

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НАСТУПНИХ
ПОКОЛІНЬ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи ТСДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Шеховцов В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Кременецька Я.А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2022

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра	Телекомунікаційних систем та мереж
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	172 Телекомунікації та радіотехніка (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Мобільних та відеоінформаційних
технологій

Н.В.Руденко

“ ”

_____ 2021 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Шеховцову Владиславу Сергійовичу

1. Тема роботи: “Аналіз напрямків розвитку супутникових технологій для телекомунікаційних систем наступних поколінь”,
керівник роботи Кременецька Яна Адольфівна, д.т.н.,
затверджені наказом вищого навчального закладу від « »_____..

2. Строк подання студентом роботи _____.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій.
Мережа 2030. FG-NET-2030: план технологій, додатків і ринкових драйверів до 2030 року і далі.

2. Технологічні особливості реалізації супутникових групувань LEO.

3. Науково-технічна література.

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

1. Тенденції розвитку супутникового зв'язку.

2. Порівняння супутникових угруповань за розгортанням та наданням послуг.

3. Визначення та розрахунок параметрів космічної орбіти, що впливають на процес хендовера між супутниками LEO.

5. Графічна частина роботи представлена на 10 слайдах презентації.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	12.10.21	Викон.
2.	Аналіз тенденцій розвитку супутникового зв'язку	16.10.21	Викон.
3.	Порівняльний аналіз сучасних проектів супутникових угруповань за розгортанням та наданням послуг	27.10.21	Викон.
4.	Розрахунок параметрів космічної орбіти, що впливають на процес хендовера між супутниками LEO	20.11.21	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	12.12.21	Викон.
6.	Розробка презентації	15.12.21	Викон.

Студент

Шеховцов В.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Кременецька Я.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

“ ”

_____ 202_ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Шеховцова Владислава Сергійовича

на тему: “Аналіз напрямків розвитку супутникових технологій для телекомунікаційних систем наступних поколінь ”

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, а також тих, що знаходяться на ранніх стадіях розгортання. Прогнозується, що розвиток мереж зв'язку 5G та майбутньої технології 6G будуть реалізовані із застосуванням супутникових технологій.

Позитивні сторони:

Проведений розрахунок параметрів космічної орбіти, що впливають на процес хендовера між супутниками LEO. Показано, що методи геометричної інтерпретації можуть бути застосовані для визначення процесу передачі для безперервності послуг у реальному часі та забезпечити безпечний зв'язок.

Проведені дослідження свідчать про високий науково-технічний рівень використання телекомунікаційних технологій в даному дослідженні. Робота викладена науковою мовою, логічно й послідовно відбиває мету та поставлені в роботі завдання. Пояснювальна записка відповідає стандартам до її оформлення.

Недоліки:

1. В роботі не достатньо проаналізовано критерії обмеження пропускну здатності каналів зв'язку FSO.
2. На стор. 73 в Табл.3.1 недостатньо обґрунтовано наведено технологічні параметри.

Висновки:

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

Якість проекту (роботи)	
Виконано на замовлення підприємства	
Виконано за тематикою НДР	
Виконано з макетом	
Виконано з застосуванням ЕОМ та 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 Шеховцов В.С. до захисту магістерської роботи
(прізвище та ініціали)

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

на тему: Аналіз напрямків розвитку супутникових технологій для телекомунікаційних систем наступних поколінь

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту _____ - Кравченко В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Довідка про успішність

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

з 21 року до 21 року повністю виконав (ла) навчальний план за напрямом підготовки, спеціальністю з таким розподілом оцінок за:

національною шкалою: відмінно _____%, добре _____%, задовільно _____%;

шкалою ECTS: A _____%; B _____%; C _____%; D _____%; E _____%.

Провідний фахівець інституту _____ - _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Висновок керівника магістерської роботи

Студент Шеховцов Владислав Сергійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, вміння аналізувати тенденції розвитку супутникових технологій для телекомунікаційних систем, технологічні особливості реалізації супутникових групувань, проводити розрахунки, що впливають на процес хендвера між супутниками LEO, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою в тому числі рекомендаціями МСЕ. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Магістерська робота виконана на високому рівні і заслуговує оцінку “відмінно”, а студент Шеховцов Владислав Сергійович - присвоєння кваліфікації “Магістр з телекомунікацій та радіотехніки”.

Керівник роботи _____ Кременецька Я.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

“ ” _____ 202_ року

Висновок кафедри про магістерську роботу

Магістерську роботу розглянуто. Студент Шеховцов В.С.
(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 LEO.

Предмет дослідження – аналіз процесу хендовера між супутниками LEO.

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

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

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

НИЗЬКООРБІТАЛЬНІ СУПУТНИКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ; ХЕНДОВЕР; LEO; SRARLINK; ЗАТРИМКА СИГНАЛУ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	9
ВСТУП	11
1 ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ	14
1.1 Еволюція супутникових технологій	14
1.2 Інновації у низкоробітальних супутникових угрупованнях	25
2 ПОРІВНЯННЯ СУПУТНИКОВИХ УГРУПОВАНЬ ЗА РОЗГОРТАННЯМ ТА НАДАННЯМ ПОСЛУГ	32
2.1 Порівняння угруповань на низькій навколосемній орбіті показує, що Starlink випереджає своїх конкурентів з погляду розгортання та обслуговування	32
2.2 Заплановані істотні зміни у конфігураціях супутникових угруповань.	34
2.3 Відмінності в цільових ринках: споживчі, корпоративні, державні та телекомунікаційні (backhaul)	40
2.4 Порівняння параметрів сузір'я "Starlink" LEO для різних орбітальних оболонок	42
3 ВИЗНАЧЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОСМІЧНОЇ ОРБИТИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС ХЕНДОВЕРА МІЖ СУПУТНИКАМИ LEO	50
3.1 Визначення площини горизонту, похилої дальності зв'язку, затримки сигналу супутника LEO	50
3.2 Ідеальна та спроектована горизонтальна площина	55
3.3 Похила відстань та затримка сигналу.	57
3.4 Зона покриття та ідеальна/запроектвана площиною горизонту	62

3.5 Розрахунок зони покриття.	66
3.6 Порівняння параметрів трьох орбітальних оболонок сузір'я	72
ВИСНОВКИ	74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	75
ДОДАТОК 1. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

HEO	Highly Elliptical Orbit – Висока еліптична орбіта
IoT	Internet of Things – Інтернет речей
ISL	Inter-Satellite Link – Міжсупутниковий канал
ITS	Intelligent Transportation System – Розумна транспортна система
LAP	Low Altitude Platform – Низьковисотна платформа
LEO	Low Earth Orbit – Низька навколоземна орбіта
LOS	Line-of-Sight – Пряма видимість
LTE	Long Term Evolution – Довготерміновий розвиток
ML	Machine Learning – Машинне навчання
MR	Mixed Reality – Змішана реальність
MEO	Medium Earth Orbit – Середня навколоземна орбіта
MNO	Mobile Network Operator – Оператор мобільного зв'язку
MIMO	Multiple Input Multiple Output – Множинний ввід та вивід
mMTC	massive Machine-Type Communications – Масовий міжмашинний зв'язок
NTN	Non-Terrestrial Network – Неназемна мережа
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access – Неортогональний множинний доступ
QoS	Quality of Service – Якість наданих послуг
RAN	Radio Access Network – Мережа радіодоступу
SF	ShadowFading – Тіньове загасання
SDN	Software Defined Networking – Програмно-конфігурована мережа
SDR	Software Defined Radio – Програмно-конфігурована радіосистема
SNO	Satellite Network Operator – Оператор супутникового зв'язку
SNR	Signal-to-Noise – Відношення сигнал/шум
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio – Відношення сигнал/перешкода плюс шум
SMBS	Super Macro Base Station – Супер макро-базова станція
SWAP	Size, Weight and Power – Розмір, вага та потужність
TRL	Technology Readiness Level – Рівень технологічної готовності
UE	UE User Equipment – Обладнання користувача
UAS	Unmanned Aerial System – Безпілотна повітряна система
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications – Наднадійний зв'язок з малою затримкою
VR	Virtual Reality – Віртуальна реальність

VNF	Virtualization Network Function – Мережева функція віртуалізації
VSAT	Very Small Aperture Terminal – Термінал з дуже малою апертурою
3GPP	3rd Generation Partnership Project – Проект партнерства третього покоління

ВСТУП

Супутниковий зв'язок грає важливу роль у глобальній екосистемі зв'язку, поєднуючи сільське та віддалене населення, забезпечуючи транзитне з'єднання з мобільними стільниковими мережами та швидко встановлюючи зв'язок у сценаріях екстреного реагування та реагування на стихійні лиха. Дослідження в технологіях супутникового зв'язку є предметом інтенсивних інвестицій для реалізації нових великих супутникових угруповань, а також тих, що знаходяться на ранніх стадіях розгортання. Нові низькоорбітальні сузір'я LEO, такі як Starlink від SpaceX, Project Kuiper від Amazon, OneWeb, Lightspeed від Telesat, серед інших можуть виявитися трансформаційними для ландшафту зв'язності на основі їх глобального покриття та їх придатності для областей, які не обслуговуються через волоконно-оптичні кабельні системи. Очікується, що з глобальним охопленням Землі за допомогою супутникових угруповань LEO різко збільшаться доступність до високошвидкісного широкосмугового доступу в Інтернет з рівнями обслуговування, які конкурують з волоконно-оптичними кабелями з точки зору швидкості та затримки, та за значно нижчих рівнів цін у порівнянні з традиційними геостационарними супутниками.

Запобіжна взаємодія з рішеннями LEO, ймовірно, принесе вигоди, оскільки відповідні бізнес-моделі все ще розвиваються. Добре поінформовані дії регулюючих органів та інвесторів на ранньому етапі можуть гарантувати, що країни-члени, що розвиваються, підготуються до можливостей, які відкриває очікуване розширення смуги пропускання зв'язку.

Супутниковий зв'язок в основному використовується для транзитного з'єднання для віддалених базових станцій стільникового зв'язку та як з'єднання останньої милі для окремих абонентів та підприємств.

На рис.1.1 представлено огляд мережевих компонентів інфраструктури Інтернету, від міжнародного підключення до останньої милі. Через більш високу відносну вартість смуги пропускання, що передається через супутникові технології в порівнянні з наземними технологіями, супутник в даний час в основному використовується в ситуаціях, коли оптоволоконні кабелі та інші технології з високою пропускнуою здатністю не є фінансово життєздатними через низьку щільність населення. і великих відстаней між мережами високої пропускнуої спроможності та мережі останньої милі. Однак, у деяких випадках супутниковий зв'язок використовується для передачі трафіку через міжнародний інтернет-шлюз або як частина базової мережі країни.

Супутникове підключення забезпечує глобальне покриття з компромісом у ємності та доступності. Покриття супутникового зв'язку вже є глобальним, складається з сузір'їв геостаціонарної орбіти (GEO) (також відомих як геостаціонарна орбіта Землі), сузір'їв середньої орбіти Землі (MEO) та низької орбіти Землі (LEO). між LEO, MEO та GEO.) На даний момент на орбіті є щонайменше 775 активних супутників, які обслуговують основні функції зв'язку (за винятком нових сузір'їв LEO).) менший за приблизно 2000 Тбіт/с використаної пропускнуої здатності наземного волокна, що все ще становить лише частку від загальної потенційної потужності існуючих кабелів (міжнародна пропускна здатність Інтернету). Станом на початок 2020 року в експлуатації було щонайменше 406 підводних кабелів, і 99% загального міжнародного трафіку Інтернет-трафіку передається за допомогою оптоволоконних кабелів.¹⁰ Оптові ціни також різко відрізняються від цін на міжнародний транзит (IP-транзит) від 1 дол. 3 долари США за мегабіт в секунду (Мбіт/с) на місяць на основних маршрутах між країнами проти оптових цін на виділену супутникову ємність, що наближаються до 200–400 доларів США на місяць. Таким чином, супутникове підключення є конкурентоспроможним за ціною лише для віддалених і розсіяних

груп населення, де розгортання волокна є складним. Очікується, що нове покоління LEO та високопродуктивних супутників GEO знизить структуру витрат і зробить супутникове підключення більш конкурентоспроможним

Крок, зроблений SpaceX, розгортаючи сузір'я LEO Starlink, щоб охопити Землю супутниками для повсюдних ширококутових 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 ширококутовий зв'язок із низькою затримкою до декілька десятків мілісекунд. Тому своєчасним є провести аналіз актуальності та можливості супутникового зв'язку, проаналізувати параметри космічної орбіти, що впливають на процес хендовера між супутниками LEO, проаналізувати поведінку супутника в космосі в межах кожної орбітальної оболонки Starlink.

1 ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Еволюція супутникових технологій

Історично супутниковий зв'язок залучав геостаціонарні орбіти (GEO) космічні кораблі — великі системи, які з роками стають все більш здатними. Але тепер сузір'я зв'язку на негеосинхронній орбіті (NGSO), включаючи супутники на низькій орбіті Землі (LEO) та середньоорбітальних (MEO) почали стрімко розвиватись та їх кількість незабаром може зрости (рис.1.1). Якщо поточні пропозиції супутникового



Рис.1.1. Порівняння за покриттям GEO, MEO, LEO

Інтернету стануть реальністю, близько 50 000 активних супутників будуть обертатися над головою протягом десяти років. Навіть якщо найграндіозніші плани не втіляться в життя, супутники будуть виготовлені та запущені в небачених масштабах.

Приклади ранніх систем LEO включають Iridium та Globalstar, перші покоління яких були запущені у 1990-ті роки. Сузір'я Ірідіум складалося з 77 супутників на висоті 780 км. Сузір'я Глобалстар складалося з 48 супутників на висоті близько 1400 км. Обидві супутникові системи були розроблені для обслуговування певних мобільних терміналів послугами мобільного зв'язку другого покоління (2G) з використанням як дзвінків, так і коротких інформаційних повідомлень зі швидкістю до 14,4 кбіт/с. Цікаво, що можливості бортових супутників були досить розвинені для того періоду, особливо для Iridium, оскільки кожен космічний корабель був обладнаний чотирма ISL, які зв'язуються із суміжними супутниками на швидкості 10 Мбіт/с, та високошвидкісними процесорами для маршрутизації голосу та даних з'єднання.

З багатьох причин (як технічних, так і комерційних) системи LEO, запущені в 1990-х роках, не були такими успішними, як очікувалося, оскільки вони надавали голос і дані лише обмеженій кількості користувачів. Але це змінюється з появою широкого спектру сценаріїв 5G та нових ринкових можливостей. Відродився інтерес до використання мегагруп низькоорбітальних супутників для забезпечення зв'язку із космосу. Деякі нові групи, такі як OneWeb, Starlink, AST SpaceMobile, Amazon Kuiper та TeleSat, запланували запустити сотні чи тисячі космічних апаратів для забезпечення глобального зв'язку, доповнюючи наявні наземні мережеві інфраструктури. Дизайн цих нових мегагруп визначається цільовим сценарієм використання та ринковим сегментом. Відповідно до доступного спектру, виділеного рухомим супутниковим службам нижче 6 ГГц, супутникова система LEO буде в основному орієнтована на

пристрої та послуги Інтернету речей (IoT) з низькою та середньою швидкістю передачі даних безпосередньо на портативні термінали. Що стосується супутникового спектру на більш високих частотах (наприклад, діапазони Ku/Ka), нові супутникові групи LEO будуть зосереджені на широкосмуговому зв'язку з досконалішими пристроями, такими як VSAT або ESIM.

Рівень технологічної готовності (TRL) досить високий багатьох чинників технологічної підтримки. Фактично більше 1600 супутників Starlink вже знаходяться на орбіті НГО. Найважливішим аспектом технологій, які підходять для використання у космосі, є TRL для конкретних проектних вимог. Наприклад, тепер доступні технології бортових активних антен, які встановлені на супутнику Starlink та мають індивідуально налаштовані керовані промені. Кількість променів у супутнику Starlink може варіюватися від 8 до 32. Однак для подальших мегазірок на НГО можуть знадобитися масиви більшого розміру або більше антенних елементів, що вимагатиме подальшої оптимізації та інтеграції в корисне навантаження. Деякі з ключових технологічних аспектів пов'язані з наданням нових придатних для використання в космосі радіочастотних (RF) та мікрохвильових компонентів, таких як високопродуктивні підсилювачі потужності на основі технологій нітриду галію (GaN) та кремній-германію (SiGe), тобто забезпечення економічної інтеграції радіочастотних структур. Інші передові методи, такі як повністю цифрове формування променя та схеми перемикування променя, також є важливими факторами, які слід враховувати при оптимізації конструкції корисного навантаження супутника на основі потужності, маси та доступного бюджету витрат для конкретної цільової послуги та попиту на трафік.

Архітектура корисного навантаження наступного покоління використовуватиме активні антени та вбудовані цифрові процесори для забезпечення високої динамічної гнучкості для зміни несучих частот, смуги

пропускання для кожного несучого, виділеної потужності для кожного променя і навіть майже миттєвих змін компонування променя, а також стрибкоподібної перебудови. Це означає, що система управління радіоресурсами повинна мати справу з багатьма ступенями свободи в дуже обмеженому середовищі, щоб знайти найкращий розподіл ресурсів на системному рівні. Зверніть увагу, що через динамізм системи із супутниками, що рухаються щодо землі та один одного, кожену схему розподілу необхідно перераховувати майже щоразу. Відповідні алгоритми управління радіоресурсами є ключовими чинниками забезпечення ефективності угруповання LEO.

Основні проблеми з доступом до супутників на LEO пов'язані зі швидким переміщенням супутників на LEO, що призводить до затримок поширення, що змінюються в часі, великих доплерівських зрушень, які змінюються в часі, і певних типів сот (квазіземні фіксовані або земні стільники). У цьому розділі ми обговорюємо ключові рішення щодо цих проблем.

Для початку ми підсумовуємо зразкові параметри для супутників LEO, що працюють у діапазоні S (тобто 2 ГГц) на висоті 600 км. Очевидно, що портативні супутникові UE на LEO (наприклад, смартфони) мають відносно високі значення ефективної щільності ізотропно-випромінюваної потужності (EIRP) та відношення посилення антени до шумової температури (G/T). Навпаки, супутник LEO, який орієнтований підключення до Інтернету речей, може бути менш потужним.

Особливості організації доступу до супутникової мережі. Швидкий рух супутника низькою навколореземною орбітою на висоті 600 км може призвести до сильного доплерівського зсуву на 24 ppm (тобто ± 48 кГц на несучій частоті 2 ГГц). Доплерівське зрушення вище, ніж типова початкова помилка генератора UE, яка становить близько 10 ppm. Помилка частоти, що спостерігається UE в низхідній лінії зв'язку, є комбінацією доплерівського зсуву та зсуву частоти

(через розбіжність кварцового генератора). UE може приймати тимчасову та частотну синхронізацію у низхідній лінії зв'язку з використанням сигналів синхронізації, незважаючи на сукупну помилку частоти. Однак UE в одній і тій же соті можуть налаштовувати свої місцеві опорні частоти різні частоти через різних доплерівських зрушень. Якщо частота сигналу низхідної лінії зв'язку використовується як опорна частота для передачі по висхідній лінії зв'язку, сигнали висхідної лінії зв'язку різних UE будуть зсунуті по частоті в приймаючому мережному вузлі.

Супутникову орбіту можна повністю описати за допомогою шести параметрів у різних уявленнях: кут місця (кут піднесення) як кут BND між напрямком на супутник BN і проекцією ND цього напрямку на площину, що стосується поверхні Землі, а азимут - як кут між напрямком на північ N_x і проекцією ND напряму на ШСЗ на дотичну площину. Положення точки N на земній поверхні характеризують її довготою IN кутом між площиною Грінвічського меридіана та площиною меридіана, що проходить через N та широтою $j N$ – кутом між радіусом ON та площиною екватора (рис.1.1). При відомих положеннях і швидкостях супутника та UE UE може визначати доплерівські зрушення низхідної лінії зв'язку та висхідної лінії зв'язку та затримувати поширення службової лінії зв'язку.

