниковий шлях (вищий Мах-ЕІ) забезпечує більш тривалий зв'язок. На закінчення тривалість зв'язку між супутником і користувачем залежить від максимальної висоти (Мах-ЕІ) від місця користувача, з якого видно супутник.

Віртуальна лінія, що з'єднує супутник і наземну станцію на малюнку 3, представляє фактичну відстань між супутником і наземною станцією

(користувачем), відоме як похилий вектор дальності ( $d \rightarrow$ ) між супутником та наземною станцією (користувачем). Похила дальність (модуль вектора  $d \rightarrow$ ) між наземною станцією та супутником LEO залежить від максимальної висоти (Max-EI) шляху супутника над наземною станцією (користувачем).

Таблиця 3.4

| Параметри моделювання                    |  | Значення                |
|--|--|-------------------------|
| Параметр                                 |  |                         |
| Кут елевації супутника $\alpha$          |  | {10°, ..., 90°}         |
| Висота орбіти супутника $h$              |  | {300, 10000, 36000} км  |
| Частота несівної $f_c$                   |  | {2, 6, 28, 70, 150} ГГц |
| Відстань між супутниками $\lambda_{isd}$ |  | {10, 50, 200} км        |
| Системна пропускна здатність $W$         |  | {0.02, 0.8, 2, 3} ГГц   |
| Коефіцієнт підсилення RX-антени $G_{rx}$ |  | {50, 80} дБ             |
| Коефіцієнт підсилення TX-антени $G_{tx}$ |  | 43.2 дБ                 |
| Потужність $P_{tx}$                      |  | 33 дБм                  |
| Граничне значення SNR (S/N)              |  | 0 дБ                    |
| Широта $l$                               |  | 35°                     |
| Радіус Землі $R_E$                       |  | 6371 км                 |
| Сумарний тиск атмосфери $P_h$            |  | 1013.25 гПа             |
| Температура $T$                          |  | 288.15 К                |
| Концентрація водяного пару $\rho_w$      |  | 7.5 г/м <sup>3</sup>    |
| Тиск водяного пару $e_w$                 |  | $\rho_w T / 216.5$      |

Тропосферні мерехтіння: для поширення сигналу в діапазоні частот вище 6 ГГц 3GPP характеризує завмирання через PL ( $f_c; \beta$ ) як рівень тропосферного загасання в 99% часу і виводиться з як функція від  $\beta$  і  $f_c$ . Зокрема, вплив тропосферних мерехтінь, на відміну від іоносферних мерехтінь, збільшується зі

збільшенням частоти несучої сигналу, особливо на частотах вище 10 ГГц. У цьому випадку коливання сигналу викликані раптовими змінами показника заломлення через зміни температури, вмісту водяної пари і барометричного тиску. Тропосферне мерехтіння також збільшується при малих кутах піднесення через більш довгого шляху сигналу.

### 3.9 Порівняння ефективності супутникових систем

Для моделювання розглядаємо сценарій, в якому наземний зв'язок доповнюється супутниковими станціями LEO, MEO і GEO, розташованими на різних висотах 300 км; 10000 км; 36000 км відповідно, для різних кутів елевації 10... 90 град. Зв'язок Земля-супутник моделюється на різних частотах  $f_c$ , які включають передачі як суб-6 ГГц, так і міліметрові хвилі, з смугою пропускання  $W$ , яка є функцією від несівної частоти  $f_c$ : ми встановлюємо  $W = 20$  МГц для  $f_c \leq 6$  ГГц,  $W = 800$  МГц для

$$6 < f_c \leq 60 \text{ ГГц і } W = 2 \text{ ГГц для } 60 < f_c \leq 150 \text{ ГГц.}$$

У супутникових сценаріях використовуються спрямовані антени з високим коефіцієнтом посилення для покриття дуже великих відстаней передачі. Отже, наземні станції оснащені фізично реконфігурованими антенами з коефіцієнтом підсилення  $G_{tx} = 43.2$  дБ. В той час як для антен супутникових станцій коефіцієнт посилення  $G_{tx}$  коливається від 50 до 80 дБ.

З аналізу значень сигнал/шум (SNR) між передавачем і приймачем продуктивність досліджуваних архітектур (для каналу зв'язку Земля-супутник, та наземного каналу LTE) порівняємо пропускну здатність  $C$  по Шеннону, тобто максимальну досяжну швидкість передачі даних, яка обчислюється як

$$C = W \log_2 (1 + S/N) \quad (4.13)$$

Припускаємо, що якщо вимірний SNR нижче попередньо визначеного порога  $S/N$ , зв'язок Земля-супутник не може бути встановлений: у цьому випадку ми встановлюємо пропускну здатність Шеннона рівною 0.

Також розглядаємо сценарій для наземних мереж, в якому eNB LTE, що

працюють на робочій частоті  $f_c = 2$  ГГц при ширині смуги  $W = 20$  МГц, де за допомогою ізотропної передачі, розгортається передача на відстані між пунктами 10 м, 50 м та 200 м, щоб характеризувати різні конфігурації щільності розташування. У цьому випадку канал моделюється, як зазначено в 3GPP TR 36.842.

На рис.3.5 зображена залежність ємності Шеннона  $C$  від несучої частоти  $f_c$ , підсилення антени на супутниковій станції  $G_{rx}$  і висота орбіти супутника  $h$ . Для автономного наземного зв'язку, яка обмежена обмеженою пропускнуною здатністю, доступною в фізичному каналі LTE, пропускна здатність зазвичай нижче 500 Мбіт/с.

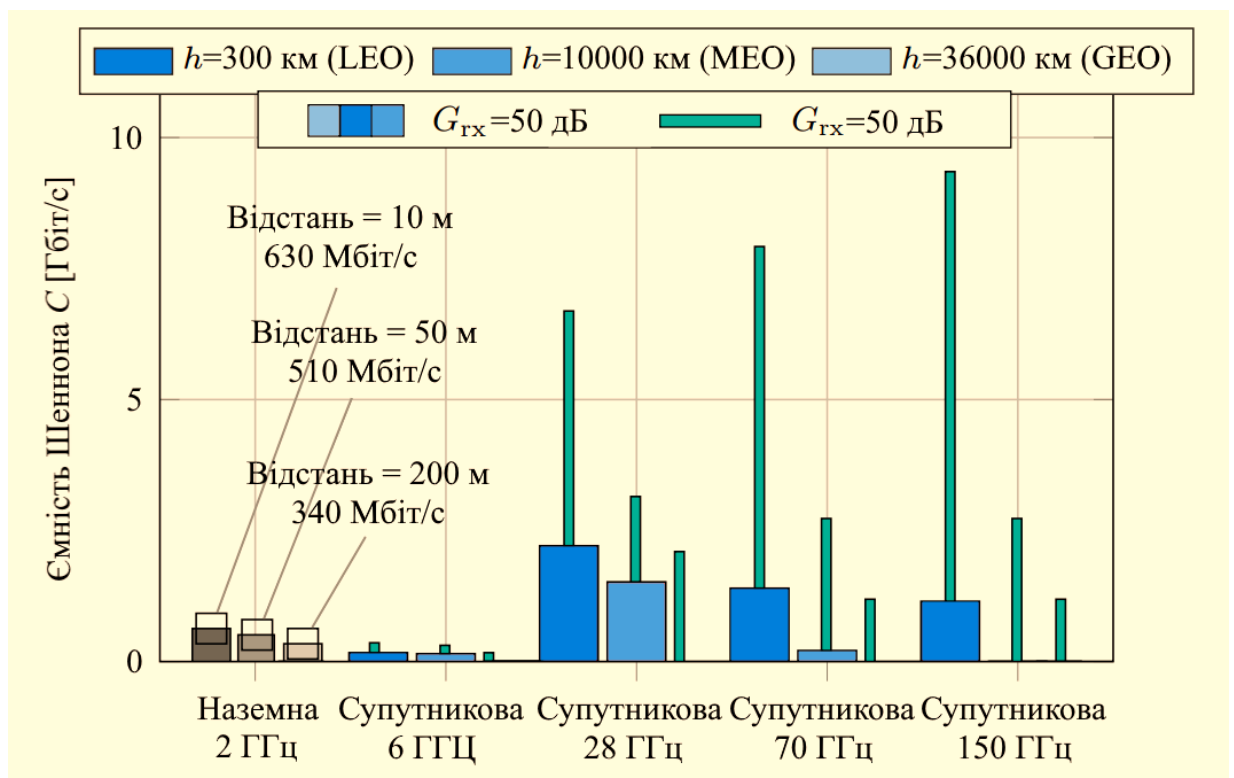


Рис. 3.5. Ємність Шеннона для наземних та супутникових конфігурацій ліній зв'язку різних частот, та різної висоти орбіти супутників  $h$ .  $\alpha = 10^\circ$ ,  $S/N = 0$  дБ, сценарій щільної міської забудови.  $G_{rx} = 50$  дБ/80 дБ для широкого/вузького променю