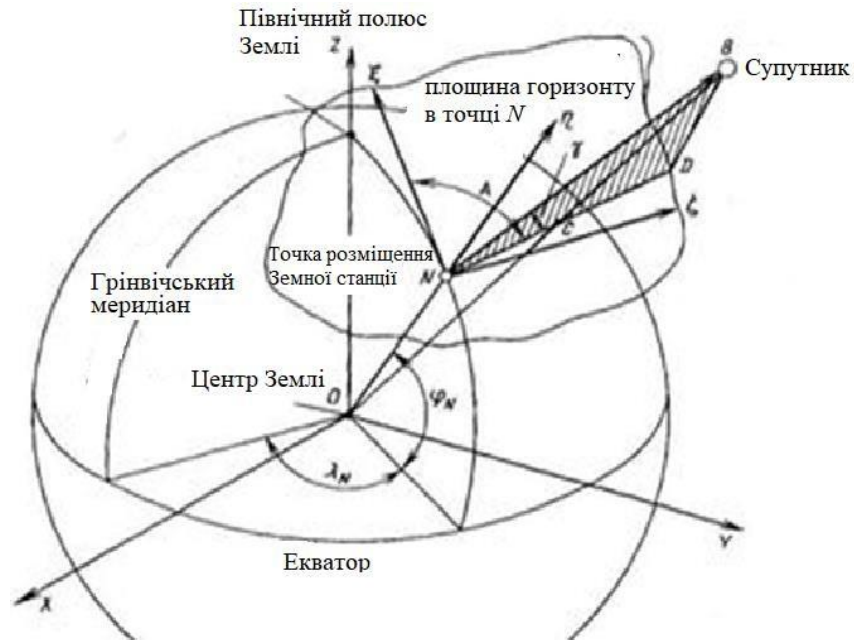


Рис.1.2. Геоцентрична і топоцентрична системи координат для визначення положення супутника

На основі оцінок перед початковим доступом UE може налаштувати свою частоту висхідної лінії зв'язку і застосувати синхронізацію висхідної лінії зв'язку, що допомагає досягти ортогональності множинного доступу висхідної лінії зв'язку. Рух обслуговуючого супутника LEO вимагає, щоб UE безперервно відстежувало необхідне тимчасове випередження та керування частотою. Для супутника LEO, націленого на IoT, односторонній дрейф затримки та дрейф доплерівського зсуву можуть становити до 46 мкс та 641 Гц/с відповідно (що вище, ніж у портативних UE, націлених на супутник LEO, через більше охоплення променя. площі). Отже, UE необхідно прогнозувати положення та швидкість супутника, затримку поширення та доплерівські зрушення під час, відмінне від еталонного часу, пов'язаного з ефемеридами супутника. Прогноз,

заснований на розрахунку траєкторії супутника, зазвичай погіршується зі збільшенням віку даних ефемерид, що використовуються з різних причин, включаючи опір атмосфери, маневрування супутника, недосконалість використовуваних орбітальних моделей і т.д. режим підключення. Резервна мобільність включає вибір і повторний вибір стільника, відстеження і пошуковий виклик, у той час як мобільність зв'язності в основному пов'язана з передачею обслуговування. У наземних мережах стилізатори фіксуються, в той час як UE можуть бути мобільними з різними траєкторіями. Натомість осередки в мережах доступу до супутників LEO переміщуються, що призводить до змін в обслуговуючих осередках UE в діапазоні від декількох секунд (для земних осередків) до декількох хвилин (для фіксованих квазіземних осередків). Це потребує переосмислення процедур управління мобільністю, що використовуються у наземних мережах.

Щоб полегшити управління мобільністю, UE виконує вимірювання обслуговуючих та сусідніх сот. Супутникові осередки LEO рухаються у часі передбачуваним чином, що визначається даними супутникових ефемерид. UE може використовувати ефемеридні дані для прогнозування траєкторії супутників LEO у часі та виконувати вимірювання у відповідний час. Це рішення стандартизовано у 3GPP. На основі результатів вимірювання UE може виконувати вибір та повторний вибір стільника в режимі очікування та повідомляти результати в мережу, щоб допомогти керувати передачею обслуговування у підключеному режимі.

Мережа повинна контролювати UE у режимі очікування, щоб мережа могла швидко пейджингувати UE. З цією метою мережа надає UE список областей відстеження. Якщо UE переміщується до місця, яке не належить до жодної з областей відстеження в цьому списку, воно має повідомити мережу, оновивши область відстеження. У супутниковій мережі доступу LEO із

землерийними стільниками, якщо зони спостереження переміщуються разом із супутниками, фіксоване UE має продовжувати оновлювати зону спостереження в режимі очікування, що призведе до значного навантаження на систему сигналізації. Одним із рішень, стандартизованих у 3GPP, є визначення зон спостереження, які мають бути прикріплені до землі, щоб відокремитися від центрів радіозв'язку.

Супутникова мережа доступу LEO UE у підключеному режимі може потребувати частішої передачі обслуговування. Умовний хендовер може використовуватися для зменшення сигналізації хендовера та підвищення стабільності хендовера. У разі умовної передачі обслуговування мережа відправляє команду передачі обслуговування до UE з умовою. UE зберігає команду та застосовує її, коли умова задовольняється. Потім UE виконує передачу обслуговування та підключається до цільової соті. Більш адаптовані умови передачі обслуговування можуть бути введені в контексті супутникової мережі доступу LEO, як зазначено у 3GPP. Приклади умов можуть використовувати інформацію про місцезнаходження UE, ефемерид супутників і термін служби кожного супутника LEO в конкретній області.

Еволюція телекомунікаційних технологій, постійно зростаючий попит на нові послуги та експоненційне зростання інтелектуальних пристроїв сприяють розвитку неназемних мереж (NTN) як ефективне рішення для доповнення наземних мереж при наданні послуг понад географічних районів, що не обслуговуються або недостатньо обслуговуються.

Відповідно до визначення Партнерського проекту третього покоління (3GPP), NTN - це мережа, в якій космічні (наприклад, GEO, MEO, LEO) або бортові (наприклад, UAS і HAPS) апарати діють або як ретрансляційний вузол, або як базова станція, що дозволяє розрізнити прозору та регенеративну супутникову архітектуру.

Унікальність мереж NTN полягає в тому, що вони можуть запропонувати широку зону покриття, забезпечуючи можливість з'єднання в областях, які є дорогими або важкими для покриття наземними мережами (наприклад, сільські райони, судна, літаки). Таким чином, NTN є розширенням покриття наземної мережі на світовому ринку, де потреби клієнтів радикально змінюються.

Справді, попит різні послуги неухильно зростає через постійно зростаючу кількість пристроїв, підключених до Інтернету.

У звіті Ericsson Mobility Report прогнозується, що до кінця 2024 року використання смартфонів зросте до 45% за рахунок споживання більше 21 ГБ даних на місяць у середньому (приблизно в 4 рази більше, ніж у 2018 році) та генеруючи 95% всього трафіку мобільних даних. У цьому контексті задоволення всіх запитів користувачів та забезпечення бажаної якості обслуговування (QoS) у будь-який час та в будь-якому місці, навіть під час круїзів, високошвидкісних поїздів та літаків є одним з основних завдань для майбутніх телекомунікаційних систем.

Крім надання послуг там, де економічно складно забезпечити покриття наземною мережею (наприклад, на судах, на борту літаків, у сільських та віддалених районах), 5G NTN забезпечує безперервність обслуговування міжмашинної взаємодії (M2M) / Інтернету речей (IoT).) пристроїв або людей, що подорожують на борту платформ, що рухаються, і доступності послуг у разі як критично важливого зв'язку, так і майбутніх передач (тобто морських, авіаційних, залізничних). Крім того, очікується, що 5G NTN стане ефективним рішенням для забезпечення масштабованості мережі за рахунок надання ресурсів багатоадресної / широкомовної передачі для доставки даних на межі мережі та термінали користувача. NTN обіцяє відповідні переваги, що досягаються за рахунок революційної зміни інфраструктури традиційної стільникової мережі завдяки широкому охопленню, масштабованості, безперервності обслуговування

та доступності. Мотивація цієї супутникової отрасли впливає із розвитком десятиліття як промисловістю, так і науковими колами у сфері супутникового зв'язку. Також із зростанням вартості послуг для мереж 5G. Супутниковий зв'язок стає незамінним там, де немає покриття, через неможливість інфраструктури (наприклад, морські сценарії) або там, де є можливість, але не економічна зручність. Друга причина пов'язана з безпекою та відмовостійкістю комунікацій та кризовим управлінням.

На відміну від усіх наземних комунікацій, які потенційно можуть бути перебоями в обслуговуванні через стихійні лиха або атаки, супутникові мережі гарантують безперервність обслуговування у разі критично важливих додатків, які не можуть зазнати ризику збоїв.

Порівняння напрямків дослідження супутникового зв'язку протягом останніх 15 років представлено в Табл.1.1.

Таблиця 1.1

Короткий опис напрямів досліджень в супутниковій галузі

Рік	Напрями досліджень
2006	Дослідження схем передачі обслуговування у супутникових мережах фокусується на: класифікація схем хендовера; порівняння схем хендовера за певними критеріями; рекомендації та напрями майбутніх досліджень з управління передачею обслуговування в супутникових мережах.
2009	Огляд мобільних супутникових систем фокусується на: мережеві архітектури, послуги, стандартизація, операційні системи та питання дослідження; порівняння різних мобільних супутникових систем.
2011	Огляд МІМО у супутникових мережах зосереджений на: Методи на основі МІМО у наземних мережах; МІМО через супутник, характеристики супутникових каналів та напрямки майбутніх досліджень.
2016	Дослідження супутникового зв'язку, що підтримує ІоRT, фокусується на: супутниковий Інтернет речей; Протоколи MAC для сенсорних мереж із маршрутизацією через супутник; ефективна підтримка IPv6 та взаємодія різнорідних мереж; управління якістю обслуговування (QoS) та груповий зв'язок.
2016	Огляд міжсупутникового зв'язку для малих супутникових систем фокусується на: дослідження, які проводяться спільнотю малих супутників; розрахункові параметри міжсупутникового зв'язку; рішення, що дозволяють працювати у малих супутникових системах.

Продовження таблиці 1.1

Короткий опис напрямів досліджень в супутниковій галузі

2016	Огляд сучасного стану конвергенції супутникових та наземних мереж фокусується на: сценарії, технічні завдання та супутні роботи, що стосуються конвергенції супутникової та наземні мережі; функціонал для оптимізації розподілу трафіку; архітектури та відповідні адаптації для підтримки конвергентних супутникових та наземних мереж.
2017	В огляді оптичного зв'язку основна увага приділяється: проблеми, пов'язані з продуктивністю оптичного зв'язку в інтегрованому просторі-земля мережі. методи мінімізації побічних ефектів атмосфери.
2018	Огляд об'єднаних мереж космос-повітря-земля фокусується на: сучасний стан космічних чи повітряних мереж; працює як у мережах космос-земля, і на інтегрованих сегментах космос-повітря-земля; дизайн мережі, розподіл ресурсів, відкриті проблеми та майбутні напрямки в області інтегрований зв'язок космос-повітря-земля.
2019	Обстеження малих супутникових комунікацій та мереж фокусується на: еволюція малих супутників; сценарії, програми, досягнення та розробки малих супутників; аспекти, перспективи та відкриті проблеми, що стосуються малого супутникового зв'язку.
2020	Огляд безпеки фізичного рівня у космічних інформаційних мережах фокусується на: Системи IoST та пов'язані з ними проблеми; моделі супутникових каналів та показники секретності; дослідницька діяльність з фізичної безпеки та можливі майбутні дослідження.

1.2 Інновації у низкоробітальних супутникових угрупованнях

Супутники на низькій навколоземній орбіті були особливістю космічних угруповань від початку освоєння космосу. З початку освоєння космосу низькі навколоземні орбіти на висоті 160-2000 км над поверхнею Землі використовувалися для розміщення супутників. Наприклад, супутники спостереження Землі, стеження та дистанційного зондування використовують низькі навколоземні орбіти для отримання вимірювань поверхні Землі з високою роздільною здатністю. Міжнародна космічна станція (МКС) знаходиться на низькій навколоземній орбіті 400-420 км і знаходиться в постійному зниженні орбіти, вимагаючи повторного запуску кілька разів на рік. Космічний телескоп Хаббла також знаходиться на низькій навколоземній орбіті на висоті 540 км. Супутники зв'язку, які надають послуги супутникового телефонного зв'язку, використовують LEO, наприклад, супутники Iridium, що знаходяться на орбіті близько 780 км, щоб обмежити затримку (час проходження даних між точками зв'язку в обидва кінці) при передачі голосу.

До 1990-х років низькі навколоземні орбіти використовувалися тільки урядовими супутниками для військових та наукових місій, але відтоді вони стали центром комерційного використання. Великомасштабне комерційне розгортання вперше почалося у 1990-х роках, коли кілька компаній, такі як Globalstar, Iridium, Odyssey та Teledesic, спробували забезпечити глобальний зв'язок. Оскільки окремі супутники на низькій навколоземній орбіті покривають обмежений географічний район, угрупованням потрібні сотні або тисячі супутників та наземних станцій для забезпечення надійного глобального покриття, залежно від висоти орбіти над поверхнею Землі. На жаль, попередні масштабні плани було скасовано або скорочено через високі витрати та обмежений попит. З тих пір галузеві аналітики скептично ставляться до життєздатності LEO-сузір'їв (прикладом цього служать

недавні проблеми OneWeb і LeoSat). З початку 2000-х на LEO працюють три угруповання супутників зв'язку: Iridium, Globalstar та Orbcomm (таблиця 1).

Сузір'я на низькій навколоземній орбіті забезпечують фундаментально інші переваги в порівнянні з геостаціонарною орбітою. GEO-супутники розташовані на висоті 35786 км, в результаті чого кожен супутник має дуже широку зону покриття. Це дозволяє їм зосередити свою пропускну здатність на своїй зоні покриття та знижує потребу у досягненні глобального покриття до трьох супутників. Однак через віддаленість від поверхні Землі їх мінімальні пороги затримки високі (приблизно не менше 0,477 секунд для затримки в обидва кінці).

Останнє покоління GEO-супутників, відомих як супутники з високою пропускну здатністю (HTS – High-Throughput Satellite), мають значно більшу (принаймні в 10 разів) пропускну здатність, ніж GEO-супутники попередніх поколінь, у той час як велика затримка (яка є функцією відстані та швидкості світла) залишилась незмінною.

Для порівняння, LEO-угрупованням потрібна мережа супутників для надання інтернет-послуг, тому що кожен LEO-супутник перетинає поверхню Землі, обертаючись навколо планети кожні 88-127 хвилин (залежно від їхньої висоти, від 160 до 2000 км). Їхня ближча відстань до поверхні Землі дозволяє їм надавати високошвидкісний Інтернет з малою затримкою. MEO-супутники розташовуються між орбітами LEO та GEO, обертаючись навколо планети на відстані 2000-35786 км. Ці супутники обробляють високошвидкісний трафік даних із малою затримкою (зокрема backhaul). **Величезна пропускну здатність, яку зможуть запропонувати сузір'я на низькій навколоземній орбіті, перевершить існуючі високопродуктивні супутники на геостаціонарній орбіті.**

Таблиця 1.2

Три супутникові угруповання зв'язку, які працювали на низькій навколоземній орбіті

	Iridium	Globalstar	Orbcomm
Тип послуги супутникового зв'язку	Вузька смуга (GMPCS)	Вузька смуга (GMCS)	Вузька смуга (низька швидкість передачі даних)
Кількість виведених на орбіту супутників	70	24	18
Початок роботи	2001	2001	2001
Виручка за 2016 р. (округлено)	434 дол. США (+5%)	97 дол. США (+7%)	187 дол. США (+5%)
Кількість користувачів під кінець 2016 р. (округлено)	850000 (+9%)	700000	1,7 мільйона (+10%)

Окремі супутники GEO забезпечують пропускну здатність 1-10 Гбіт/с, тоді як діапазон HTS першого покоління становить 10-50 Гбіт/с, а третє покоління (HTS Class III) забезпечує пропускну здатність 150-350 Гбіт/с. Наприклад, супутник Kasific 1 включає 56 окремих променів (Ka-діапазон), кожен з яких має пропускну здатність до 1,25 Гбіт/с (одна з найвищих потужностей сигналу, досягнутих в цій сфері). В наступному поколінні LEO-угруповань, які складають сотні, якщо не тисячі супутників, кожен з яких може передавати десятки (10) Гбіт/с, загальна пропускна спроможність, за прогнозами, виражатиметься однозначно до 10 Тбіт/с, що значно перевищує існуючу ємність, що може надавати GEO (рис. 6). В одному звіті прогнозується збільшення пропускної спроможності супутникового широкосмугового зв'язку з приблизно 2 Тбіт/с наприкінці 2020 року до 20 Тбіт/с до кінця 2021 року та 60 Тбіт/с до кінця десятиліття. В Азії прогнозується різке підвищення попиту на зв'язок, що надаватиметься не-GEO супутниками.

Низька навколоземна орбіта проти геостаціонарної орбіти: розбіжності у цінах на дані абонента можуть бути суттєвими після того, як почнуть надаватись комерційні послуги на низькій навколоземній орбіті. Хоча ціни на оптову смугу пропускання, як правило, не є загальнодоступною інформацією, поява HTS призвела до розходження вартості супутникових послуг, при цьому розцінки на широкосмугове з'єднання падають швидше, ніж на мовлення і поширення. З нещодавнього інтерв'ю на AID & International Development Forum з віце-президентом з глобального стратегічного розвитку бізнесу в YahClick (провідна оператор супутникового широкосмугового зв'язку, що базується в Об'єднаних Арабських Еміратах), та його партнера Hughes: «Середня вартість смуги пропускання становить від 250 до 400 доларів США за Мбіт/с на місяць». Очікується, що в найближче десятиліття оптові тарифи впадуть нижче за 100 доларів за Мбіт/с на місяць, а в 2019 році сталася одна помітна подія, коли в унікальних обставинах вони впали нижче за 50 доларів за Мбіт/с на місяць.

Таблиця 1.3

Порівняння характеристик: геостаціонарна орбіта, середня навколоземна орбіта та низька навколоземна орбіта

Орбіта	Висота	Період обертання	Затримка (в обидві сторони)	Кількість супутників для повного покриття	Ціна супутника	Ефективна тривалість роботи супутника
GEO	35786 км	24 години	~477 мс	3	Приблизно 100-400 мільйонів	15-20 років
MEO	2000-35786 км	127 хв. – 24 години	~27-477 мс	5-30 (в залежності від висоти)	Приблизно 80-100 мільйонів	10-15 років
LEO	160-2000 км	88-127 хв.	~2-27 мс	Сотні або тисячі (в залежності від висоти)	Приблизно 0,5-45 мільйонів	5-10 років

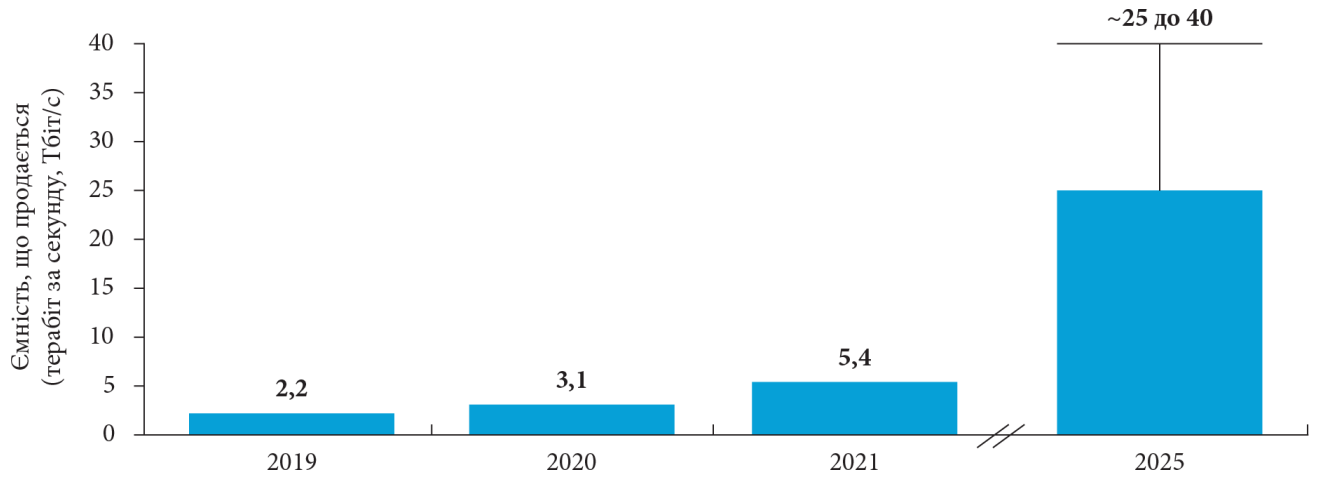


Рис.1.3. Загальна пропускна здатність супутникового зв'язку, що продається, 2019-2025 рр.