Ущільнення eNB, хоча і покращує швидкість на одиницю площі, але не дуже збільшує значення максимальної миттєвої швидкості для кожного користувача і, крім того, вимагає високих витрат і експлуатаційного розгортання для мережевих операторів і вимагає транзитних з'єднань з високою пропускну здатністю. У цьому контексті якість зв'язку може бути покращено за рахунок доповнення наземної інфраструктури супутниковими станціями. Зокрема, хоча супутникові операції на частоті 6 ГГц не приносять жодних значних переваг з точки зору пропускну здатності в порівнянні зі сценарієм тільки для наземних мереж, дуже велика смуга пропускання, доступна в спектрі вище 6 ГГц, зазвичай збільшує пропускну здатність Шеннона для збільшення значень  $f_c$ . Однак коефіцієнт посилення поступово зменшується зі збільшенням  $f_c$  через все більш і більш серйозного впливу втрат на трасі (в першу чергу, атмосферного поглинання і тропосферних мерехтінь) на частотах міліметрових хвиль.

Пропускна здатність в кілька Гбіт/с в діапазонах міліметрових хвиль може реалізуватися, якщо супутникова станція використовує направлені антени з дуже високим коефіцієнтом посилення, наприклад,  $G_{rx} > 50$  дБ, тим самим формуючи дуже гострі промені, що може бути легко досягнуто за допомогою антенних технологій, реалізованих в даний час. Перехід від висоти супутників LEO до супутників GEO, в свою чергу, вимагатиме збільшення підсилення не менше ніж на 30 дБ для підтримки досить великої пропускну здатності. Це практично може бути здійснено, оскільки супутники GEO працюють для послуг фіксованого зв'язку і постійно видно з наземних терміналів, що полегшує установку, обслуговування та експлуатацію спрямованих антен. Крім того, фізичний розмір антен на міліметрових хвилях настільки малий, що стає можливим побудувати дуже великі антенні решітки в обмеженому просторі, тим самим збільшуючи продуктивність за рахунок масивного формування діаграми спрямованості. Нарешті, зверніть увагу, що було б несправедливо безпосередньо порівнювати характеристики наземного і супутникового архітектур через різних характеристик двох сценаріїв (наприклад, одна супутникова станція займає велику площу, ніж типова наземна мала стільника, і, отже, може знадобитися для обслуговування

більшої кількості наземних терміналів). З іншого боку, щоб підтвердити можливість прийняття супутникових рішень як засіб для пропозиції додаткового високопродуктивного і відмовостійкого каналу для перевантажених наземних станцій і/або наземних терміналів в віддалених / необслуговуваних районах (які в іншому випадку були б нульовими за пропускну здатністю).

Проаналізуємо вплив висоти розташування супутника. Пропускна здатність  $C$  значно зменшується зі зменшенням значень. Амплітуда тропосферних мерехтінь стає значнішою при малих кутах місця через ефектів багатопроменевого поширення, що призводять до загасання сигналу більше 10 дБ, особливо уздовж прибережних і надводних ліній зв'язку.

Крім того, дуже низька висота призводить до того, що сигнал Земля-супутник проходить через атмосферу довше, що призводить до більшого загасання через атмосферних газів (проте нижче 10 ГГц таким ефектом зазвичай можна знехтувати, як показано на рис. 3, який показує порівняні значення  $C$  в залежності від). По-друге, існує чітка кореляція між піднесенням супутника і його ймовірністю перебувати в зоні прямої видимості, тобто супутник в зеніті ( $\beta = 90$ ) за визначенням знаходиться в зоні прямої видимості.

LOS, в той час як при зменшенні супутник з більшою ймовірністю буде заблокований висотними будівлями і / або іншими перешкодами. За умови LOS мінімізуються ефекти тропосферного розсіювання, вільного простору і дифракції [27], що призводить до кращому поширенню, що в цілому забезпечує підвищену пропускну здатність. Більш того, втратами через перешкоди (розділ III-B) в LOS зазвичай можна знехтувати, тим самим покращуючи якість зв'язку.

Ефекти поглинання через дифракції та перешкод від будівель особливо важливі в щільній міській середовищі (рис.4.4). Зокрема, набагато більш висока ймовірність блокування перехрестя в міському сценарії може знизити досягну пропускну здатність більш ніж на 60% на великій висоті.

До таких висновків можна прийти, глянувши на результати на рис. 3.6, на якому показана пропускна здатність Шеннона  $C$  як функція  $h$  і від сценарію поширення радіохвиль з урахуванням різних архітектур антен.

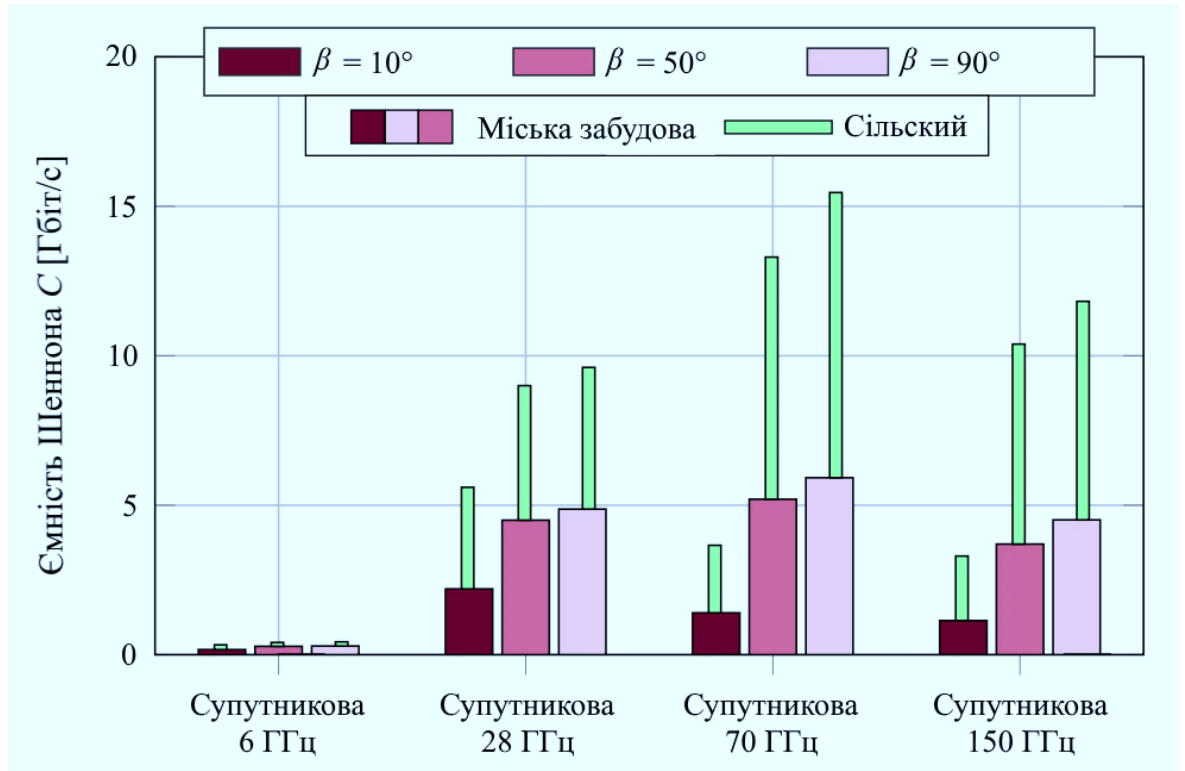


Рис. 3.6. Ємність Шеннона для ліній зв'язку супутникових конфігурацій різних частот для різних кутів елевації супутників  $\beta$ .  $S/N = 0$  дБ,  $G_{\text{ГХ}} = 50$  дБ,  $h = 300$  км (LEO). Сценарій щільної міської забудови/сільської місцевості для широкого/вузького променю

Якщо, налаштовані дуже спрямовані антени на супутниках LEO і GEO ( $G_{\text{ГХ}} = 50$  дБ і  $G_{\text{ГХ}} = 80$  дБ, відповідно), робота супутників mmWave як і раніше призводить до пропускної спроможності в декілька Гбіт/с, незважаючи на дуже велику відстань, яку необхідно покрити.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проаналізовано передові проекти низькоорбітальних супутникових систем другого покоління, багаторівневі групування GEO, MEO, LEO. Проведено моделювання характеристик LEO наступного покоління. Проаналізовано методи математичного моделювання каналу супутникового зв'язку. Проведено порівняння розрахованих параметрів супутникових конфігурацій ліній зв'язку для різних частот та різної висоти орбіти супутників LEO супутників.