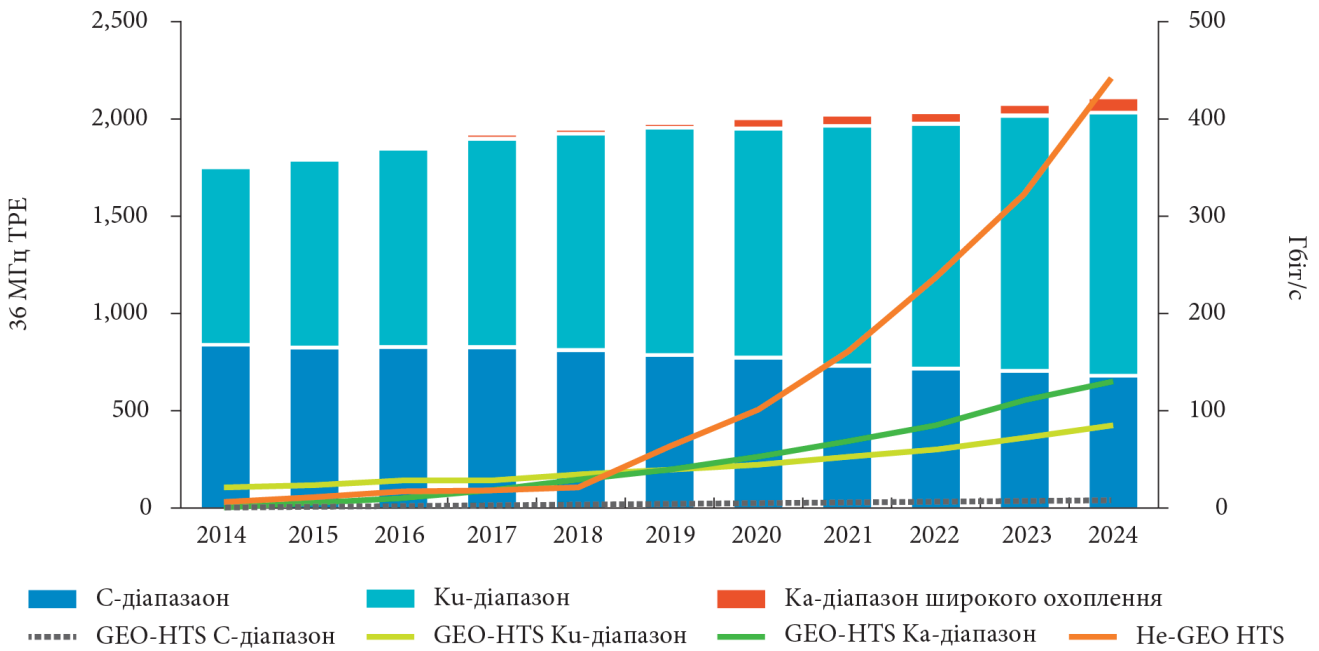


Рис.1.4. Загальний попит на смугу пропускання

Оскільки LEO- та MEO-супутники стають все більш поширеними, очікується, що ці технології забезпечать економічну перевагу порівняно із GEO-супутниками. Оскільки очікується, що LEO-сузір'я забезпечуватимуть ідентичне покриття для зони обслуговування в зоні дії сузір'я, вони можуть запропонувати єдину модель ціноутворення в будь-якій точці світу. У поєднанні з високопродуктивними, короткостроковими (і, отже, конкурентоспроможнішими) контрактами, LEO можуть швидко знизити витрати на супутникову смугу пропускання у всьому світі. Також з'явиться значно більша можливість для регіонального ціноутворення через те, що основні витрати складають авансові інвестиції в угруповання, а окремі супутники можуть обслуговувати лише зону свого поточного розташування.

Одне з нових угруповань на низькоорбітальній орбіті – це служба Starlink від SpaceX, яка є найбільш досконалим у випадку розгортання угрупованням на низькоорбітальній орбіті з точки зору кількості супутників і поточного рівня інтернет-послуг. Starlink розпочав програму загальнодоступних бета-випробувань у жовтні 2020 року для передплатників на півночі Сполучених Штатів (США) та Канаді між 45° та 52° широти з упором на сільські райони (так звана «Better Than Nothing Beta»). Ціна послуги, що пропонується під час публічної бета-версії, становить 99 доларів на місяць для швидкості 50–150 Мбіт/с, затримки 20–40 мілісекунд, плюс одноразова плата за обладнання у розмірі 499 доларів. Обмеження даних ще не введено. Грунтуючись на цих даних, при порівнянні цін за Мбіт/с Starlink оцінюватиметься на рівні 0,50–1,50 долара США/Мбіт/с у порівнянні з діапазоном цін на послуги HTS GEO, показаним у таблиці 2. Важливо, що це порівняння має бути переглянуто, коли стануть доступними комерційні ціни на LEO.

Навіть незважаючи на те, що з роками ціни впали, супутниковий ширококосмуговий зв'язок залишається дорогим у порівнянні з підключенням наземних технологій із тією ж швидкістю. Це особливо актуально для Азіатсько-Тихоокеанського регіону, де провайдерам доводиться мати справу з користувачами,

у яких наявний дохід менше, ніж у користувачів в інших країнах. Система CONNECTme від MEASAT, наприклад, пропонує щомісячний план з післяплатою 25 Мбіт для низхідного та 1 Мбіт/с для висхідного завантаження. щомісячний ліміт даних в 60 ГБ в Малайзії становить майже 48 доларів. Тим часом, Maxis, один з провайдерів широкопугового оптоволокна в країні, пропонує безлімітний тарифний план 100 Мбіт/с для низхідного та 50 Мбіт/с для висхідного завантаження приблизно за 31 долар на місяць за наявності оптоволоконної мережі.

Ринок роздрібного супутникового широкопугового зв'язку в деяких частинах Азіатсько-Тихоокеанського регіону менш розвинений, ніж в інших регіонах, при цьому роздрібні підписки відстають за швидкістю, ціною та розподілом даних. Це проілюстровано в табл. 2, яка містить зведення роздрібних пакетів супутникового широкопугового зв'язку, що пропонуються в різних країнах. У всіх цих варіантах використовуються супутники GEO, які мають високу затримку та обмежену зону покриття.

Таблиця 1.4

Приклади пропозицій роздрібних супутникових послуг (оголошені максимальні швидкості, невиділена або заявлена пропускна спроможність)

Супутниковий оператор	Країна	Місцевий оператор	Швидкість завантаження (вниз)	Швидкість завантаження (вгору)	Обмеження даних	Ціна в міс. (дол. США)	Ціна за Мбіт/с в міс. (дол. США)
SES	Філіппіни	iGSat Satellite Broadband/Delco Telecoms	До 5 Мбіт/с	До 1 Мбіт/с	40 ГБ	276,65	55,33
Thaicom/IPStar	Філіппіни	We are IT Phils. Inc.	До 4 Мбіт/с	До 1 Мбіт/с	Безлімітн.	79,27	19,82
Hughes (JUPITER)	Індонезія	Telkomsat/Mango esky	До 6 Мбіт/с	Н/Д	10 ГБ	50,02	8,67
Hughes	Сполучені Штати	HughesNet	До 25 Мбіт/с	До 3 Мбіт/с	50 ГБ	149,99	6,00
ViaSat	Сполучені Штати	Viasat/Exede	До 25 Мбіт/с	До 3 Мбіт/с	60 ГБ (м'яке обмеження)	100	4,00
MEASAT	Малайзія	CONNECTme	До 25 Мбіт/с	До 1 Мбіт/с	60 ГБ	47,83	1,91
Sky Muster	Австралія	Ipstar/nbn	До 25 Мбіт/с	До 5 Мбіт/с	50 ГБ (в пік) + 50 (не в пік)	47,47	1,90
Eutelsat	Франція	Orange/Nordnet	До 100 Мбіт/с	До 5 Мбіт/с	150 ГБ (пріоритетн./м'яке обмеження)	79,85	0,80

2 ПОРІВНЯННЯ СУПУТНИКОВИХ УГРУПОВАНЬ ЗА РОЗГОРТАННЯМ ТА НАДАННЯМ ПОСЛУГ

2.1 Порівняння угруповань на низькій навколоземній орбіті показує, що Starlink випереджає своїх конкурентів з погляду розгортання та обслуговування

Чотири основні компанії знаходяться в центрі уваги з точки зору розгортання сузір'їв LEO наступного покоління для широкосмугового зв'язку (хоча Європейський Союз, Китайська Народна Республіка та Російська Федерація нещодавно оголосили про створення власних сузір'їв LEO). Ці чотири – Starlink від SpaceX, OneWeb, Lightspeed від Telesat та Project Kuiper від Amazon.

Starlink, безумовно, є найбільш просунутим у розгортанні супутників: 1445 супутників запущено (станом на 7 квітня 2021) на висоті приблизно 550 км над Землею. Оголошене в 2015 році компанією SpaceX, її угруповання призначене для початкового розгортання приблизно 1440 із 260-кілограмових (або 570-фунтових) супутників, щоб почати надавати майже глобальні недорогі послуги підключення до Інтернету зі швидкістю, яка конкурує зі швидкістю технології волоконно-оптичного кабелю до 2021 року. Орієнтовна вартість десятирічного проекту (проектування, будівництво, розгортання) – близько 10 мільярдів доларів. 15 жовтня 2019 року FCC подала заявки в ІТУ від імені SpaceX, щоб організувати спектр для 30 000 додаткових супутників Starlink на додаток до 12 000 супутників Starlink, вже затверджених FCC. Очевидною перевагою SpaceX є здатність до запуску з багаторазовими ракетами, що лідирує в галузі та дозволяє запускати супутники за невелику частину вартості інших постачальників запусків.

Для порівняння, OneWeb займає друге місце за кількістю запущених супутників, маючи на орбіті 146 супутників (станом на 7 квітня 2021). Компанія була заснована в 2012 році, залучила понад 3 мільярди доларів від різних інвесторів (включаючи Softbank), але збанкрутувала в березні 2020 року, пославшись на труднощі із залученням капіталу. Проте OneWeb вийшов із процедури банкрутства, коли уряд Сполученого Королівства придбав 45% акцій за 500 мільйонів доларів у липні 2020 року, а індійська Bharti Global також вклала кошти. У січні 2021 року OneWeb оголосила про додаткове вливання капіталу в розмірі 400 мільйонів доларів від SoftBank та Hughes Network Systems на загальну суму 1,4 мільярда доларів після реструктуризації, яка, за словами OneWeb, профінансує розгортання 648 супутників, запланованих до запуску до кінця 2022 для забезпечення глобального покриття. Засновник Bharti та виконавчий голова OneWeb Суніл Бхарті Міттал вказує, що для завершення першого етапу потрібно від 2,3 до 2,4 млрд доларів.

Канадський Telesat розпочав свою діяльність у 1969 році, маючи багаторічний досвід у галузі супутникового зв'язку. Його плани на LEO розпочалися у 2016 році з оголошення про запуск 120 супутників. У 2018 році був запущений його перший (і єдиний) супутник на низькій навколоземній орбіті, коли почалися випробування, а в 2021 році він оголосив докладну інформацію про сузір'я на низькій навколоземній орбіті під назвою Lightspeed, що складається з 298 супутників. Очікується, що Telesat почне запуск супутників у 2023 році (на ракетах-носіях Amazon Blue Origin), і очікується, що сузір'я коштуватиме 5 мільярдів доларів.

Початківцем у групі є Amazon із її проектом Kuiper, про який було оголошено у 2019 році. У липні 2020 року вона оголосила про заплановані інвестиції у розмірі понад 10 мільярдів доларів, частково підтриманих її компанією Blue Origin, орієнтованих на багаторазові ракети-носії. Проект Kuiper ще не запустив жодного супутника, але отримав схвалення Федеральної комісії зв'язку (FCC) на 3236 супутників, комерційне обслуговування яких розпочинається після виходу 578

супутників на орбіту. Очікується, що Project Kuiper запустить половину своїх супутників до 2026 року, а частину, що залишилася, – до 2029 року. У таблиці 3 показано порівняння розгортань, угруповань та супутників різних компаній. Були оголошені й інші угруповання супутників на LEO, але вони не досягли аналогічних рівнів (запланованого) розгортання, та/або інформація про їхні плани не є загальнодоступною.

2.2 Заплановані істотні зміни у конфігураціях супутникових угруповань.

Три сузір'я з поточним розгортанням (Starlink, OneWeb і Telesat) мають суттєві відмінності у конфігурації та супутниках. Супутники Starlink налаштовані більш низьку висоту орбіти, ніж їхні конкуренти, його остання конфігурація – на висоті до 550 км від землі. Це забезпечить нижчі затримки зв'язку супутник-Земля і Земля-супутник. Спочатку планувалося включити оптичні міжсупутникові канали (OISL), які ще більше скоротять затримку на великих відстанях і забезпечать зв'язок, який теоретично може бути навіть швидшим, ніж по оптоволоконному кабелю (через вакуум у космосі). Однак міжсупутникові канали зв'язку ще не були повністю розгорнуті, і лише деякі із запущених на сьогоднішній день супутників включають технологію OISL.

У групуванні Telesat кожен супутник буде вузлом інтернет-протоколу, причому кожен супутник працюватиме як маршрутизатор, який приймає рішення про те, куди спрямовувати трафік. Більш складна конструкція Telesat допомагає оптимізувати мережеву архітектуру та ефективність, оскільки його супутники обертаються навколо землі на більшій висоті та будуть оснащені OISL.

На відміну від моделі Telesat, OneWeb використовуватиме традиційну архітектуру «вигнутої труби». Сигнали, що йдуть від землі, «повторюватимуться» в інший промінь, що йде вниз, без маршрутизації, що спрощує мережевий компонент

проектування та розробки супутників, але без потенційної вигоди від загальної надмірності мережі та ефективності маршрутизації пакетів даних. Відмінності в орбітах і зоні покриття показані на табл. 2.1, включаючи відмінності в середній та максимальній швидкості передачі даних на супутник.

Таблиця 2.1

Відмінності у розгортанні, угрупованнях та супутниках

Характеристика	SpaceX Starlink	OneWeb	Telesat Lightspeed	Amazon Project Kuiper
Кількість виведених на орбіту LEO-супутників	1445	146	1 (Telesat LEO 1)	0
Величина угруповання для початку роботи	1440	648	298	578
Розрахункова загальна пропускна спроможність на момент початку комерційних операцій	23,7 Тбіт/с	1,56 Тбіт/с	15 Тбіт/с	Невідомо
Заплановане розширення (Загальний розмір майбутнього сузір'я)	12000 (затверджено FCC) до 30000 (подано до FCC)	2000	1600	3236
Частота	Ки-діапазон	Ки-діапазон	Ка-діапазон	Ка-діапазон
Орбіта	560 км	1200 км	1000 км	590-630 км
Вага супутника	227-260 кг	150 кг	800 кг	Невідомо
Тривалість роботи супутника	5-7 років	~5 років	10-12 років	Невідомо
Затримка	<50 мс	<50 мс	<50 мс	Невідомо
Обов'язкові заявлені капітальні витрати	10 мільярдів дол. США	2,4 мільярди дол. США	5 мільярдів дол. США	10 мільярдів дол. США
Цільові ринки	Абонентський широкопуговий доступ, стільниковий backhaul	Backhaul, державний зв'язок, мобільність, широкопуговий доступ	Державна мобільність, вимоги операторського класу	Широкопуговий доступ, backhaul

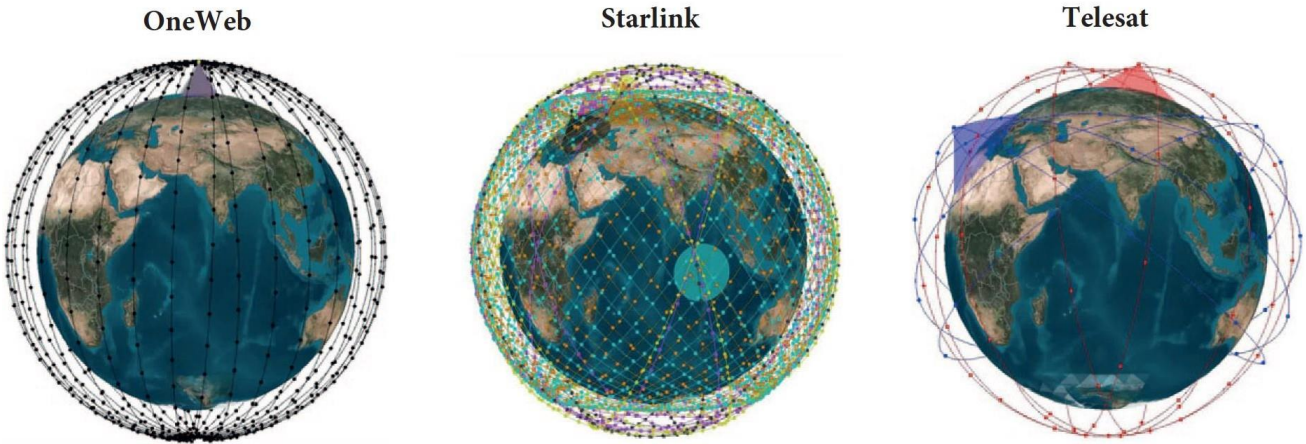


Рис.2.1. Моделі мереж OneWeb, Starlink Telesat

Таблиця 2.2

Відмінності швидкості передачі даних по супутниках

супутник	OneWeb	Starlink	Telesat
Середня швидкість передачі даних	8,80 Гбіт/с	20,12 Гбіт/с	35,65 Гбіт/с
Максимальна швидкість передачі даних	9,97 Гбіт/с	21,36 Гбіт/с	38,68 Гбіт/с

Істотні відмінності у пропускій здатності угруповань на низькій навколоземній орбіті обумовлені розміром угруповань та компонентами наземного сегмента.

За оцінками Массачусетського технологічного інституту (MIT) у 2018 р., загальна пропускна спроможність трьох сузір'їв LEO у поточному розгортанні передбачала, що, хоча кожне із сузір'їв матиме значну пропускную спроможність (кожне більше 1 Тбіт/с), Starlink матиме найбільшу пропускную спроможність – 23,7

Тбіт/с на основі 123 наземних станцій та загалом 4425 супутників, у порівнянні з 2,66 Тбіт/с Telesat з 40 наземними станціями та 117 супутниками та OneWeb з 1,56 Тбіт/с на основі 71 наземної станції та 720 супутників.

Важливо відзначити, що це були оцінки, актуальні більше двох років тому, і це дослідження показало, що пропускна здатність і охоплення кожного угруповання сильно залежать від припущень про розмір угруповання супутників, ефективність супутників і кількість наземних станцій, що демонструють, що Starlink, зокрема, знадобляться значні ресурси для його наземної інфраструктури із сотнями наземних станцій та тисячами шлюзових антен. В останніх оновленнях від LEO-постачальників зазначається, що для Starlink комерційне обслуговування розпочнеться із 1440 супутників, OneWeb із 648 супутників та Telesat – 298 супутників.

Ціноутворення на абонентські термінали на низькій навколоземній орбіті стане областю жорсткої конкуренції за цінами та інноваціями.

Термінали з дуже малою апертурою (VSAT) для обслуговування HTS GEO коштують близько 1000 доларів. Поточна ціна в 499 доларів за термінал Starlink (названий Dishy McFlatface) – це значне зниження ціни. Однак неясно, чи підтримуватиметься цей рівень цін під час комерційного обслуговування, і навіть якщо так, початкові витрати можуть забрати деяких передплатників з ринку, якщо не буде запропоновано будь-якої форми амортизованого фінансування.

Рівень субсидії, яку SpaceX може поглинути на одиницю, невідомий, але галузеві звіти показують, що плоскі антени із фазованими решітками коштують понад 1000 доларів за одиницю. Найдоступніший термінал OneWeb коштує 1200 доларів за одиницю без урахування доставки, податків та інших витрат. Тим не менш, Starlink зможе досягти економії за рахунок масштабу з мільйонами терміналів,

які зрештою будуть потрібні для його глобальної клієнтської бази. Навіть Amazon докладно описав свої інновації у розробці фазованих антенних решіток, відзначивши успіхи у розробці та розробці невеликої 12-дюймової антени.

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 (рис. 9 та 10).

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.

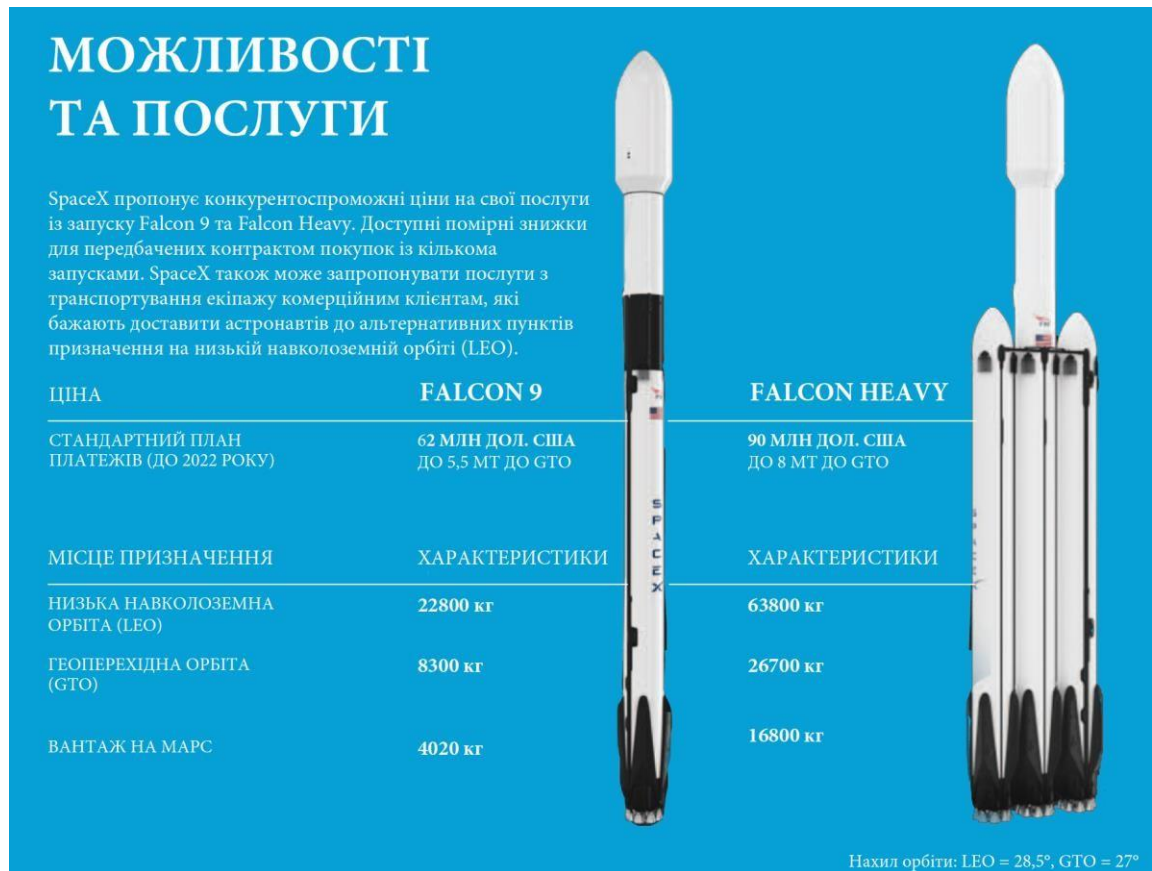


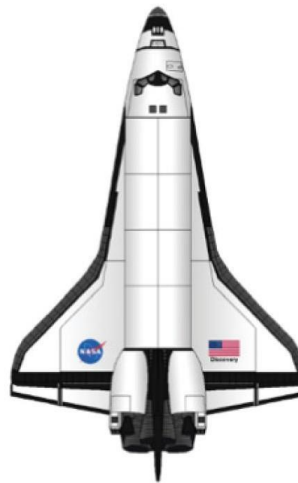
Рис.2.2. Можливості та послуги SpaceX

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.



Dragon 2
SpaceX
Інші



Космічний шатл
United Space Alliance
NASA



Міжпланетна транспортна система
SpaceX
Інші

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 невідключених 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 Порівняння параметрів сузір'я "Starlink" LEO для різних орбітальних оболонок

Спутниково-наземні мережі з інтегрованою зв'язком, які використовуються для глобальних широкополосних послуг, викликали великий інтерес з вченими та промисловими підприємствами у всьому світі. Найбільш зручними конструкціями для такого використання є супутники на низькій окологлобальній орбіті, оскільки вони літають ближче до Землі відповідно до інших орбіт і, відповідно, забезпечують значну меншу затримку, що важливо для надійної та безпечної зв'язку. Серед цих сил - групування супутникового Starlink, розроблена та частково розвинена американська компанія SpaceX. Групу планується організувати в трьох просторових оболонках, яка з них буде складатися з кількох сотен малогабаритних і легких супутників на низькій окологлобальній орбіті, спеціально розроблених для надання широкополосних послуг, з метою забезпечення глобального покриття Землі для обліку їх функціональної сумісності разом з взятими. також з наземними

станціями в складі супутниково-наземної інтегрованої мережі. До 24 жовтня 2020 року 893 супутника знаходяться на орбіті висоти 550 км під різними нахонами, визначаючи першу орбітальну оболонку Starlink. Два наступні покоління плануються розміститися на висотах 1110 і 340 км, щоб забезпечити відповідну інфраструктуру з трьох супутникових оболонок Starlink для забезпечення глобального доступу до послуг широкополосного доступу в Інтернет. Ці три орбітальні оболонки пропонують різні види космосу, видимі з наземної станції (користувача) із-за їх різної висоти, тому в цій статті розглядається кілька параметрів, які описують поведінку супутника, що розглядається з точки зору наземної станції (користувача). Фактично ці параметри виходять з параметрів космічної орбіти і визначаються як: ширина площини горизонту, нахонна дальність, час очікування та зона покриття. Дається порівняння для трьох слоїв орбіти Starlink з виявленням відповідних недоліків і переваг у якості показників ефективності. В кінці ці параметри застосовуються для геометричної інтерпретації та підтвердження процесу обслуговування між супутниками. Цей документ може служити для висвітлення нової проблеми супутниково-наземної інтегрованої мережі, забезпечуючи некоторий теоретичний аналіз і порівнюючи характеристики супутника на різних рівнях орбіти з точки зору наземної станції (користувача). Орбіти на висоті від 300 км до 1400 км над поверхнею Землі визначаються як низькі навколоземні орбіти, а супутники, закріплені цих орбітах, відомі як супутники LEO. Нижній діапазон висот обмежений атмосферою Землі, точніше, рівнем над атмосферою Землі, де майже немає повітря, тому зниження швидкості супутника і гальмування вниз виключаються. Вищий діапазон висот обмежений внутрішнім поясом Ван Аллена. Пояс Ван Аллена відомий як зона космічного випромінювання і небажано впливає на корисне навантаження і платформу супутників (електронні компоненти та сонячні елементи можуть бути пошкоджені цим випромінюванням), тому пояс не слід використовувати для розміщення супутників. Наземна станція - це

місце землі, оснащене відповідним устаткуванням, що використовуватиметься зв'язку з супутником. Зв'язок між супутником і наземною станцією можливий лише тоді, коли супутник стабілізований у своєму власному космічному становищі і видно з наземної станції (користувача).

Крім зв'язку, супутники LEO також застосовуються в наукових та дослідних цілях, зокрема в обставинах, коли наземні засоби не підходять. Динаміка змін клімату, програми дистанційного зондування океанів, різні астрономічні спостереження, записи щільності іонів в іоносфері та дуже специфічні гуманітарні програми, пов'язані з пошуково-рятувальними службами, - ось деякі з видів діяльності, що виконується супутниками LEO, які є надто складними або неможливими для реалізації Землі. Для цієї діяльності всередині супутникових структур встановлюються інструменти або пристрої для відповідної програми або місії. Зазвичай супутники LEO, призначені для наукових цілей або програм дистанційного зондування, розміщуються на спеціально розроблених орбітах, відомих як синхронізовані з Сонцем. Функція сонячної синхронізації дозволяє спостерігати з супутника оброблену область землі за однакових умов освітлення.

Супутники LEO, що використовувалися наприкінці минулого століття, були відомі як мікросупутники через їх легкість та малі розміри. Пізніше наносупутники були розроблені як зручніша структура для процесу запуску, оскільки для запуску таких супутників у космічний слот НОО потрібно менше енергії. Але нещодавно з'явилася нагода запускати наносупутники з Міжнародної космічної станції. У зв'язку з процесом запуску низькі навколоземні орбіти відіграють додаткову роль першої космічної оболонки для супутників на геостаціонарних (геостаціонарних) орбітах завдяки тріступінчастому процесу переходу (відомому як перехід Хомана). Найкоротша відстань від Землі в порівнянні з іншими орбітами і, як наслідок, найменший час затримки роблять супутники LEO дуже зручним обладнанням для створення інтегрованих супутникових та наземних мереж зв'язку. Супутники LEO

рухаються зі швидкістю близько 7,5 км/с щодо фіксованої точки Землі (наземної станції). Період звернення супутників становить 90-110 хв. Тривалість зв'язку між супутником та наземною станцією становить 5-15 хвилин понад 6-8 разів протягом доби. Наприклад, космічний телескоп Хаббла працює на висоті близько 610 км із періодом обігу 97 хвилин. Це передбачає, що у найближчому майбутньому всесвітні ширококутові послуги, що надаються інтегрованими супутниково-наземними комунікаційними мережами, стануть частиною повсякденної діяльності зв'язку, потреби якого швидко зростатимуть, тому оператори повинні ретельно керувати роботою та розподілом послуг у реальному часі. Для збільшення пропускної спроможності низхідної лінії зв'язку, пов'язаної з вимогами ширококутового зв'язку. мінімальних витратах на досягнення основної мети всесвітнього покриття ширококутовими послугами. Серед цих проєктів досягнення всесвітнього ширококутового покриття з використанням невеликих та легких супутників LEO із гнучкою архітектурою корисного навантаження є ключовою метою супутників Starlink LEO.

Супутникові мережі, відповідно до їхньої архітектури в космосі, поділяються на однорівневі (одна оболонка) мережі та багаторівневі мережі. Однорівнева мережа забезпечує зв'язок між супутниками однієї висоти, тоді як багатопшарові мережі забезпечують зв'язок між супутниками у різних оболонках. Багаторівневі мережі складніші, але їх відстоюють через їх гнучкість у забезпеченні більш стійкого глобального покриття, безперебійної передачі обслуговування та надійного зв'язку. Система супутників Starlink LEO організована як багатопшарова мережа із трьох оболонок.

Основний внесок цієї статті полягає у розробці структури, яка підкреслює математично-геометричну кореляцію між ідеальною та спроектованою площиною горизонту для супутникового зв'язку на LEO. Відношення між ідеальною та проєктною шириною площини горизонту визначається та аналізується на предмет

оптимальних значень. Надалі вони застосовуються для інтерпретації та підтвердження процесу передачі обслуговування із сузір'ям LEO з точки зору розташування користувача.

Сузір'я супутників Starlink. Технологічні зусилля зі створення інтегрованої супутниково-наземної мережі розпочалися наприкінці минулого століття, особливо із застосуванням мікросупутників та наносупутників на низькій навколоземній орбіті. Деякі активні супутникові проекти, пов'язані з інтегрованою супутниково-наземною мережею зв'язку, включають угруповання Iridium з 66 супутниками, угруповання OneWeb з 648 супутниками космічних апаратів у сузір'ї Койпера та Telesat з ініціативою створення сузір'я 117 космічних апаратів, але найсерйозніші дії останнім часом робить компанія SpaceX, яка буде доопрацьована.

Планується, що угруповання Starlink складатиметься з тисяч невеликих супутників LEO, розгорнутих у трьох оболонках (шарах), призначених для максимального збільшення широкосмугових інтернет-послуг для глобального покриття Землі, та у поєднанні з наземними станціями (транс-приймачами), які будуть організовані як супутник. -Земна інтегрована мережа.

До 24 жовтня 2020 року SpaceX підтвердила, що 893 супутники розміщені у космосі на низьких орбітах. Усього планується розгорнути близько 12000 супутників та організувати їх у трьох орбітальних оболонках наступним чином.

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

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

Для угруповання супутників LEO як частини супутниково-наземної мережі, що призначена для глобальних широкосмугових послуг, слід використовувати

наземні станції двох типів. Перший - це станція користувача (точка доступу користувача) з відповідною тарілкою і транс-приймачем для блокування / розблокування зв'язку з супутниками. Спочатку користувачі будуть спілкуватися з супутниками під кутом підвищення користувачів 40° , але це можна змінити. Starlink надіслав запит до FCC (Федеральна комісія з зв'язку) на кут піднесення нижніх користувачів 25° , а не 40° , щоб покращити прийом. Для цього супутники обмінюються даними з трьома випробувальними наземними станціями для короткострокових експериментів тривалістю менше 10 хвилин кілька разів на добу. Наземні станції, призначені для управління та експлуатації, зазвичай зв'язуються із супутниками на висоті 10° . До 1 квітня 2020 року Союз зацікавлених вченими (Union of Concerned Scientists, UCS), який веде базу даних активних супутників на орбітах, оголосив загалом 2666 супутників у космосі, з яких 1918 знаходяться на низьких навколоземних орбітах. Завдяки діям, вжитим SpaceX та іншими компаніями, найближчим часом супутники охоплять Землю, що обов'язково вплине на небо і перетворить його. Що стосується перспективи зв'язку, робляться багато зусиль для охоплення Землі супутниками для повсюдних широкосмугових послуг, є дуже гігантським технологічним кроком, але з безліччю проблем, з якими доведеться зіткнутися в майбутньому. Це спростить зв'язок для всесвітніх цілей із будь-якої точки Землі.

Диференціація і важливість Starlink. 1445 запускених супутників Starlink – це, безумовно, найпросунутіший етап розгортання серед усіх угруповань, що знаходяться на низькій навколоземній орбіті. SpaceX – американський виробник аерокосмічної продукції та компанія з надання космічних транспортних послуг, заснована у 2002 році Ілоном Маском, американським підприємцем південноафриканського походження. Маск – серійний підприємець, який заснував та продав кілька компаній, у тому числі PayPal. Маск також заснував Tesla Motors у

2003 році. SpaceX зі штаб-квартирою в Хоторні, Каліфорнія, досягла низки важливих результатів у сфері космічних польотів, включаючи першу приватну компанію, яка запустила на орбіту ракету на рідкому паливі (Falcon 1 у 2008 році); успішний запуск, виведення на орбіту та відновлення космічного корабля («Дракон» у 2010 році); відправлення космічного корабля на МКС («Дракон» у 2012 році); запуск об'єкту на орбіту навколо Сонця (корисне навантаження – Tesla Roadster в Falcon Heavy у 2018 році); і відправлення астронавтів на орбіту та на МКС (місії SpaceX Crew Dragon Demo-2 та SpaceX Crew-1 у 2020 році).

SpaceX була першою, хто продемонстрував вертикальний зліт та вертикальну рухову посадку для орбітальної ракети (Falcon 9 у 2015 році) та перше повторне використання орбітальної ракети (Falcon 9 у 2017 році). SpaceX виконала 20 місій з доставки вантажів на МКС в рамках партнерства з Національним управлінням з авіонавтики та дослідження космічного простору (National Aeronautics and Space Administration – NASA), а також 2 березня 2019 продемонструвала безпілотний демонстраційний політ космічного корабля Dragon 2 (команда Demo-1) і перший пілотований політ Dragon 2 30 травня 2020 року. Станом на початок 2021 року SpaceX має контракти на мільярди доларів на запуск супутників та місій NASA.

Покриття Starlink в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні до 2022 року. У той час як поточна публічна бета-версія Starlink обслуговує клієнтів на півночі США та Канади між широтами 45° та 52° , очікується, що до початку 2021 року послуга буде розширена до широти 33° , а потім до повного екваторіального покриття з середини до кінця 2021 року. Комерційні операції вже почалися Австралії та Новій Зеландії з упором створення земних станцій. Зверніть увагу, що комерційні операції можуть розпочатися після виведення на орбіту 1440 супутників, але загальнодоступні розрахунки пропускної спроможності ширококутового зв'язку засновані на оцінці

угруповання в 4425 супутників, що робить невизначеними часові рамки для покриття та пропускної спроможності в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні.

Фінансова життєздатність проекту Starlink. Поточна структура цін на публічну бета-версію Starlink (99 доларів на місяць) передбачає високий потенціал прибутку від дискретної бази передплатників. Ще до початку комерційного обслуговування Starlink отримала від FCC контракт на суму 885 мільйонів доларів у грудні 2020 року на надання послуг широкосмугового доступу в Інтернет у 642 000 населених пунктах. Згідно з аналізом Morgan Stanley, виручка Starlink становитиме від 20 до 30 мільярдів доларів протягом 7-10 років з моменту початку комерційної виручки. При поточному рівні цін на бета-версію такі прогнози доходів вимагатимуть приблизно 25 мільйонів передплатників у всіх частинах світу, де Starlink матиме можливість надання послуг. Для порівняння, один тільки американський провайдер оптоволоконного кабелю Comcast у першому кварталі 2020 року мав 26,9 мільйона абонентів високошвидкісного інтернету в домашніх умовах. Очікується, що об'єднані потоки доходів (супутниковий широкосмуговий зв'язок та запуск із космосу) перетворять SpaceX на компанію вартістю понад 100 мільярдів доларів.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОСМІЧНОЇ ОРБИТИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС ХЕНДОВЕРА МІЖ СУПУТНИКАМИ LEO

Хендовер (англ. Handover) - в стільникового зв'язку процес передачі сесії абонента від однієї базової станції до іншої. В супутникового зв'язку процес передачі контролю над супутником від одного науково-вимірювального пункту до іншого без порушення і втрати обслуговування.

36.1 **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:

$$r = H + R_E \quad (3.1)$$

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

$$v = \sqrt{\mu/r}, \quad (3.2)$$

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

Період обертання супутника виражається як:

$$T = 2\pi \sqrt{r^3/\mu}, \quad (3.3)$$

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 3.1

Параметри супутників LEO на різних орбітах

Parameters	The first shell $H = 550$ km	The second shell $H = 1110$ km	The third shell $H = 340$ 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.3.1.

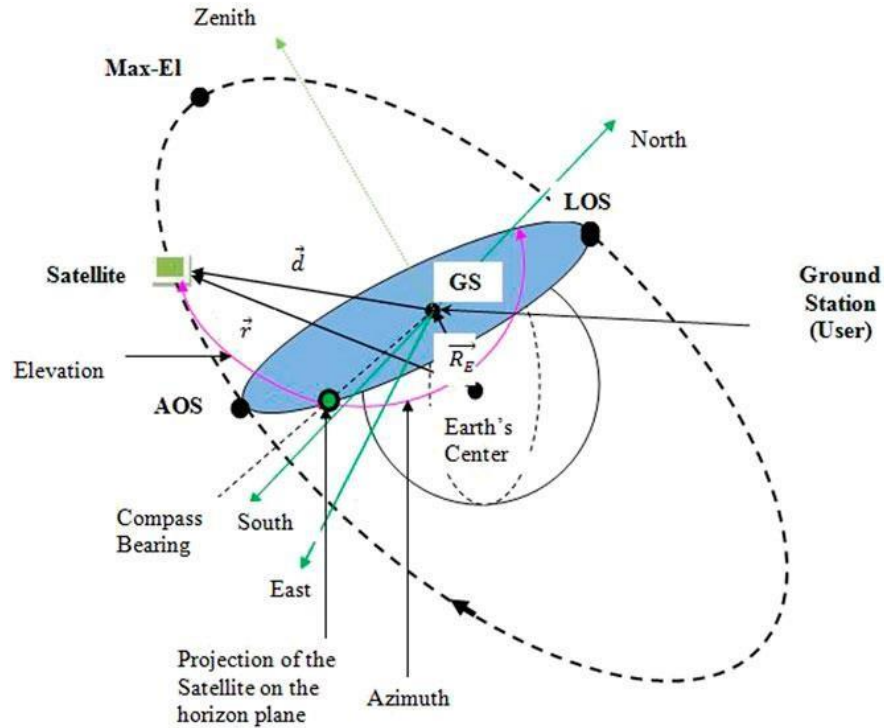


Рис.3.1. Геометричні параметри, що характеризують положення супутника із космосу відносно наземної станції

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. Азімут – це кут напруму на супутник, виміряний у площині горизонту від географічної півночі за годинниковою стрілкою в діапазоні від 0° до 360° .

Піднесення – це кут між супутником та горизонтальною площиною користувача (наземної станції) в діапазоні від 0° 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.

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-El) 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-El і LOS.

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

36.2 Ідеальна та спроектована горизонтальна площина

Події AOS (захоплення супутника, англ. Acquisition of the Satellite) та LOS (втрати сигналу від супутника) на куті елевації супутника в 0° географічно визначають ідеальну площину горизонту (рис.3.2).

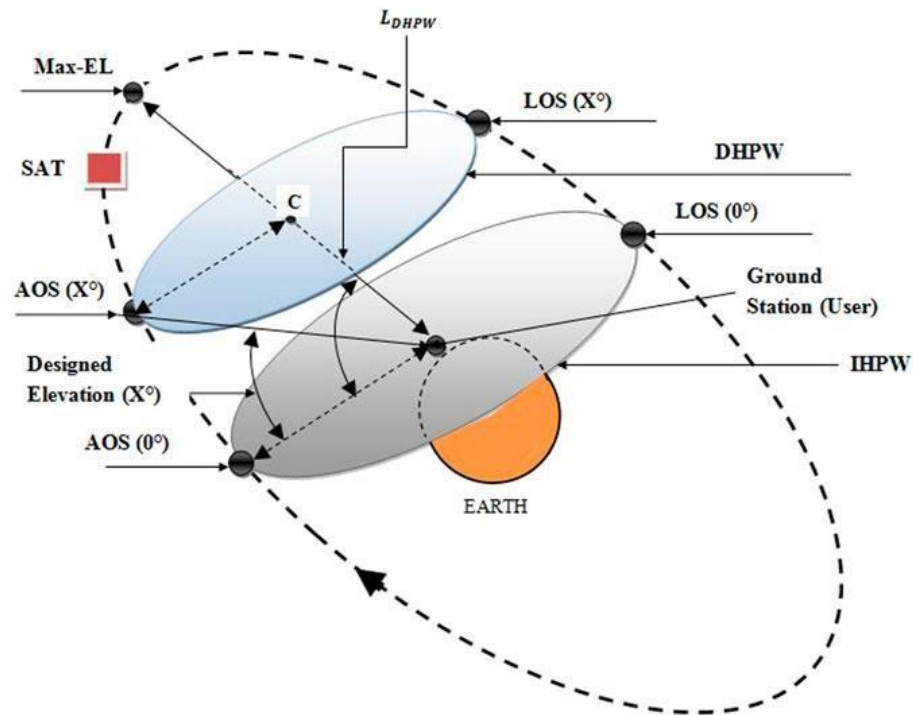


Рис.3.2. Представлення ідеальної і спроектованої площин горизонту

Перша подія ідентифікує випадок, коли супутник з'являється тільки в площині горизонту для захоплення та зв'язку з наземною станцією (користувачем), а друга - випадок, коли супутник просто зникає з площини горизонту, розблокується та відключає зв'язок із наземною станцією (користувачем). наземна станція

(користувач). Віртуальна лінія, що з'єднує точки в космосі, коли AOS та LOS відбуваються на куті елевації 0° , визначають ідеальну ширину площини горизонту (IHPW, англ. ideal horizon plane wideness), що представлена на рис.3.2. Ширина площини горизонту залежить від висоти орбіти супутника.

Ідеальна площина горизонту насправді являє собою область видимості під 0° кута місця. Але зазвичай через різні бар'єри (природні чи штучні) ця область видимості могла бути прихована, і, отже, не можна було заблокувати/розблокувати зв'язок між супутником і користувачем. Щоб уникнути проблеми з такими перешкодами, оскільки область видимості могла бути прихована, конструктори заздалегідь визначають найнижчу висоту площини горизонту для безпечного зв'язку, яка буде заблокована/розблокована.

Площина горизонту з відповідною проектною висотою (X°) вважається проектною площиною горизонту з її проектною шириною площини горизонту (DHPW, англ. designed horizon plane wideness). Зазвичай розрахована ширина площини горизонту завжди коротша за ідеальну ширину площини горизонту. IHPW і DHPW наведені на рис.3.2. Для цілей зв'язку, щоб забезпечити безпечний і надійний зв'язок між користувачами і супутниками, кут місця проектованої площини горизонту ще вище. Наприклад, сузір'я OneWeb застосовується висота кута елевації для проектованої площини горизонту 55° відносно станцій користувачів.

Starlink для першої оболонки супутників (шар на висоті 550 км) застосовує для користувачів кут підйому для проектованої площини горизонту в 40° елевації з тенденцією змінити його або застосувати для інших супутників на кут піднесення 25° для користувачів. Через це для подальшого моделювання та аналізу підняття проектованої площини горизонту для користувачів обробляється від 25° до 40° з кроком по 5° .

36.3 Похила відстань та затримка сигналу

На рис.3.1 показаний трикутник, що описує супутник, наземну станцію та центр Землі. Дальність зв'язку математично задається як:

$$d = R_E \sqrt{\left(\frac{H + R_E}{R_E}\right)^2 - \cos^2 \varepsilon_0} - \sin \varepsilon_0, \quad (3.4)$$

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

$$\sin \varepsilon_0 = \frac{H(H + R_E) - d^2}{2dR_E} \quad (3.5)$$

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

$$d_{\max} = d(\varepsilon_0 = 0) = \sqrt{H(H + 2R_E)} \quad (3.6)$$

Відстань d_{\max} під найменшим можливим кутом місця $\varepsilon_0=0$ являє собою максимально можливу відстань між наземною станцією (користувачем) і супутником висоти H , і, отже, найгірший випадок бюджету лінії. Виходячи з наведеного вище обговорення, пов'язаного з рис.3.2, ця відстань фактично представляє відстань між наземною станцією (користувачем) і точкою в просторі події AOS (Отримання супутника) або LOS (Втрата супутника) при $\varepsilon_0=0$, оскільки AOS і LOS симетрично пов'язані з наземною станцією (користувачем). Математично можна виразити як:

$$d_{\max} = d_{AOS} = d_{LOS} \quad (3.7)$$

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

$$IHPW = d_{AOS} = d_{LOS} \quad (3.8)$$

$$IHPW = 2d_{\max} = 2d(\varepsilon_0 = 0) = 2\sqrt{H(H + 2R_E)} \quad (3.9)$$

показаний на рис.3.2, позначений як IHPW.

Мінімальна відстань між супутником і наземною станцією відбувається в разі Max-El (Максимального кута елевації ε_0), тоді:

$$d_{\min}(\varepsilon_0 = \text{MaxEL}) = R_E \left[\sqrt{\left(\frac{H + R_E}{R_E}\right) - \cos^2 \text{MaxEL}} - \sin \text{MaxEL} \right], \quad (3.10)$$

$$d_{\min}(\varepsilon_0 = \text{MaxEL}) = 90^\circ = H. \quad (3.11)$$

Тепер припустимо, що проєктована площина горизонту визначається найнижчою висотою $\varepsilon_{0D} = X^\circ$ (ε_{0D} — доданий індекс D вказуємо «розрахованим») (рис. 3.2). Для сузір'я супутників Starlink, для першої оболонки (шар на висоті 550 км), застосовується під кутом місця для проєктованої площини горизонту 40° для користувачів, але оскільки вона може бути змінена, для подальшої аналітичної розробки вважається $X = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$. З рівняння (3.4) максимальна відстань між супутником і наземною станцією (користувачем) для $\varepsilon_{0D} = X^\circ$ може бути отримана:

$$d_{\min}(X^\circ) = d(\varepsilon_{0D} = X^\circ) \quad (3.12)$$

Рух супутника в межах його власної орбіти, пов'язаної з спроектованою площиною горизонту при $\varepsilon_{0D} = X^\circ$, інтерпретується на рис.3.2. Супутник з'являється на ідеальному горизонті через подію AOS (0°) (отримання супутника), але не заблоковано з наземною станцією (користувачем) до моменту події AOS (X°) на висоті $\varepsilon_{0D} = X^\circ$, коли вона заблокована з наземною станцією (користувачем) та з нахилом діапазону $d_{\max}(X^\circ)$ (для цього випадку, максимальна дальність досягається при проєктному X°). Таким чином, немає блокування (немає зв'язку) між супутником і користувачем від події AOS (0°) до події AOS (X°). Блокування встановлено тільки в AOS (X°). Далі, супутник летить вище до події максимального висоти при $\varepsilon_0 = \text{MaxEl}$, досягаючи похилої дальності d_{\min} , а потім обертається вниз до події LOS (X°) на висоті $\varepsilon_{0D} = X^\circ$, маючи знову похилу відстань $d_{\max}(X^\circ)$,

розблокований з наземної станції (користувач), і все ще літає над наземною станцією (користувач), але без комунікації доки супутник не зникне під час події LOS (0°). Це цикл зв'язку між супутником і наземною станцією (користувачем). Слід підкреслити, що діапазон нахилу d_{\min} залишається незмінним, незалежно від проектної висоти, і виражається рівнянням (3.10), оскільки користувач не змінює своє положення за проектною висотою, тільки спроектована площина горизонту рухається вгору, залишаючись завжди паралельною ідеальній площині горизонту.

Таким чином, лінія, що з'єднує AOS (X°) і LOS (X°), представляє проектну ширину площини горизонту (DHPW), наведену на рис.3.2 і математично виражену як:

$$DHPW = d_{AOS(X)} = d_{LOS(X)} \quad (3.13)$$

де $d_{AOS(X)}$ і $d_{LOS(X)}$ вимірюються відносно точки С на рис.3.2. Точка С є проекцією абонентської станції на площину спроектованого горизонту.

Подальший крок – проаналізувати, яка ширина площини горизонту в порівнянні з ідеальною та наскільки вони віддалені один від одного. Дивлячись з наземної станції (користувач), спроектована ширина площини горизонту (DHPW) є основою віртуального верхнього конуса з вершиною точно на наземній станції (користувач). Розрахована ширина площини горизонту (DHPW) насправді є діаметром основи відповідного віртуального конуса. Розв'язання трикутної наземної станції (користувач) — AOS (X°) — центр DHPW (С) на рис.3.2, виходить як:

$$DHPW = 2d_{AOS(X)} = 2d(\epsilon_{0D} = X^\circ) \sin(90 - X) = 2d(\epsilon_{0D} = X^\circ) \cos X \quad (3.14)$$

Позначаючи LDHPW як паралельну відстань проектованої площини горизонту від ідеальної (рис.3.2), від того самого трикутника, який показує, що LDHPW дорівнює:

$$LHPW = 2d(\epsilon_{0D} = X^\circ) \cos(90 - X) = 2d(\epsilon_{0D} = X^\circ) \sin X \quad (3.15)$$

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

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

$$\tau_{\min}(\text{зв'язуючи з } d_{\min}) < \tau < \tau_{\max}(\text{зв'язуючи з } d_{\max}) \quad (3.16)$$

На основі рівняння 3.6 та враховуючи швидкість світла $c=3,00,000$ км/с, у Табл.3.2 наведено односторонню затримку часу, пов'язану з відповідними максимальними відстанями, при різному проектному висоті для всіх трьох снарядів Starlink.

Таблиця 3.2

Максимальна відстань і затримка одностороннього сигналу для різних висот орбіт супутників

The designed horizon plane elevation (ϵ_{0D})	The first shell $H = 550$ km		The second shell $H = 1110$ km		The third shell $H = 340$ km	
	d_{\max} (km)	τ (ms)	d_{\max} (km)	τ (ms)	d_{\max} (km)	τ (ms)
25°	1,128.7	3.76	2066.3	6.88	730.5	2.43
30°	992.2	3.31	1863.3	6.21	631.8	2.10
35°	894.7	2.98	1706.4	5.68	565.8	1.90
40°	809.5	2.69	1,569.9	5.23	506.5	1.68

Для трьох висот Starlink $H = 550$ км, 1110 км і 340 км і проектного куту елевації $\epsilon_{0D}=25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ проектованої площини горизонту на місцях користувачів, на основі рівнянь (3.4), (3.8), (3.10), (3.13) та (3.14) IPHW і DPHW розраховані для відповідної висоти орбіти супутників. Далі, вертикальна паралельна відстань (LDPHW) спроектованого (DHPW) пов'язана з ідеальною площиною горизонту (IPHW) на основі рівняння (3.15), що розраховано та наведено в Табл.3.3

Табл.3.2 підтверджує, що час обертання супутника для кожної з оболонок не займе більше 15 мс (на основі другої оболонки) для зв'язку користувача з одним супутником. Для безперервності послуг більше супутників може бути залучено до зв'язку навіть з різних оболонок, додаючи затримку, але в гіршому випадку все одно залишатиметься менше 100 мс, що може вважатися незначним для зв'язку.

Таблиця 3.3

Вертикальна паралельна відстань (L_{DHPW}), спроектована ($DHPW$), пов'язана з ідеальною площиною горизонту ($IHPW$) для різних висот орбіт супутників

The designed horizon plane elevation (ϵ_{0D})	The first shell $H = 550$ km		The second shell $H = 1110$ km		The third shell $H = 340$ km	
	$IHPW$ (km) = 5,405.8		$IHPW$ (km) = 7,833.9 km		$IHPW$ (km) = 4,206.8	
	$DHPW$ (km)	L_{DHPW} (km)	$DHPW$ (km)	L_{DHPW} (km)	$DHPW$ (km)	L_{DHPW} (km)
25°	2045.2	476.3	3,744.1	871.8	1,323.6	308.3
30°	1718.4	496.0	3,226.7	931.5	1,094.3	315.9
35°	1,465.5	512.6	2,795.1	977.7	926.8	324.2
40°	1,240.1	519.7	2,405.1	1,007.8	775.9	325.3

Табл.3.2 підтверджує, що час обертання супутника для кожної з оболонок не займе більше 15 мс (на основі другої оболонки) для зв'язку користувача з одним супутником. Для безперервності послуг більше супутників може бути залучено до зв'язку навіть з різних оболонок, додаючи затримку, але в гіршому випадку все одно залишатиметься менше 100 мс, що може вважатися незначним для зв'язку.

З Табл.3.2 і Табл.3.3 видно, що найбільшу проектну ширину площини горизонту матиме друга оболонка на висотах 1110 км. Серед цих трьох висот найкоротша відстань буде для третього рівня супутників на висоті 340 км, і, отже, буде забезпечувати найменшу затримку сигналу.

Враховуючи останні дані на початок квітня 2021 року, SpaceX запустила 1380 супутників Starlink на першому корпусі на висоті 550 км, які вже перебувають у тестовому режимі та надають послуги користувачам під проєктованим кутом висоти 40°. На рис.3.3 показано параметр, що розраховуються: максимальна нахильна

дальність між користувачем і наземною станцією [d_{\max} (км)], ідеальна площина горизонту з точки зору користувача [IHPW (км)], спроектована площина горизонту під кутом висоти 40° [DHPW (км)] і паралельна відстань між ідеальною та спроектованою площиною горизонту LDHPW (км), що видно з станції користувача.

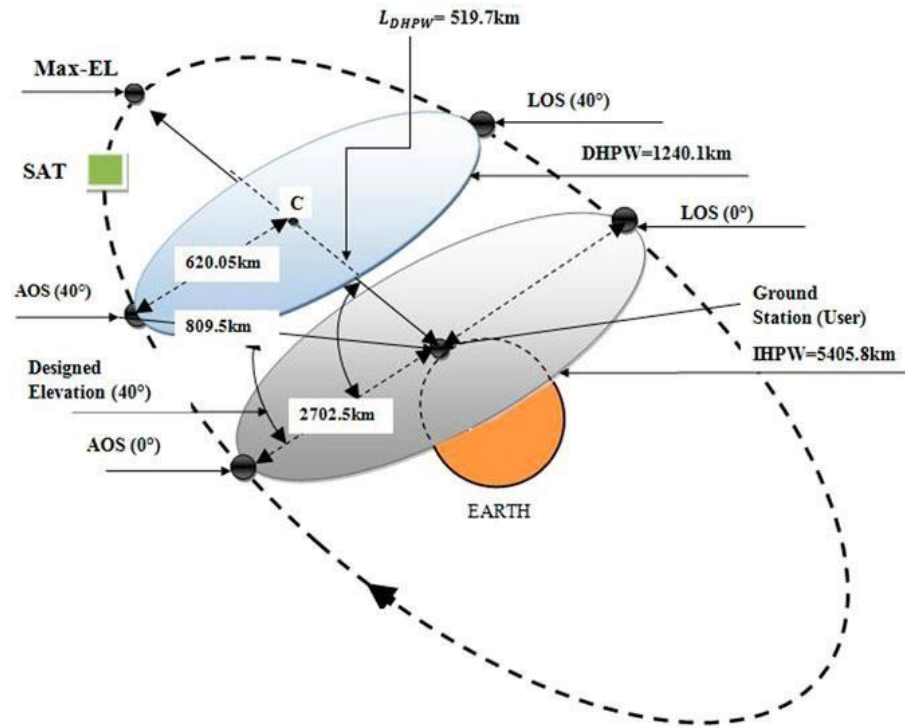


Рис.3.3. Ідеальна площина горизонту з точки зору користувача (IHPW (км)), Спроекована площина горизонту під кутом висоти 40° (DHPW (км)) і паралельна відстань між ідеальною та спроектованою площиною горизонту (L_{DHPW} (км)), що видно з станції користувача, для висоти орбіти супутника $H = 550$ км.

36.4 Зона покриття та ідеальна/запроекована площиною горизонту

Зона покриття окремого супутника — це кругла область на поверхні Землі, звідки супутник можна побачити під кутом місця(елевації). Найбільша зона покриття досягається під кутом висоти 0° . Ідеальна площина горизонту — це віртуальна плоска поверхня, розташована перпендикулярно радіус-вектору Землі (рис.3.1). Проектована площина горизонту паралельна ідеальній, віддаленій від неї

на відстань (L_{DHPW}), що визначається проектним кутом місця. Супутник дивиться вниз на свою зону покриття, щоб користувач був заблокований і спілкувався, а з іншого боку користувач дивиться вгору від власної площини горизонту, щоб супутник був заблокований для зв'язку. У зоні покриття супутника (затінення) кожен користувач має свою власну ідеальну/спроєктовану площину горизонту, тому кожен користувач на землі має різні шляхи зв'язку з одним супутником.

Зона покриття супутника на Землі визначається параметрами орбіти. Змодельована зона покриття на основі орбітальних параметрів супутника LEO наведена на рис.3.4. Користувач на землі заблокований із супутником LEO, оскільки він знаходиться під зоною покриття (затінення супутником).



Рис.3.4. Змодельована зона покриття супутника LEO

Для цілей моделювання та інтерпретації покриття наведено ще чотири основні точки зв'язку (BC), як BC_1 , BC_2 , BC_3 та BC_4 . У випадку, представленою на рис.3.4, лише два з них (BC_1 і BC_4) можуть бути заблоковані з супутником, оскільки вони знаходяться в зоні дії супутника, а два інших (BC_2 і BC_3) знаходяться поза зоною дії, тому зв'язок неможливий. Це означає, що BC_1 і BC_4 можуть спілкуватися один з одним через супутник, але не з BC_2 і BC_3 , оскільки останні недоступні для супутника.

Це відомо як зв'язок у зоні покриття (затінення) або як індивідуальне супутникове покриття. У міру того, як супутник рухається вниз на своїй орбіті, зона покриття також рухається вертикально, залишаючи наземну станцію і дві базові станції (BC_1 , BC_4) поза зоною впливу і, як наслідок, втрачаючи зв'язок.

Останнім часом супутникові послуги були орієнтовані на глобальне покриття. Глобальне супутникове покриття можна розглядати як взаємосумісний додатковий мережевий процес кількох супутників, організованих у сузір'я, кожен з яких робить внесок зі своїм індивідуальним покриттям.

Далі припустимо, що другий супутник LEO з такою ж висотою обертається навколо Землі на рис.3.4 Оскільки обидва мають однакову висоту, розміри площі супутника однакові, лише охоплюють різні зони. Припустимо, що зони покриття сусідні, тому другий супутник покриває основні точки зв'язку BC_2 і BC_3 . Це означає, що BC_2 і BC_3 можуть спілкуватися один з одним через другий супутник, але не з BC_1 і BC_4 , оскільки останні недоступні для другого супутника. Якщо перший і другий супутники можуть спілкуватися один з одним, ці супутники забезпечать зв'язок між усіма чотирма основними точками зв'язку. Це взаємодоповнюваний процес двох супутників, які забезпечують зв'язок у двох зонах покриття. Ця концепція, крок за кроком, додаючи більше супутників, забезпечує глобальне покриття. Супутники LEO, організовані в сузір'я, діють як зручне мережеве рішення для глобального покриття в реальному часі.

Прагнення досягти повного покриття супутниками LEO сузір'я Starlink стало дуже привабливим для дослідників. Цього можна досягти, оскільки супутники LEO рухаються вертикально разом із зоною їх покриття, але в той же час, коли Земля обертається навколо своєї осі N-S, зона покриття також практично рухається горизонтально. Таким чином, кожен окремий супутник сузір'я вносить свій внесок у глобальне покриття, створене сумісністю всіх із них. До глобального покриття стоїть дуже складний процес моделювання для оптимізації покриття та надійного

зв'язку. Основною проблемою для глобального покриття є процес міжсупутникової передачі. Зона покриття супутника визначається як частка поверхні Землі і зазвичай виражається у відсотках. Концепція зони покриття наведена на рис.3.5, де зображено два трикутники.

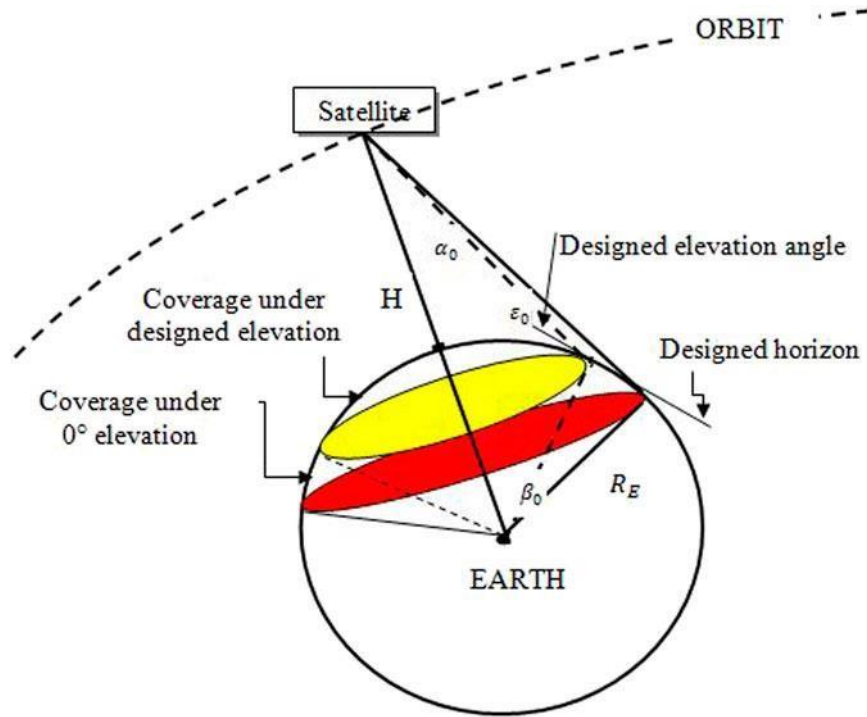


Рис.3.5. Концепція зони покриття супутником

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

$$\varepsilon_0 + \alpha_0 + \beta_0 = 90^\circ \quad (3.17)$$

Подальше обчислення виглядає так:

$$\frac{\sin\alpha_0}{R_E} = \frac{\sin(90 + \varepsilon_0)}{R_E + H} \quad (3.18)$$

$$\sin\alpha_0 = \frac{R_E}{R_E + H} \cos\varepsilon_0 \quad (3.19)$$

Повне покриття досягається для $\varepsilon_0=0$, і ця умова визначає найбільший найнижчий кут поширення низхідної лінії супутника, і він становить:

$$\alpha_{0,\max} = \sin^{-1} \left(\frac{R_E}{R_E + H} \right) \quad (3.20)$$

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

$$C(\%) = \frac{S_{SATCOV}}{S_E} \quad (3.21)$$

$$C(\%) = \frac{1}{2}(1 - \cos\beta_0) \quad (3.22)$$

36.5 Розрахунок зони покриття

Для сузір'я Starlink, враховуючи три оболонки на висотах $H = 550$ км, 1110 км і 340 км для повного покриття під кутом пуднесення (елевації) $\varepsilon_0=0$ і для проектної висоти $\varepsilon_{0D}=25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ на основі рівнянь (3.17) і (3.19) кут надиру α_0 ($^\circ$) і центральний кут β_0 ($^\circ$) розраховуються як перший крок для розрахунку покриття для всіх трьох оболонок Starlink. Розраховані дані представлені в Табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Кут надира та центральний кут для різних висот.

The horizon plane elevation (ε_0)	The first shell $H = 550$ km	The second shell $H = 1,110$ km	The third shell $H = 340$ km
	C (%)	C (%)	C (%)
Ideal: 0°	4.003	7.461	2.55
Designed at: 25°	0.560	1.614	0.247
Designed at: 30°	0.394	1.185	0.175
Designed at: 35°	0.283	0.885	0.121
Designed at: 40°	0.206	0.657	0.088

Застосовуючи розраховані дані для $\beta_0(^{\circ})$ і враховуючи три оболонки на висотах $H = 550$ км, 1110 км і 340 км для повного покриття висоти $\varepsilon_0=0$ і для проектної висоти $\varepsilon_{0D}=25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$, на основі рівняння (3.22) і Табл.3.4, відповідне покриття для всіх трьох оболонок Starlink розраховано та представлено в Табл.3.5.

Таблиця 3.5

Покриття супутників Starlink

The horizon plane elevation (ε_0)	The first shell $H = 550$ km	The second shell $H = 1,110$ km	The third shell $H = 340$ km
	C (%)	C (%)	C (%)
Ideal: 0°	4.003	7.461	2.55
Designed at: 25°	0.560	1.614	0.247
Designed at: 30°	0.394	1.185	0.175
Designed at: 35°	0.283	0.885	0.121
Designed at: 40°	0.206	0.657	0.088

Площа Землі становить 510 млн км², таким чином, супутник LEO на висоті 550 км під кутом висоти 40° покриває площу $0,00206 \times 510$ млн км² = $1,05$ млн км² з приблизним радіусом 580 км.

Процес хендровера (передачі-приймання) між супутниками: геометрична інтерпретація та підтвердження.

Крім того, усі вищенаведені обговорення та результати застосовуються для геометричної інтерпретації та підтвердження процесу передачі-приймання (відомого як просто передача) між двома супутниками LEO для досягнення глобального покриття та безперервності послуг у реальному часі.

Для відстеження супутників використовується програмне забезпечення в режимі реального часу, яке живиться елементами Кеплера. Відповідне програмне забезпечення надає інформацію про відстеження в режимі реального часу, яка зазвичай відображається в різних режимах (супутниковий вид, радарна карта, таблична тощо). Режим «радарна карта» також розглядається для передбачуваної геометричної інтерпретації процесу передачі-приймання. Режим «радарна карта» включає точний шлях супутника з наземною станцією, що розглядається в центрі, як показано на рис.3.8.

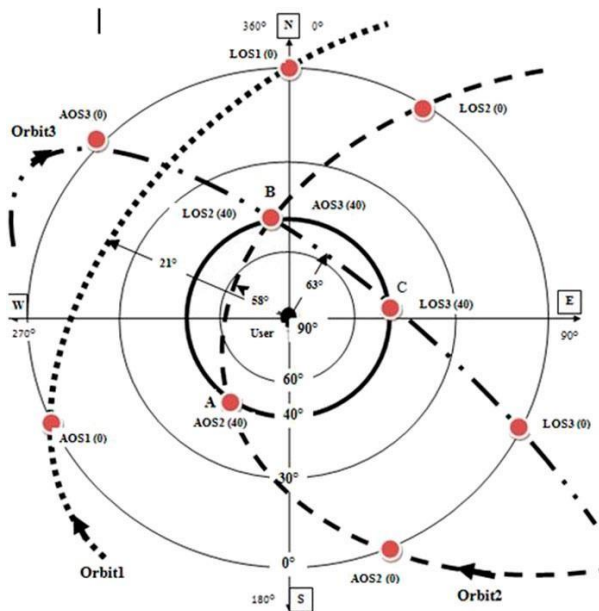


Рис.3.8. Геометрична інтерпретація процесу передачі-приймання між супутниками

Площа кола являє собою горизонтальну площину користувача, з півночі вгори ($Az(\text{азимут}) = 0^\circ, 360^\circ$), потім на схід ($Az = 90^\circ$), південь ($Az = 180^\circ$) та захід ($Az = 270^\circ$). Користувач знаходиться у центрі площини горизонту. Три концентричні кола позначають різні кути піднесення: 0° , 30° та 60° . По центру кут піднесення становить 90° . Площина під кутом 0° є ідеальною площиною горизонту. Більшість параметрів програмного забезпечення, що визначають рух супутника, пов'язаного з користувачем: AOS_{time} – захоплення супутника (час), LOS_{time} – втрати супутника (час), AOS_{Az} – захоплення супутника (азимут), LOS_{Az} – втрати супутника (азимут) та Max El – максимальна висота. Для супутників LEO максимальна висота є основним параметром проходження супутника над станцією користувача і визначає тривалість зв'язку між супутником LEO і відповідною станцією користувача. Площина горизонту із заданою мінімальною висотою вважається площиною горизонту, що проектується. Для супутників Starlink проєктована площина горизонту для користувачів визначається під кутом 40° і представлена у вигляді товстішого чорного кола, позначеного 40° на рис.3.8.

З метою інтерпретації та підтвердження три випадково обрані орбіти позначаються як Орбіта1, Орбіта2 та Орбіта3 разом із відповідними супутниками для кожної з них. Для кожної орбіти дається стрілка, що вказує напрямок руху супутника, якщо дивитися з боку користувача. Користувач знаходиться у центрі. На кожній орбіті визначені точки виявлення супутників (AOS) та втрати супутників (LOS) у космосі. Оскільки це лише геометричний підхід, час як змінна не розглядається. Захоплення і втрата супутників враховуються для ідеальної площини горизонту (0°) і для розрахункової площини горизонту (40°), позначених як AOS (0°), AOS (40°) і LOS (0°), і AOS (40°) відповідно. Ці події у космосі визначаються азимутом та кутом піднесення(елевації). Кожен із трьох проходів визначається своєю максимальною висотою та відповідним азимутом. Для всіх точок, показаних на рис.3.8, координати наведені у Табл.3.6 у вигляді пар азимуту та піднесення [Az° ,

El°]. Значення витягуються та апроксимуються з рис.3.8, оскільки орбіти вибираються випадковим чином.

Табл.3.6

Координати космічних подій супутників

Параметри орбіт	Макс. кут азимуту, елевації, град	AOS (0°), і	AOS (40°)	LOS (40°),	LOS (0°),
Орбіта 1 (550 км)	305, 21	240	Не визнач.	Не визнач.	360, 0
Орбіта 2 (110 км)	310, 58	155	220, 40	345, 40	30, 0
Орбіта 3 (340 км)	30,63	315	345, 40	85, 40	125, 0

Супутник, що летить на орбіті 1, з'являється на ідеальній площині горизонту користувача приблизно під кутом азимуту 240° при 0° висоті, що позначається як подія $AOS_1(0)$. Супутник рухається вище, досягаючи $Max-El$ (максимальний кут елевації) 21° (при $Az = 305^\circ$), а потім опускається до події $LOS_1(0)$ в координатах $[360^\circ, 0^\circ]$ і зникає з ідеального горизонту користувача. Користувач і цей супутник не мали зв'язку, оскільки супутник завжди нижчий за площину горизонту, заплановану користувачем на 40° ($21^\circ < 40^\circ$), і, отже, не заблокований. Таким чином, цей супутник віддаляється непомітно для користувача. Цей факт пояснює NA (не застосовується) результат $AOS(40)$ і $LOS(40)$ для Орбіти 1.

Супутник, що летить по Орбіті 2, з'являється на ідеальній площині горизонту користувача приблизно з азимутом 160° на висоті 0° , позначений як подія $AOS_2(0)$, але не зафіксований користувачем. Супутник рухається вище до події $AOS_2(40)$ за координатами ($Az = 220^\circ, 40^\circ$), де супутник зафіксований з користувачем, встановлюючи зв'язок. Дальність між супутником і користувачем на даний момент становить 809,5 км (Табл. 3.2). Супутник рухається вище до події $Max El$ в координатах азимута ($Az = 310^\circ, 58^\circ$), все ще перебуває в зв'язку з супутником і знаходиться найближче до нього на відстані 641,4 км. Супутник рухається вниз, все ще підтримує зв'язок, до події $LOS_2(40)$ в координатах ($Az = 345^\circ, 40^\circ$), знову ж таки, на дальності 809,5 км. У цей момент супутник залишає спроектовану користувачем

площину горизонту і розблокує зв'язок. Супутник рухається далі до події $LOS_2(0)$ за координатами ($Az = 30^\circ, 0^\circ$) і залишає ідеальну площину горизонту користувача. Для подальших цілей точки $AOS_2(40)$ і $LOS_2(40)$ позначаються відповідно як А і В. Таким чином, під час орбіти 2 користувач і супутник спілкувалися від точки А до В із зміною дальності від 641,4 до 809,5 км, і отже, затримка одностороннього сигналу коливається від 2,13 до 2,69 мс.

Супутник, що летить на Орбіті 3, з'являється на ідеальній площині горизонту користувача приблизно з азимутом 315° на висоті 0° , позначений як подія $AOS_3(0)$, але не зафіксований користувачем. Супутник рухається вище до події $AOS_3(40)$ за координатами ($Az = 345^\circ, 40^\circ$), де супутник зафіксований з користувачем, встановлюючи зв'язок. Дальність між супутником і користувачем на даний момент становить 809,5 км (Табл. 3.2). Супутник рухається вище до події $Max E1$ в координатах ($Az = 30^\circ, 63^\circ$), все ще перебуває у зв'язку з супутником і знаходиться найближче до нього на відстані 611,2 км. Супутник рухається вниз, все ще підтримує зв'язок, до події $LOS_3(40)$ за координатами ($Az = 85^\circ, 40^\circ$), знову маючи дальність дії 809,5 км. У цей момент супутник залишає спроектовану користувачем площину горизонту і розблоковує зв'язок. Супутник рухається далі до події $LOS_3(0)$ за координатами ($Az = 125^\circ, 0^\circ$) і залишає ідеальну площину горизонту користувача. Для подальших цілей точки $AOS_3(40)$ і $LOS_3(40)$ позначаються відповідно як В і С. Таким чином, під час руху на Орбіті 3 користувач і супутник зв'язувалися з точки В в С з зміною дальності від 611,2 до 809,5 км, і отже, затримка одностороннього сигналу коливається від 2,03 до 2,69 мс.

Користувач спілкувався із супутником на Орбіті 2 від точки А до точки В. Той самий користувач спілкувався із супутником на Орбіті 3 від точки В до С. Точка В визначає втрату супутника на Орбіті 2 із спроектованої користувачем площини горизонту [подія $LOS_2(40)$] та зйомка супутника на Орбіті 3 спроектованою користувачем площиною горизонту [подія $AOS_3(40)$]. Якщо супутник на Орбіті 2

може спілкуватися за протоколом міжсупутникового зв'язку із супутником на Орбіті 3 у цій точці (зоні), встановлюючи процес передачі-приймання між супутниками на Orbit2 та Orbit3, безперебійний зв'язок між користувачем та сузір'ям від точки А до С буде забезпечено. Таким чином, процес передачі-приймання в точці В забезпечує безперервність послуг для користувача та підтримує зв'язок від А до С. Ця геометрична інтерпретація підтверджує безперервність послуг двома супутниками. Те саме стосується більшої кількості з них. Такий процес повинен бути дуже скоординований і синхронізований. Щоб полегшити процес передачі, зони покриття супутників LEO (зона близько 1 мільйона км²) перекриваються на кілька градусів, зони перекриття використовуються саме для процесу передачі. Для цього процесу супутники повинні прилягати один до одного і мати можливість взаємозв'язку. Щоб додатково проілюструвати процес передачі-захоплення в космосі, припустимо, що цей процес відбуватиметься під кутом висоти 39° для супутника на Орбіті 2 (лише 1° перед тим, як залишити площину горизонту користувача) і на висоті 41° для супутника на Орбіті 3 (лише 1° перед входом у площину горизонту користувача). Різниця в 2° забезпечується перекриттям.

36.6 Порівняння параметрів трьох орбітальних оболонок сузір'я

Розглянемо процес, як два супутники можуть спілкуватися один з одним, щоб забезпечити процес передачі-приймання між супутником на Орбіті 2 і супутником на Орбіті 3. При погляді користувача під кутом 39° супутник на Орбіті 2 знаходиться на відстані 827,9 км, готовий до процесу передачі і готовий покинути спроектовану площину горизонту. З іншого боку, супутник на Орбіті 3 на висоті 41° знаходиться на відстані 800,6 км від користувача, готовий увійти в спроектовану користувачем площину горизонту та самостійно взяти на себе зв'язок із супутника на Орбіті 2. У цих позиціях ці супутники можуть взаємодіяти. Застосовуючи правило косинусів, ці

супутники знаходяться далеко один від одного, близько 40 км у космосі, тому можуть легко спілкуватися один з одним, забезпечуючи процес передачі-приймання.

В Табл.3.7 містяться параметри переміщення супутника, нахилу дальність, огляд горизонту та параметри покриття для легкого порівняння. Параметри, що залежать від висоти, розглядаються при проектній висоті $\varepsilon_0=40^\circ$.

Табл.3.7

Порівняння параметрів трьох орбітальних оболонок сузір'я Starlink LEO
($\varepsilon_0=40^\circ$)

Параметри супутника	Висота орбіти H=550 км	Висота орбіти H=1,100 км	Висота орбіти H=340 км
Радіус орбіти r (км)	6,921	7,481	6,711
Швидкість v (км/с)	7.589	7.299	7.706
Орбітальний період T(min)	95.5	107.3	91.2
Кількість щоденних проходжень, n	15.03	13.38	15.74
$(H + R_E)/R_E$	1.086	1.174	1.053
Похила дальність зв'язку, d_{\max} (км)	809.5	1,569.9	506.5
Затримка сигналу в один бік, τ	2,69	5.23	1.68
Ідеальна ширина площини горизонту (км)	5,405.8	7,833.9	4,206.8
Проектована ширина площини горизонту (км)	1,240.1	2,405.1	775.9
Відхилена від надиру α_0 ($^\circ$)	44.8	40.7	46.6
Центральний половинний кут видимості β_0 ($^\circ$)	5.2	9.3	3.4
Покриття Земної поверхні %	0.206	0.657	0.088

Нарешті, це геометричне підтвердження процесу передачі, що доводить безперервність послуг супутників у режимі реального часу, включаючи послуги широкопосмугового всесвітнього Інтернету, які є основною метою Starlink.

ВИСНОВКИ

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

1. З порівняння між різними оболонками LEO сузір'я Starlink може забезпечити надійні всесвітні ширококутовий зв'язок з низькою затримкою менше 20 мс.
2. Надана геометрична інтерпретації та підтвердження процесу хендовера між супутниками для забезпечення безперебійних послуг.
3. Методи геометричної інтерпретації можуть бути застосовані для визначення процесу передачі для безперервності послуг у реальному часі та забезпечити безпечний зв'язок.

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. The Focus Group Network 2030 welcomes you to join and participate.
<https://itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx>.
2. W. Saad, M. Bennis, and M. Chen / A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems // IEEE network, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2019.
3. H. Kaushal and G. Kaddoum, “Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, 2017.
4. M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020.
5. F. Babich, M. Comisso, A. Cuttin, M. Marchese, and F. Patrone, “Nanosatellite-5G Integration in the Millimeter Wave Domain: A Full Top-Down Approach,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 19, no. 2, pp. 390–404, Feb. 2020.
6. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
7. M. Giordani and M. Zorzi, "Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities," IEEE Network, pp. 12–19, 2020.
8. J. Yu, X. Li, and W. Zhou, "Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication," APL Photonics, vol. 3, no. 11, p. 111101, Nov. 2018.
9. S. Jia et al., "THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band," Optics Express, vol. 24, no. 21, p. 23777, Oct. 2016.
10. V. J. Urick, C. S. Sunderman, J. F. Diehl, and N. D. Peterson, "W-Band Technology and Techniques for Analog Millimeter-Wave Photonics," Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, Aug. 2015.

- 11.V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J. M. Jornet, and Y. Koucheryavy, "Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems With Blocking and Directional Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1791–1808, Mar. 2017.
- 12.J. Loughran, "Starlink launches 60 more satellites but commercial service faces delays," *Engineering and Technology (IET)*, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2020/11/starlink-launches-60-more-satellites-but-commercial-service-faces-delays/>
- 13.Y. A. Kremenetskaya, E. R. Zhukova, N. V. Gradoboeva, D. A. Lyubas and B. V. Saenko, "Physical aspects of modeling a radio channel and noise in the millimeter range," *Telecommunications and Information Technologies*, No. 8, pp. 60-71, 2018. (in Ukrainian).
- 14.3GPP, "Solutions for NR support for Non-Terrestrial Networks (NTN)," TR 38.821 (Release 16), 2020.
- 15.Recommendation ITU-R P.676, 2005. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf
- 16.M.P. Dolukhanov, *Propagation of radio waves*. - M., Communication, 1972. (in Russ.).
- 17.Hansen Fazirovannye antennye reshetki (Phased antenna arrays). M.: Tekhnosfera, 2012, 560 p. (in Russ.).
- 18.K. V. Kiran, V. Kumar, A. K. Turuk, and S. K. Das, "Estimation of link margin for performance analysis of FSO network," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 827, pp. 444458, Dec. 2018.
- 19.I. Kim and E. J. Korevaar, "Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems," in *Optical Wireless Communications IV*, vol. 4530, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2001, pp. 84 – 95.

20. M. A. Esmail, H. Fathallah, and M.-S. Alouini, "Outdoor FSO communications under fog: Attenuation modeling and performance evaluation," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1–22, 2016.
21. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
22. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, 2007.
23. M. S. Alam, S. A. Shawkat, G. Kitazumi, and M. Matsumoto, "IrBurst modeling and performance evaluation for large data block exchange over high-speed IrDA links," *IEICE Trans. Commun.*, vols. E91B, no. 1, pp. 274–285, Jan. 2008.
24. Trichili, M. A. Cox, B. S. Ooi, and M.-S. Alouini, "Roadmap to free space optics," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 37, no. 11, pp. A184–A201, Nov 2020.
25. M. Singh, J. Malhotra, M. S. Mani Rajan, D. Vigneswaran, and M. H. Aly, "A long-haul 100 Gbps hybrid PDM/CO-OFDM FSO transmission system: Impact of climate conditions and atmospheric turbulence," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 785–794, Feb. 2021.
26. C.-Y. Li, X.-H. Huang, H.-H. Lu, Y.-C. Huang, Q.-P. Huang, and S.-C. Tu, "A WDM PAM4 FSO–UWOC Integrated System With a Channel Capacity of 100 Gb/s," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 1766–1776, Apr. 2020.
27. X.-H. Huang et al., "Two-way wireless-over-fibre and FSO-over-fibre communication systems with an optical carrier transmission," *Laser Physics*, vol. 28, no. 7, p. 076207, May. 2018.

28. K. Araki, T. Itabe, M. Takabe, T. Aruga, and H. Inomata, "Experiments on CO₂ laser beam transmission from ground to geostationary meteorological satellite-III," Laser Sensing Symposium, pp. 47–48, 1988.
29. Кременецька Я.А. Яковець В.П. Багаторівнева модель наземних і неназемних телекомунікацій із застосуванням технологій оптичного безпроводового зв'язку. *Зв'язок*, №3 (151). Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.
30. Яковець В.П., Сивик О.С., Кременецька Я.А. Аналіз та розробка інтегрованих рішень для наземних та супутникових телекомунікацій із застосуванням технологій FSO. XIII Науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій». Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.
31. Топчій В.М., Шеховцов В.С., Кременецька Я.А. Застосування радіо- та оптичного спектру в мережах зв'язку наступних поколінь. XIII Науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій». Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021.

ДОДАТОК 1



Слайд 1

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Тема магістерської роботи:

**АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ
СУПУТНИКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ
НАСТУПНИХ ПОКОЛІНЬ**



виконав:
студент Шеховцов В.С.
керівник:
Кремєнецька Я.А. д.т.н.

2022

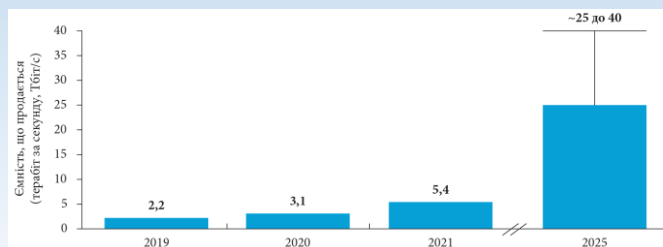
Слайд 2

Актуальність теми магістерської роботи

- 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, а також тих, що знаходяться на ранніх стадіях розгортання. Очікується, що нове покоління LEO знизить структуру витрат і зробить супутникове підключення більш конкурентоспроможним
- Тому своєчасним є провести аналіз технологічних особливостей реалізації супутникових групувань, проаналізувати процес передачі для безперервності послуг у реальному часі для нових проектів LEO супутникових систем.

- *Об'єкт дослідження* – перспективи реалізації супутникових групвань LEO.
- *Предмет дослідження* – аналіз процесу хендовера між супутниками LEO.
- *Мета роботи* – теоретичний аналіз геометричної інтерпретації та підтвердження процесу хендовера між супутниками для забезпечення безперебійних послуг.
- *Метод дослідження* – на основі теоретичного дослідження, порівняльного аналізу характеристик та розрахунків параметрів супутникових угруповань.

Інновації у низкоробітальних супутникових угрупованнях



Загальна пропускна здатність супутникового зв'язку, що продається, 2019-2025 рр.



Загальний попит на смугу пропускання

Порівняння характеристик: геостаціонарна орбіта, середня навколоземна орбіта та низька навколоземна орбіта

Орбіта	Висота	Період обертання	Затримка (в обидві сторони)	Кількість супутників для повного покриття	Ціна супутника	Ефективна тривалість роботи супутника
GEO	35786 км	24 години	~477 мс	3	Приблизно 100-400 мільйонів	15-20 років
MEO	2000-35786 км	127 хв. – 24 години	~27-477 мс	5-30 (в залежності від висоти)	Приблизно 80-100 мільйонів	10-15 років
LEO	160-2000 км	88-127 хв.	~2-27 мс	Сотні або тисячі (в залежності від висоти)	Приблизно 0,5-45 мільйонів	5-10 років

Математичне обґрунтування генерації багаточастотного векторного радіосигналу

Потужність лазера може бути виражена таким чином:

$$E_{in} = E_0 \cos(\omega_0 t), \quad (1)$$

де E_0 і ω_0 відповідно являють собою амплітуду та кутову частоту оптичного сигналу. І MZM-а, і MZM-б встановлені у точці максимального зсуву. Електричні векторні сигнали, що проходять через MZM-а та MZM-б, дорівнюють $V_a = V_m \cos[\omega_{RF}t + \theta(t)]$ і $V_b = V_m \cos[\omega_{RF}t + \theta(t) + (\pi/2)]$, відповідно. V_m являє собою амплітуду векторного електричного сигналу, а $\theta(t)$ являє собою фазу, ω_{RF} є центральною частотою ВЧ-сигналу збудження. Після того, як вихідний сигнал MZM-б зміщується на 180° по фазі, оптичний сигнал, що генерується разом з MZM-а, може бути виражений як

$$E_{out} = -E_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_{4n-2}[m(t)] \{ \cos[\omega_0 - (4n-2)\omega_{RF}t - 2\theta(t)] + \cos[\omega_0 + (4n-2)\omega_{RF}t + 2\theta(t)] \} \quad (2)$$

де $m(t)$ означає індекс модуляції.

В межах ефективного діапазону, ігноруючи оптичну бічну смугу вищого порядку, більшу за J_2 , рівняння (2) можна спростити як

$$E_{out} = -E_0 J_2[m(t)] \{ \cos[(\omega_0 + 2\omega_{RF})t + 2\theta(t)] + J_2[m(t)] \cos[(\omega_0 + 2\omega_{RF}t - 2\theta(t))] \} \quad (3)$$

Електричний сигнал, що генерується після перетворення в фотодетекторі, можна виразити як

$$i_{4\omega_{RF}t} = \frac{1}{2} R J_2^2[m(t)] \cos[4\omega_{RF}t + 4\theta(t)] \quad (4)$$

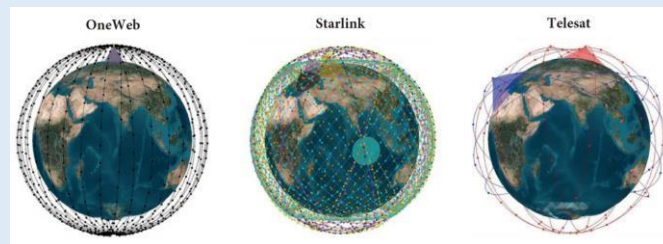
Порівняння характеристик супутникових угруповань LEO

Слайд 7

Характеристика	SpaceX Starlink	OneWeb	Telesat Lightspeed	Amazon Project Kuiper
Кількість введених на орбіту LEO-супутників	1445	146	1 (Telesat LEO 1)	0
Величина угруповання для початку роботи	1440	648	298	578
Розрахункова загальна пропускна спроможність на момент початку комерційних операцій	23,7 Тбіт/с	1,56 Тбіт/с	15 Тбіт/с	Невідомо
Заплановане розширення (Загальний розмір майбутнього сузір'я)	12000 (затверджено FCC) до 30000 (подано до FCC)	2000	1600	3236
Частота	Ku-діапазон	Ku-діапазон	Ka-діапазон	Ka-діапазон
Орбіта	560 км	1200 км	1000 км	590-630 км
Вага супутника	227-260 кг	150 кг	800 кг	Невідомо
Тривалість роботи супутника	5-7 років	~5 років	10-12 років	Невідомо
Затримка	<50 мс	<50 мс	<50 мс	Невідомо
Обов'язкові заявлені капітальні витрати	10 мільярдів дол. США	2,4 мільярди дол. США	5 мільярдів дол. США	10 мільярдів дол. США
Цільові ринки	Абонентський широкосмуговий доступ, стільниковий backhaul	Backhaul, державний зв'язок, мобільність, широкосмуговий доступ	Державна мобільність, вимоги операторського класу	Широкосмуговий доступ, backhaul

Порівняння характеристик супутникових угруповань LEO

Слайд 8



Моделі мереж OneWeb, Starlink Telesat

Відмінності швидкості передачі даних по супутниках

супутник	OneWeb	Starlink	Telesat
Середня швидкість передачі даних	8,80 Гбіт/с	20,12 Гбіт/с	35,65 Гбіт/с
Максимальна швидкість передачі даних	9,97 Гбіт/с	21,36 Гбіт/с	38,68 Гбіт/с

ПОРІВНЯННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРЬОХ ОРБІТАЛЬНИХ ОБОЛОНОК СУЗІР'Я STARLINK LEO (E0=40°)

Слайд 9

Параметри супутника	Висота орбіти H=550 км	Висота орбіти H=1,100 км	Висота орбіти H=340 км
Радіус орбіти r(км)	6,921	7,481	6,711
Швидкість v (км/с)	7.589	7.299	7.706
Орбітальний період T(min)	95.5	107.3	91.2
Кількість щоденних проходжень, n	15.03	13.38	15.74
$(H + R_E)/R_E$	1.086	1.174	1.053
Похила дальність зв'язку, d_{max} (км)	809.5	1,569.9	506.5
Затримка сигналу в один бік, τ	2,69	5.23	1.68
Ідеальна ширина площини горизонту (км)	5,405.8	7,833.9	4,206.8
Проектована ширина площини горизонту (км)	1,240.1	2,405.1	775.9
Відхилення від надиру α_0 (°)	44.8	40.7	46.6
Центральний половинний кут видимості β_0 (°)	5.2	9.3	3.4
Покриття Земної поверхні %	0.206	0.657	0.088

АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОСМІЧНОЇ ОРБИТИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС ХЕНДОВЕРА МІЖ СУПУТНИКАМИ LEO

Слайд 10

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

$$r = H + R_E \quad (1)$$

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

$$v = \sqrt{\mu/r}, \quad (2)$$

$\mu = M \cdot G = 3,986 \times 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$ - постійна величина, що є добутком маси M Землі та гравітаційної постійної Землі G.

Період обертання супутника виражається як:

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

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

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

Похила дальність зв'язку математично задається як:

$$d = R_E \sqrt{\left(\frac{H + R_E}{R_E}\right)^2 - \cos^2 \epsilon_0} - \sin \epsilon_0, \quad (4)$$

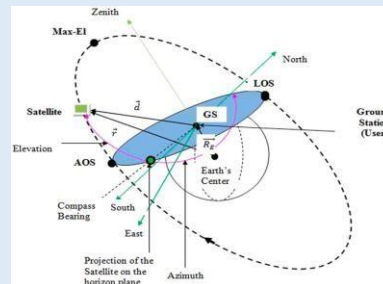
де d - похила відстань під кутом місця ϵ_0 , H - орбітальна висота, а $R_E = 6371$ км - радіус Землі. І навпаки, кут місця ϵ_0 , виражений через d, дорівнює:

$$\sin \epsilon_0 = \frac{H(H + R_E) - d^2}{2dR_E} \quad (5)$$

Для $d^2 = H(H + 2R)$ виходить $\sin \epsilon_0 = 0 \Rightarrow \epsilon_0 = 0$, що представляє найбільшу відстань між супутником і наземною станцією (користувачем), як:

$$d_{max} = d(\epsilon_0 = 0) = \sqrt{H(H + 2R_E)} \quad (6)$$

Відстань d_{min} під найменшим можливим кутом місця $\epsilon_0 = 0$ являє собою максимально можливу відстань між наземною станцією (користувачем) і супутником висоти H, і, отже, найгірший випадок бюджету лінії.



Мінімальна відстань між супутником і наземною станцією відбувається в разі Max-El (Максимального кута елевaції ϵ_0), тоді:

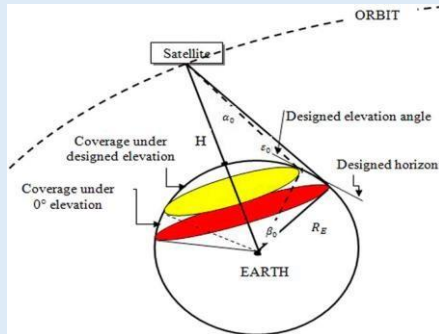
$$d_{min}(\epsilon_0 = MaxEL) = R_E \left(\sqrt{\left(\frac{H + R_E}{R_E}\right)^2 - \cos^2 MaxEL} - \sin MaxEL \right), \quad (7)$$

$$d_{min}(\epsilon_0 = MaxEL) = 90^\circ = H. \quad (8)$$

Похила дальність між супутником і користувачем змінюється з часом, викликаючи різні затримки сигналу від супутника до користувача або навпаки. Позначаючи затримку сигналу (затримку) через τ , для супутникового шляху, який бачить користувач, при односторонньому зв'язку, затримка сигналу має значення:

$$\tau_{min}(\text{зв'язуючи з } d_{min}) < \tau < \tau_{max}(\text{зв'язуючи з } d_{max}) \quad (9)$$

Аналіз мережевого рішення можливості глобального покриття в реальному часі для сузір'я супутників LEO



Концепція зони покриття супутником

Повне покриття досягається для $\epsilon_0=0$, і ця умова визначає найбільший найнижчий кут поширення низхідної лінії супутника, і він становить:

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

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

$$C(\%) = \frac{S_{SAT\ COV}}{S_E} \quad (2)$$

$$C(\%) = \frac{1}{2}(1 - \cos \beta_0) \quad (3)$$

Висновки

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

1. З порівняння між різними оболонками LEO сузір'я Starlink може забезпечити надійні всесвітні широкосмуговий зв'язок з низькою затримкою менше 20 мс.
2. Надана геометрична інтерпретації та підтвердження процесу хендовера між супутниками для забезпечення безперебійних послуг.
3. Методи геометричної інтерпретації можуть бути застосовані для визначення процесу передачі для безперервності послуг у реальному часі та забезпечити безпечний зв'язок.

УДК 621.398.96

Сивик О.С., магістр

Топчій В.М., магістр

Шеховцов В.С., магістр

Державний університет телекомунікацій, Київ

АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СЦЕНАРІЇВ РОЗГОРТАННЯ NTN МЕРЕЖ

Анотація: Епоха технології п'ятого покоління (5G) тільки почалася, і її обіцянки суттєво покращити продуктивність системи стали реальністю. Неназемні мережа (NTN) з підтримкою 5G можливо стануть ефективним рішенням для надання послуг у будь-який час, у будь-якому місці та збільшить зону покриття. У цьому контексті в роботі аналізуються рішення для супутникових систем з високою пропускнуою здатністю та вдосконаленою технологією багатопроменевої передачі, завдяки їхній здатності збільшувати пропускну здатність системи за рахунок повторного використання частот, збільшення швидкості передачі даних користувачем та спектральної ефективності системи. Адаптація 5G для підтримки неназемних мереж спричиняє цілісний дизайн, що охоплює безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів. У статті аналізуються основні теми неназемних мереж, докладно аналізуються аспекти проектування, проблеми реалізації та напрями наступних досліджень.

Ключові слова: 5G, неназемні мережі, non-terrestrial network, системи висотних платформ, HAPS, архітектура мереж, супутниковий доступ

ВСТУП

Технології NTN (англ. non-terrestrial network) стає загальним терміном для будь-якої мережі, яка включає літаючі неназемні об'єкти. Сімейство NTN включає мережі супутникового зв'язку, системи висотних платформ (HAPS) та мережі "повітря-земля", як показано на рис.1.

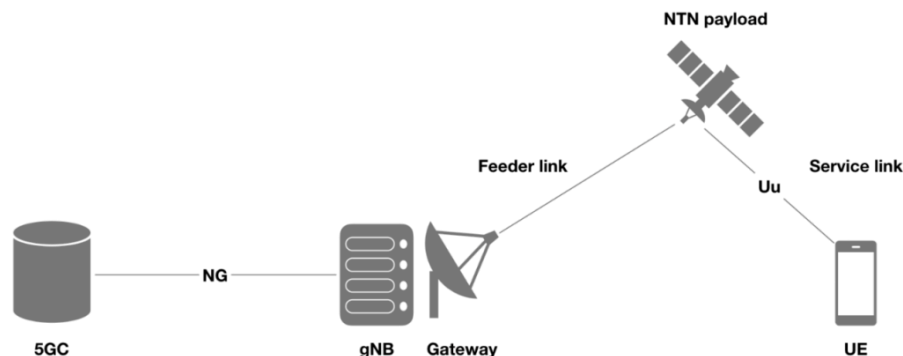


Рис. 1. Архітектура NTN із прозорим корисним навантаженням.

У мережах супутникового зв'язку використовуються космічні платформи, які включають супутники на низькій навколоземній орбіті (LEO), супутники на середній навколоземній орбіті (MEO) та супутники на геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO). За останні кілька років світ став свідком відродження інтересу до широкосмугового зв'язку, що надається мережами LEO NTN із великими супутниковими угрупованнями (наприклад, Starlink, Kuiper та OneWeb). Щоб отримати вигоду від масштабу системи 5G [1] супутникова індустрія підключилася до процесу 3GPP для інтеграції супутникових мереж в систему 5G NR (нова технологія стільникового зв'язку). HAPS - це повітряні платформи, які можуть включати літаки, повітряні кулі і дирижаблі. У технології NTN основна увага приділяється станціям із висотною платформою, таким як базові станції міжнародного мобільного зв'язку, відомі як HIBS (англ. high-altitude platform stations as IMT base stations). Система HIBS надає послуги мобільного зв'язку в тих же смугах частот, що і наземні мобільні мережі.

Мережі "повітря-земля" призначені для забезпечення зв'язку в польоті для літаків за рахунок використання наземних станцій, які відіграють ту саму роль, що й базові станції (BS) у наземних мобільних мережах. Але антени наземних станцій у мережі "повітря-земля" спрямовані до неба, і відстані між положеннями станцій набагато більші, ніж у наземних мобільних мереж.

Досі робота NTN була зосереджена на мережах супутникового зв'язку з неявною сумісністю для підтримки систем HIBS та мереж "повітря-земля". Варто відзначити, що система також працює із маловисотними літальними безпілотними апаратами з мобільними пристроями (БПЛА, також відомими як безпілотні літальні апарати), які можна розглядати як частину сімейства NTN в широкому сенсі. Однак у 3GPP цей напрямок роботи було проведено в окремому напрямку. Тому тут ми зосередимося на мережах супутникового зв'язку і зведемо до мінімуму обробку інших типів NTN.

NTN на основі 5G New Radio (NR) була основним напрямком [2]. NR був розроблений для прямої сумісності, підтримки низької затримки, передових антенних технологій та гнучкості спектру, включаючи роботу в діапазонах низьких, середніх та високих частот. Це забезпечує міцну основу адаптації NR для підтримки NTN.

Зростає інтерес до варіантів використання масового Інтернету речей (IoT) на основі NTN з використанням вузькосмугового IoT (NB-IoT) та довгострокового розвитку (LTE) для зв'язку машинного типу (LTE-M). В результаті 3GPP вивчає можливість адаптації NB-IoT та LTE-M для підтримки NTN у своїй версії 17 [3].

У роботі [4] обговорюються проблеми та можливості NTN, а також представлений практичний приклад використання частот міліметрового діапазону для підключення мобільних терміналів. Детальний огляд NTN представлений у [5], але обговорення роботи 3GPP NTN у ньому залишається високому рівні. Натомість, мета цієї статті – проаналізувати варіанти роботи NTN, заглибившись у детальні

аспекти та фундаментальні обґрунтування застосування технологій, що впливають на стандартизацію. Зокрема, у цьому документі обговорюються ключові рішення NTN, що охоплюють безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів до ядра та терміналів.

Мережі радіодоступу для NR NTN

Робота над NR NTN розпочалася у 2017 році з дослідження, присвяченого сценаріям розгортання та моделям каналів [6]. Першою основною метою дослідження було вибрати кілька еталонних сценаріїв розгортання NTN та узгодити ключові параметри, такі як архітектура, висота орбіти, смуги частот тощо.

Ключові сценарії та моделі включають:

- використання S- та Ka-діапазонів;
- супутники GEO, супутники LEO та HAPS;
- спрямовані до Землі промені (тобто промені, які прямують на ділянку землі якомога довше) і промені, що рухаються (тобто промені, що рухаються по поверхні Землі слідом за рухом супутника);
- типові розміри зони обслуговування та мінімальні кути місця (елевації) для розгортань GEO, LEO та HAPS;
- два типи терміналів NTN: портативні термінали та термінали з дуже малою апертурою (VSAT) (оснащені параболічними антенами і зазвичай встановлюються на будівлях або транспортних засобах);
- моделі антени для супутникової антени та антени HAPS.

Друга основна мета дослідження полягала у аналізі моделей каналів NTN з урахуванням моделей наземних каналів. Різні моделі каналів підтримують низку сценаріїв розгортання, включаючи міські, приміські та сільські.

Багатопромєність - типове явище в умовах наземного поширення. Для NTN велика відстань до супутника призводить до того, що різні траєкторії майже паралельні, і кутовий розкид, таким чином, близький до нуля. Тому великомасштабні параметри (імовірність прямої видимості, кутовий розкид, розкид затримок тощо.) відрізняються від наземного випадку і залежить від кута місця обслуговуючого супутника.

Основна мета полягає у визначенні мінімального набору необхідних функцій, що забезпечують підтримку з наземних NR для NTN (особливо для супутникових мереж), що включало архітектуру, протоколи вищого рівня та аспекти фізичного рівня.

RAN наступного покоління (NG-RAN) підтримує поділ базової станції 5G (gNB) на центральний блок (CU) та розподілений блок (DU). Досліджено безліч варіантів архітектури NG-RAN на основі NTN та зроблено висновок, що немає жодних перешкод підтримки зазначених варіантів архітектури.

Стек протоколів верхнього рівня NR поділено на площину користувача (UP), яка керує передачею даних, та площину управління (англ. control plane, CP), що відповідає за сигналізацію. Для UP основний вплив мають тривалі затримки поширення в NTN.

Відповідно, було вивчено вплив тривалих затримок на управління доступом до середовища (англ. medium access control, MAC), управління радіоканалом (англ. radio link control, RLC), протокол конвергенції пакетних даних (англ. packet data convergence protocol, PDCP) та протокол адаптації службових даних (англ. service data adaptation protocol, SDAP). Було зроблено висновок, що вдосконалення MAC будуть потрібні для довільного доступу, переривчастого прийому (англ. discontinuous reception, DRX), запиту планування та автоматичного гібридного запиту на повторення (англ. hybrid automatic repeat request, HARQ). Було рекомендовано зосередити увагу на повідомленні про стан та порядкові номери на рівні RLC, а також на відкиданні одиниць службових даних та порядкових номерах на рівні PDCP. Було виявлено, що для SDAP немає необхідності вносити зміни для підтримки NTN.

Для CP основна увага в дослідженні приділялася процедурам управління мобільністю через переміщення платформ NTN, особливо супутників LEO. Для режиму очікування потрібно ввести специфічну системну інформацію NTN.

З погляду фізичного рівня, великі оцінки каналного та системного рівнів проводилися у двох номінальних смугах частот: діапазонах S та Ka. З аналізу [6-8] можна зробити висновок, що при відповідних схемах розташування супутникових променів портативне обладнання (UE) може обслуговуватися мережами LEO і GEO в S-діапазоні, а інше UE з високим коефіцієнтом підсилення передавальної та приймальної антен терміналу (VSAT) і UE, можуть обслуговуватися LEO і GEO як в S-, так і в Ka-діапазонах.

Наземні мережі NR утворюють хорошу основу для підтримки NTN, незважаючи на проблеми, пов'язані з тривалими затримками поширення, великими доплерівськими зсувами і рухомими об'єктами в NTN. Було визначено, що необхідні удосконалення в областях часових співвідношень, часової та частотної синхронізації висхідної лінії зв'язку та HARQ.

Мета останніх досліджень [1-8] полягає у визначенні покращень, необхідних для NTN на базі LEO та GEO, а також націлити на неявну підтримку HAPS та мереж "повітря-земля". Це включає аспекти фізичного рівня, протоколи та архітектуру, а також управління радіоресурсами, вимоги до радіочастот та використання смуги частот. Основна увага приділяється прозорій архітектурі корисного навантаження з фіксованими наземними зонами та системами дуплексного зв'язку із частотним розподілом (FDD), де передбачається, що всі UE мають можливості глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

На рис. 1 показано архітектуру NTN з прозорим корисним навантаженням. Базова мережа 5G (5GC) підключається до gNB за допомогою NG-інтерфейсу. gNB розташований на землі та підключається до шлюзу NTN, який через фідерне

з'єднання підключається до корисного навантаження NTN (мережевий вузол, встановлений на борту супутника або HAPS). Корисне навантаження NTN підключається до UE через службове посилення за допомогою інтерфейсу Uu.

Наземний користувач UE з можливостями GNSS може розрахувати відносну швидкість між UE та супутником, а також час прийому-передачі (англ. round-trip time, RTT) між UE та супутником. Виходячи з відносної швидкості, UE може розрахувати та застосувати попередню компенсацію для доплерівської частоти, щоб гарантувати, що його сигнал висхідної лінії зв'язку приймається на супутнику або gNB на бажаній частоті. GNB надає UE загальне випередження синхронізації (англ. timing advance, TA), яке сигналізує RTT між супутником та gNB. UE додає час RTT між UE та супутником до загальної TA, щоб отримати повну TA. Повний TA використовується як зсув між прийнятою синхронізацією низхідної лінії зв'язку і синхронізацією передачі висхідної лінії зв'язку в UE, тобто, якщо слот n низхідній лінії зв'язку починається в момент часу t_1 , то слот n висхідної лінії зв'язку починається в момент часу t_1 мінус повне TA. Це дозволяє UE відправляти передачі по висхідній лінії зв'язку з точною синхронізацією прийому gNB як для довільного доступу, так і для передачі даних в підключеному режимі.

Як показано в [6-8] передачі в NR засновані на 16 процесах HARQ із зупинкою та очікуванням для безперервних передач. Процес HARQ не може бути повторно використаний для нової передачі, доки не буде отримано зворотний зв'язок для попередньої передачі. При тривалих RTT та використанні протоколу зупинки та очікування передачі зупинятимуться, коли всі процеси HARQ очікують зворотного зв'язку, що знижує пропускну здатність зв'язку. Щоб зменшити зрив, кількість процесів HARQ збільшена до 32, що може охоплювати деякі сценарії "повітря-земля". Однак 32 процесів HARQ недостатньо для покриття RTT NTN на основі LEO та GEO. Оскільки подальше збільшення кількості процесів HARQ вважається небажаним, необхідно використовувати схеми для повторного використання того самого процесу HARQ до того, як пройде повний RTT, щоб уникнути зупинки. При повторному використанні процесу HARQ для передачі по низхідній лінії зв'язку до того, як пройде RTT, зворотний зв'язок HARQ стає непотрібним і таким чином відключається. Для висхідної лінії зв'язку немає зворотного зв'язку HARQ, і gNB може динамічно вирішувати, чи повторно використовувати процес HARQ до того, як пройде RTT, відправивши гранти для нових даних або гранти для повторних передач, або дочекатися, поки він не декодує передачу по висхідній лінії. Показано, щоб реалізувати в реальному часі RTT NTN для UE необхідно (повторно) вибрати новий супутник, який заснований на існуючих критеріях і може включати нові критерії, такі як час, коли супутник перестає покривати зону, де знаходиться UE. Умовна передача обслуговування заснована на місцезнаходження UE та синхронізації супутникового покриття з місцем розташування UE.

У дослідженні, задокументованому в [7], визначено варіанти використання супутників, що використовуються як технології доступу від UE, так і як транзитного каналу між наземною базовою станцією (BS) і мережею між BS (англ. core network, CN). Для супутникового доступу UE варіанти використання включають, наприклад, використання супутника для широкомовної послуги, щоб гарантувати покриття для пристроїв IoT і забезпечити критично важливий доступ у надзвичайних ситуаціях. Для сценаріїв супутникового зворотного зв'язку варіанти використання включають, наприклад, фіксований зворотний зв'язок між BS у віддаленій області і CN, а також зворотний між рухомою BS, розгорнутою в поїзді, і CN.

Вимоги охоплюють супутниковий доступ на основі NTN RAN для доступу, так і варіанти використання транзитного з'єднання, а також можливість використання супутникових радіотехнологій. Сучасні наземні системи зазвичай розгортаються таким чином, що вони забезпечують покриття лише в межах однієї країни, виконуючи відповідні нормативні зобов'язання цієї конкретної країни. Однак, супутникові радіосистеми можуть охоплювати кілька країн або міжнародні води. Дослідження архітектурних аспектів використання супутникового доступу 5G полягає у вивченні впливу підтримки супутникового доступу та транзитного з'єднання в системах 5G з метою повторного використання існуючих рішень. Ядро мереж 5G (5GC) передбачає фіксовані наземні зони спостереження (англ. tracking areas, TAs), і навіть те, що ідентифікатори (ID) стільників застосовуються для конкретних географічних зонах. Ідентифікатори TAs та ідентифікатори стільників використовуються в 5GC і на рівні послуг як інформація про місцезнаходження UE. Припускаючи, що наземні фіксовані TAs і що NTN RAN повідомляють ідентифікатори стільників, які можуть бути зіставлені з географічними областями, це гарантує, що 5GC і рівень послуг можуть продовжувати використовувати ідентифікатори UE, навіть якщо вони рухаються.

Потенційно широке охоплення супутниковими радіосистемами у багатьох країнах є проблемою, коли справа доходить до виконання нормативних вимог. Функція управління доступом та мобільністю (англ. access and mobility management function, AMF) може потребувати перевірки того, що UE знаходиться в зоні (країні), яку AMF може обслуговувати, як показано на рис.2. Перевірка може здійснюватися за допомогою RAN.

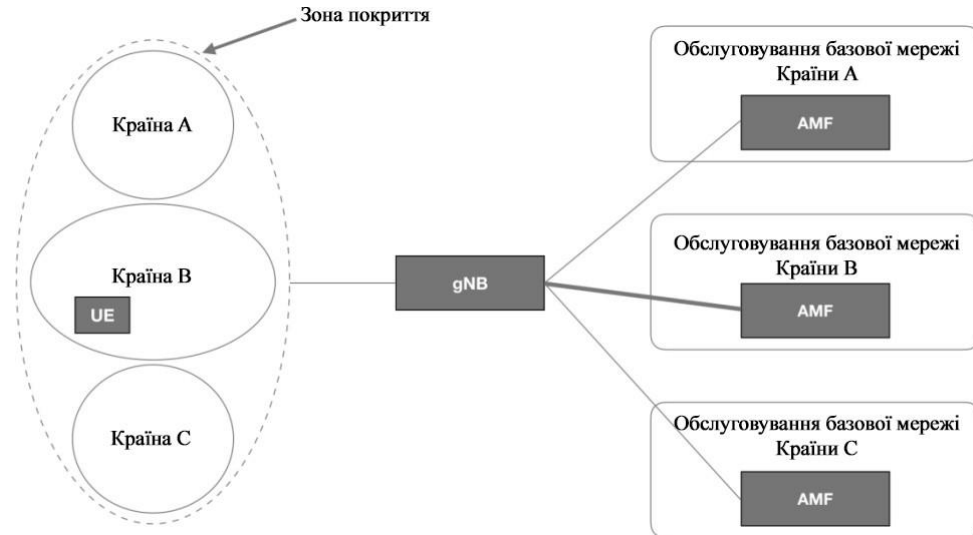


Рис. 2. Супутниковий доступ, що охоплює декілька країн та gNB, підключений до стільникових мереж, що обслуговують різні країни.

Структура якості обслуговування (QoS) 5G має бути повторно використана з невеликими покращеннями. Зокрема, при використанні супутника GEO супутникове з'єднання може робити значний внесок у наскрізну затримку, яка в багатьох випадках може виходити за межі того, що сьогодні дозволено стандартизованими класами QoS 5G. Ймовірно, знадобиться деяке коригування існуючих класів QoS 5G або визначення нових класів QoS 5G.

Одним із рішень є технологія доступу, що використовується UE (наприклад, LTE або WiFi). Щоб зробити це можливим для різних типів супутників NR NTN (LEO, MEO, GEO), а також дозволити диференціацію з наземним NR. Це дозволить мережевим функціям 5GC керувати сеансом, політичними регламентами, нарахуванням оплати, а також на рівні обслуговування (AF) знати, коли UE використовує супутниковий доступ.

У 2019 році SA5 розпочала дослідження аспектів управління та оркестрування з інтегрованими супутниковими компонентами у мережі 5G [8]. Основна мета – вивчити бізнес-ролі, а також послуги, управління мережею та оркестрування мережі 5G з інтегрованими супутниковими компонентами. Об'єм включає супутниковий доступ на основі NTN RAN, так і супутниковий доступ, не пов'язаний з 3GPP, а також аспекти транзитного з'єднання. Мета полягає в тому, щоб повторно використовувати існуючу бізнес-модель, управління та оркестрування поточної мережі 5G, щоб мінімізувати вплив.

Результат дослідження задокументований у [8], який включає варіанти використання, а також потенційні вимоги та рішення, наприклад, для управління та моніторингу компонентів gNB та управління мережевим сегментом. Порівняно з наземним NR, впливи в основному відбуваються через сценарії LEO/MEO, де компоненти gNB, такі як gNB-DU, розташовані на борту супутникових апаратів і,

таким чином, будуть переміщатися щодо Землі. Інші покращення необхідні через тривалі затримки, які впливають на деякі функції моніторингу та ключові показники ефективності. Для покращення ефективності запропоновано концепції мереж, що самоорганізуються (англ. self organizing network, SON) для 5G необхідно, а також обробка вимірювань робочих характеристик, які використовують процес HARQ, що може бути недоступний при використанні супутникової RAN. Крім того, функції моніторингу, що підтримують використання балансування навантаження між різними радіотехнологіями, повинні бути розширені, щоб охопити балансування навантаження між наземною RAN та не наземною RAN.

ВИСНОВКИ

Безперервна еволюція технології 5G спрямована на підвищення продуктивності та вирішення нових варіантів використання. Властива технології 5G гнучкість забезпечує міцну основу для її адаптації для підтримки неназемних мереж NTN. NTN та, особливо, мережі міжсупутникового зв'язку є складними системами, для проектування яких необхідний цілісний підхід. В проведеному аналізі надано огляд сучасного стану роботи NTN в рамках 3GPP, детально пояснені аспекти проектування. Показано, що реалізація технологій 5G для неназемних мереж є реальністю. Але необхідні не лише стандартизація, а й подальші дослідження аспектів проектування NTN. Будемо сподіватись, що технології 5G відіграватиме важливу роль у забезпеченні зв'язку з космосу в найближчі роки.

Список використаної літератури

1. EMEA Satellite Operators Association, “ESOA satellite action plan for 5G standards,” white paper. [Електронний ресурс] // URL: <https://www.esoa.net/cmsdata/positions/1771%20ESOA%205G%20standards.pdf>
2. X. Lin et al., “5G New Radio evolution meets satellite communications: Opportunities, challenges, and solutions,” in *5G and Beyond: Fundamentals and Standards*, X. Lin and N. Lee, Eds. Springer, 2021.
3. RP-193235, “Study on NB-IoT/eMTC support for non-terrestrial network”, 3GPP TSG-RAN Meeting #86, December 2019 [Електронний ресурс] // URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3747>
4. M. Giordani and M. Zorzi, “Non-terrestrial communication in the 6G era: Challenges and opportunities,” arXiv preprint arXiv:1912.10226, December 2019.
5. F. Rinaldi et al., “Non-terrestrial networks in 5G & beyond: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165178-165200, 2020.
6. TR 38.811, “Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks,” V15.4.0, October 2020. [Електронний ресурс] // URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234>

7. TR 22.822, “Study on using satellite access in 5G,” V16.0.0, August 2018. [Электронный ресурс] // URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3372>
8. TR 28.808, “Study on management and orchestration aspects of integrated satellite components in a 5G network,” V1.1.0, January 2021. [Электронный ресурс] // URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3617>

ЗАСТОСУВАННЯ РАДІО- ТА ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ В МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ НАСТУПНИХ ПОКОЛІНЬ

*Топчій Владислав Миколайович
Шеховцов Владислав Сергійович
Кременецька Яна Адольфівна
Державний університет телекомунікацій
Навчально-науковий інститут телекомунікацій
м. Київ*

Анотація – в роботі аналізується напрямки розвитку телекомунікаційних технологій 6G, майбутні сценарії широкосмугового зв'язку із застосуванням терагерцового і оптичного діапазону хвиль. Показано, що дослідження застосування фотонних технологій в космічних і наземних сегментах є важливими напрямками для розвитку FG-NET-2030

Оперативна група ІТУ-Т по визначенню технологій для мереж 2030 (FG NET-2030), з вивчення можливостей мереж на період до 2030 року і далі сформулювала найбільш загальні вимоги до мереж зв'язку шостого покоління (6G). У відповідності з документами FG NET-2030 очікується, що для 6G з'явиться сервіс голографічного зв'язку, тактильний інтернет, який буде орієнтуватися на відчуття людини, наприклад, запах і смак, а також віртуальні копії фізичних об'єктів. Очікується, що пікова швидкість передачі даних, в порівнянні з 5G, виросте на 50%, до терабіт в секунду. Крім приросту в швидкості, мережі 6G забезпечать затримку на рівні 1 мс. Ключові рішення 6G телекомунікаційних технологій показані на рисунку 1.

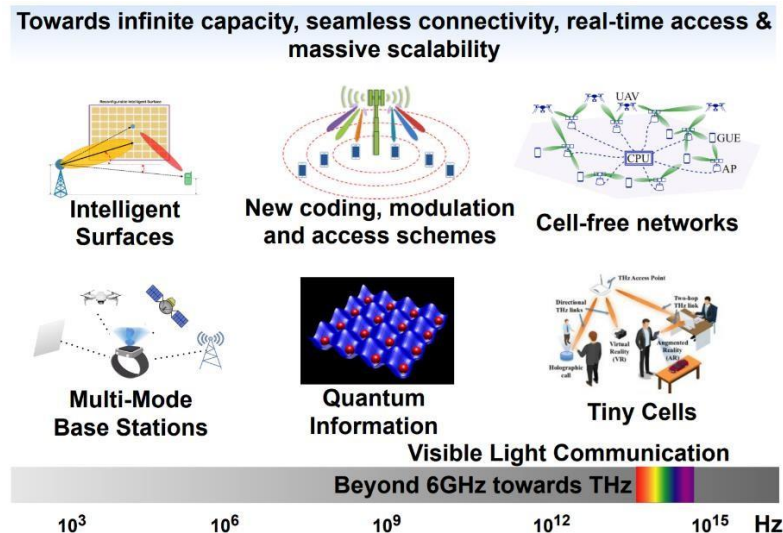


Рисунок 1 – Напрями розвитку комунікаційних технологій 6G

Наприклад, майбутні мережі зв'язку повинні будуть перейти до ще більш малим розмірам осередків для підтримки високочастотних діапазонів в

терагерцовому радіодіапазоні (ТГц) та оптичному діапазоні (ОД). Супутникові технології доступу на низькій навколоземній орбіті (LEO), стратосферні платформи (HAP) і безпілотні ретранслятори (UAV), які будуть реалізувати космічний Інтернет, будуть забезпечувати майбутні сценарії ширококосмугового зв'язку з допустимою затримкою до 30 мс. Протилежний характер складності надання загальних засобів зв'язку для кінцевого користувача і конвергенція з фіксованими мережами потребують створення інфраструктури, стійкої як до затримок, так і до втрат.

Також, спектральний потенціал ТГц і оптичних діапазонів (ОД) для застосування у вільному просторі має суттєві недоліки, такі як спотворення форми сигналу, внаслідок фазових і амплітудних флуктуацій, завмирання каналу, викликані атмосферною турбулентністю і таке ін. після передачі в атмосферних каналах. Для оптичного променя стан поляризації є найбільш стабільною властивістю в порівнянні з амплітудою і фаза при поширенні по турбулентному каналу. Для систем 6G необхідні ефективні методи кодування, модуляції, мультиплексування для забезпечення високої спектральної і енергетичної ефективності, забезпечення безпеки. Дослідження також показують, що найменший вплив на канали в ТГц і ОД надають імпульсні методи модуляції. Фазовий шум електронних пристроїв обмежує вихідну потужність сигналу. Рішення на основі фотонних методів застосовуються для формування радіосигналів, формування діаграм спрямованості фазованих антенних решіток, а також є фундаментальною основою для розробки квантових комп'ютерів.

Тому фотонні технології, дослідження їх застосування в космічних і наземних сегментах є важливими напрямками для розвитку FG-NET-2030.

Список використаних джерел:

1. *The Focus Group Network 2030 welcomes you to join and participate.* <https://itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx>.
2. W. Saad, M. Bennis, and M. Chen / *A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems // IEEE network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2019.
3. 3GPP, *Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) / TR 38.821 (Release 16)*, 2020.
4. Я. А. Кременецкая, Е. Р. Жукова, Н. В. Градобоева, Д. А. Любас, Б. В. Саенко / *Физические аспекты моделирования радиоканала и шумов в миллиметровом диапазоне // Телекоммуникаційні та інформаційні технології.* - 2018. - № 2. - С. 60-71.