Аналіз показує, що супутникова мережа LEO наступного покоління може запропонувати достатньо продуктивності для виконання вимог QoS. LEO мережа працює набагато краще, ніж традиційні GEO супутникові системи. Проаналізовано показники LEO, GEO і волоконно-оптичних систем для глобального покриття.

Показано, що для подальших досліджень являється пріоритетом дослідження методів практичного та теоретичного інтегрування наземних і супутникових, що працюють на різних орбітах та різних частотних радіодіапазонах, а також різних гібридних технологій, що сприяють підвищенню пропускної здатності та доступності інформаційних мереж. Супутникові мережі не повинні конкурувати з наземними мережами, вони повинні взаємодіяти, щоб надати доступ в Інтернет в глобальному масштабі і максимальною пропускною здатністю.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. J. Thompson et al., “5G wireless communication systems: prospects and challenges,” *IEEE Comm. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 62-64, 2014.
2. 5GPPP Architecture Working Group, “View on 5G Architecture,” Dec 2017.
3. M. Gineste et al., “Narrowband IoT Service Provision to 5G User Equipment via a Satellite Component,” in *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Singapore, Singapore, Dec 2017.
4. S. Kota et al., “Satellite component of NGN: Integrated and hybrid networks,” *International J. Satellite Commun. and Netw.*, vol. 29, no. 3, pp. 191-208, 2011.
5. Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, Sep. 2019.
6. M. Latva-aho and K. Leppanen (editors), “Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence” White Paper, 2019.
7. M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies,” submitted to the *IEEE Communications Magazine*, 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1903.12216>
8. M. Jia, X. Gu, Q. Guo, W. Xiang, and N. Zhang, “Broadband hybrid satellite-terrestrial communication systems based on cognitive radio toward 5G,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 96–106, Dec 2016.
9. EMEA Satellite Operators Association, “Satellite Communication Services: An integral part of the 5G Ecosystem,” White Paper, 2017.
10. M. N. Sweeting, “Modern small satellites-changing the economics of space,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 3, pp. 343–361, Feb 2018.
11. C. Sacchi, K. Bhasin, N. Kadowaki, and F. Vong, “Toward the Space 2.0 Era [Guest Editorial],” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 16–17, March 2015.

12. T. S. Rappaport, R. W. Heath Jr, R. C. Daniels, and J. N. Murdock, *Millimeter wave wireless communications*. Pearson Education, 2015.
13. 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*, Feb 2019.
14. 3GPP, “Study on New Radio (NR) to support non terrestrial networks,” TR 38.811 (Release 15), 2018.
15. P. Chini, G. Giambene, and S. Kota, “A survey on mobile satellite systems,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 28, no. 1, pp. 29–57, Aug 2009.
16. A. D. Panagopoulos, P.-D. M. Arapoglou, and P. G. Cottis, “Satellite communications at Ku, Ka, and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 6, no. 3, pp. 2–14, ThirdQuarter 2004.
17. E. Cianca, T. Rossi, A. Yahalom, Y. Pinhasi, J. Farserotu, and C. Sacchi, “EHF for satellite communications: The new broadband frontier,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 11, pp. 1858–1881, Nov 2011.
18. G. Baldini, S. Karanasios, D. Allen, and F. Vergari, “Survey of wireless communication technologies for public safety,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 619–641, Sep 2013.
19. W. Zhang, T. Wu, H. Ma, and G. Li, “Hybrid GEO and IGSO Satellite Constellation Design with Ground Supporting Constraint for Space Information Networks,” in *IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2018.
20. M. De Sanctis, E. Cianca, T. Rossi, C. Sacchi, L. Mucchi, and R. Prasad, “Waveform design solutions for EHF broadband satellite communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 18–23, Mar 2015.
21. M. A. Vazquez, A. Perez-Neira, D. Christopoulos, S. Chatzinotas, B. Ottersten, P.-D. Arapoglou, A. Ginesi, and G. Tarocco, “Precoding in multibeam satellite communications: Present and future challenges,” *IEEE Wireless*

Communications, vol. 23, no. 6, pp. 88–95, Dec 2016.

22. ITU-R, “Attenuation by atmospheric gases,” P.676-11, 2016.
23. 3GPP, “Study on new radio access technology Radio interface protocol aspects (Release 14) ,” TR 38.804, 2017.

## ДОДАТОК 1

### **ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ**