

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Обґрунтування способу передачі сигналу в системах супутникового зв'язку

Виконав(ла): студент(ка) II курсу, групи РРМ-61
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Маняк А.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Дедів І. Ю.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Хвостівська Л. В.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Дунець В. Л
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль 2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
 Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
 Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри

(підпис) Дунець В. Л.
(прізвище та ініціали)
 « » 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня _____ магістр
(назва освітнього ступеня)
 за спеціальністю 172 Телекомунікація та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)
 студенту _____ Маняку Андрію Іполитовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)
 1. Тема роботи Обґрунтування способу передачі сигналу в системах супутникового зв'язку

 Керівник роботи _____ Дідів Ірина Юріївна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 Затверджені наказом ректора від « 01 » грудня 2023_ року № 4/7-1135 .
 2. Термін подання студентом завершеної роботи _____
 3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження: комунікаційний сигнал супутникової системи зв'язку . Предмет дослідження: процес передачі сигналу в супутниковому зв'язку на низькій орбіті

 4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
 1. Аналітична частина
 2. Основна частина
 3. Науково - дослідна частина
 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
 1. Основні відомості про супутникову передачу зв'язку
 2. Геостаціонарна орбіта
 3. Основні характеристик передачі супутникового зв'язку Starlink
 4. Зменшення затримки сигналу
 5. Наукова новизна
 6. Загальні висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С., стар. викл. каф. ОХ		
	Клепчик В.М., стар. викл. каф. ОХ		

7. Дата видачі завдання _____

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	30.10.2023	виконано
2	Аналіз завдання	03.11.2023	виконано
3	Виконання розділу 1	08.11.2023	виконано
4	Виконання розділу 2	13.11.2023	виконано
5	Виконання розділу 3	17.11.2023	виконано
6	Виконання розділу 4	22.11.2023	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	28.12.2023	виконано
8	Оформлення графічного та презентаційного матеріалу	04.12.2023	виконано
9	Перевірка роботи на антиплагіат	13.12.2023	
10	Попередній захист	14.12.2023	
11	Захист	28.12.2023	

Студент

(підпис)*Маняк А.І.*_____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)*Дедів І.Ю.*_____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Обґрунтування способу передачі сигналу в системах супутникового зв'язку» //Кваліфікаційна робота// Маняк Андрій Іполитович // ТНТУ, Факультет Прикладних Технологій, група РРм-61 // Тернопіль, 2023 // с. – 75, рис. – 19, табл. – 4, додат. – 1, бібліогр. –27.

Ключові слова: ІНТЕРНЕТ, STARLINK, HANDOWER; SRARLINK
НИЗЬКООРБІТАЛЬНІ СУПУТНИКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, SPACEX

В кваліфікаційній роботі здійснено процес оцінювання передачі сигналу з використанням системи супутникового зв'язку зокрема було розглянуто сучасні існуючі системи передачі зв'язку.

Зроблено порівняння сучасних проектів супутникових угруповань за розгортанням та наданням послуг. Проведений розрахунок параметрів космічної орбіти, що впливають на процес між супутниками LEO. Надана геометрична інтерпретації та підтвердження процесу між супутниками для забезпечення безперебійних послуг

ANOTATION

Title of the thesis: "Investigation of Signal Transmission Using the Starlink Satellite Communication System" //Qualification Thesis// Maniak Andriy Ipolitovych // Ternopil National Technical University (TNTU), Faculty of Applied Technologies, Group RRm-61 // Ternopil, 2023 // p. – 75, fig. – 19, table. – 4, app. – 1, bibl. – 27.

Keywords: INTERNET, STARLINK, HANDOVER; STARLINK LOW-ORBIT SATELLITE TECHNOLOGIES, SPACEX

The qualification thesis evaluates the signal transmission process using the satellite communication system, specifically examining modern existing communication transmission systems.

A comparison of contemporary satellite cluster projects is conducted based on deployment and service provision. Calculations of parameters affecting the inter-satellite communication process in Low Earth Orbit (LEO) are performed. Geometric interpretation and confirmation of the inter-satellite process are provided to ensure seamless services.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1. Супутникові системи зв'язку.....	10
1.2. Супутниковий інтернет на низькій орбіті.....	12
1.4. Площина горизонту дальність нахилу та затримка сигналу.....	15
1.5. Геостаціонарна орбіта.....	19
1.6. Геометрична інтерпретація та її підтвердження	21
1.7. Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	28
2.1. Система супутникового інтернету Starlink.....	28
2.2. Моделювання Starlink	28
2.3. Мережа Starlink	32
2.4. Розрахунок межі Крамера-Рао для Starlink	36
2.5. Висновки до розділу 2	44
РОЗДІЛ 3 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	46
3.1. Ідеальна площина горизонту для розміщення супутника.....	46
3.2. Розташування супутникових прив'язок.....	47
3.3. Метод зменшення затримка сигналу.....	53
3.4. Висновки до розділу 3:	57
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	59
4.1. Охорона праці.....	59
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	62
4.3. Висновки до розділу 4	67
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	69
ДОДАТОК А Копія тези конференції.....	73

ВСТУП

Актуальність роботи. Актуальність супутникового зв'язку в сучасному світі, оскільки ця глобальна супутникова система, прагне забезпечити бездротовий доступ до інтернету для всіх куточків планети, включаючи ті області, де традиційний зв'язок ненадійний чи зовсім відсутній. Україна, знаходячись у складних умовах війни, особливо оцінює можливості супутникового зв'язку як засіб забезпечення зв'язку в умовах, коли стаціонарний і мобільний інтернет може бути недоступним через пошкодження мереж.

Система Starlink складається з трьох ключових компонентів: супутників на низьких орбітах, наземних станцій та користувацьких терміналів, що схожі на домашні супутникові антени. Супутники діють як посередники, передаючи радіосигнали від наземних станцій до терміналів користувачів і навпаки. Важливо відзначити, що відстань між наземними станціями та користувачами може досягати тисяч кілометрів.

Однією з головних переваг Starlink є можливість надавати високошвидкісний інтернет в віддалених місцях без необхідності будівництва інфраструктури та проведення кабелів. Затримка сигналу майже непомітна завдяки низькій орбіті супутників, і вона становить до 20 мілісекунд, що є значно менше, ніж у конкурентів, де затримка може сягати секунд.

Додатково до зазначених переваг, слід відзначити кілька фактів, які підкреслюють актуальність та важливість системи Starlink.

Масштабність і глобальний охоплення: система Starlink вже має запущено сотні супутників та активно розширює свій ланцюг для глобального охоплення. Це дозволяє забезпечувати послуги Інтернету на практично будь-якій точці земної поверхні.

Роль у кризових ситуаціях: Starlink стала неоціненною в кризових ситуаціях, таких як природні катастрофи або конфлікти, де традиційна інфраструктура може бути негайно пошкоджена. Надійний і швидкий доступ до

зв'язку може врятувати життя та допомагати організаціям гуманітарної допомоги.

Підтримка навчання та розвитку: у віддалених та недостатньо розвинених регіонах, де доступ до освіти є обмеженим, Starlink може стати каталізатором для розвитку освіти та навчання. Віддалені навчальні заклади та студенти отримують можливість отримувати якісну освіту через інтернет.

Потенціал для нових технологій: розвиток та оптимізація системи Starlink може відкрити двері для нових технологій, таких як розширення смарт-сіті рішень, автономних систем та інтернету речей (IoT), що зробить цю систему необхідною для інноваційних застосувань.

Узагальнюючи, даний спосіб вирішує проблему доступу до інтернету в труднодоступних регіонах, але також стає критичним інструментом для вирішення ряду соціальних, економічних та гуманітарних викликів у сучасному світі.

Метою роботи є обґрунтування способу передачі супутникового сигналу для збільшення пропускної здатності системи супутникового зв'язку. Досягнення цієї мети вимагає розв'язання таких **задач**:

1. Провести аналіз відомих рішень, технологій та обмежень.
2. Дослідити характеристики супутникового сигналу.
3. Обґрунтувати технічні рішення для підвищення пропускної здатності.
4. Обґрунтувати метод, що дасть можливість збільшити покриття поверхні Землі супутниковим зв'язком.
5. Обґрунтувати застосування методу зменшення затримки сигналу.

Об'єкт дослідження: процес передачі сигналу в супутниковому зв'язку на низькій орбіті.

Предметом дослідження: комунікаційний сигнал супутникової системи зв'язку.

Методи дослідження: теоретичі дослідження, порівняльний аналіз характеристик та розрахунки параметрів груп супутників.

Теоретичне та практичне значення: отримані математичні розрахунки зони покриття та затримки сигналу супутника LEO, дає можливість покращити швидкість передачі сигнали та підвищити продуктивність супутникових систем зв'язку.

Наукова новизна: Обґрунтовано метод передачі сигналу з мінімальною затримкою завдяки зміни кута супутника відносно земної поверхні та збільшення зони покриття сигналу завдяки розміщення супутників на певній висоті для більшого кута покриття земної поверхні.

Публікації: викладені в роботі результати обговорювались на XII Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 6-7 грудня 2023 року, теза наведена в додатку А.

Структура роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, викладених на 75 сторінках, списку використаних джерел з 28 назв на 4 сторінках, додатків на 3 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 72 аркушів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Супутникові системи зв'язку.

Супутники спеціально створені для телекомунікаційних потреб. Вони використовуються для мобільних застосувань, таких як зв'язок з кораблями, транспортними засобами, літаками, ручними терміналами, а також для телебачення та радіомовлення. Вони відповідають за надання цих послуг відповідному регіону (території) на Землі. Потужність і пропускна здатність цих супутників залежать від обраного розміру "відбитку", складності протоколів управління трафіком і вартості земних станцій.

Супутник працює найефективніше, коли передачі спрямовані на певну область. Якщо область сфокусована, то випромінювання не виходять за межі визначеної зони, тим самим мінімізуючи втручання в інші системи. Це призводить до більш ефективного використання спектру.

Антенні шаблони супутників відіграють важливу роль і повинні бути розроблені так, щоб найкраще покривати визначену географічну область (яка зазвичай має неправильну форму).

Супутники повинні бути розроблені з урахуванням їхньої придатності для короткострокового і довгострокового використання протягом їхнього життєвого циклу. Земна станція повинна мати можливість контролювати супутник у випадку, якщо він відхиляється від своєї орбіти або піддається будь-якому впливу ззовні.

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

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

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

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

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

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

1.2. Супутниковий інтернет на низькій орбіті

– Iridium Communications: Супутники першого покоління виведені з орбіти, але концепція низької орбіти залишається. Американська компанія пропонує телефонний зв'язок та інтернет із швидкістю 704 Кбіт/с.

– Viasat Inc.: Як один із світових лідерів супутникового зв'язку (через супутники на геостаціонарній орбіті), Viasat Inc. працює над проектом малих супутників, плануючи запуснути майже три сотні до 2026 року. Деякі вищі керівники висловлюють сумніви щодо необхідності таких програм та пропонують зосередитися на традиційному бізнесі компанії.

– Telesat: Компанія планує вислати групу з 298 супутників на низьку навколоземну орбіту до 2024 року. Проект фінансується владою Канади та приватними інвесторами. Telesat пропонує як традиційні рішення на високих орбітах, так і швидкісний проект Lightspeed.

– Project Kuiper: Компанія Джеффа Безоса розробляє власні супутники та планує вивести прототипи на орбіту до 2022 року. У рамках програми планується запуснути понад 3000 супутників, але терміни залежать від аерокосмічного проекту Blue Origin.

– OneWeb: Британська компанія до осені 2021 року запустила на орбіту понад 320 супутників, працюючи на висоті 1200 кілометрів. З 2020 року вони використовують російські ракети для запуску супутників. Продукція OneWeb спрямована на бізнес, а не на приватних клієнтів.

– SpaceX Starlink: Проект доступного для всіх супутникового інтернету існує з 2015 року і вивів на орбіту понад 1000 апаратів. Компанія Ілона Маска отримала дозвіл на вивід 12 тисяч супутників, що дозволить покрити всю планету єдиним зв'язком. В Азії існують кілька програм доступу до інтернету через супутники, але найбільш перспективною вважається інфраструктура для промисловості та Інтернету речей. Більшість проектів супутникового Інтернету не вплине на повсякденне життя звичайних користувачів Інтернету. Багато з

них розробляються для потреб промисловості, судноплавства або урядового зв'язку. Однак виділяється Starlink, який спочатку був задуманий для забезпечення доступу до Інтернету для населення, а не лише компаній.

1.3. Склад угруповання Starlink

Технологічні досягнення у сфері супутникових технологій в останньому столітті визначили початок створення інтегрованих супутниково-земних мереж. Зокрема, використання мікросупутників і наносупутників на низьких орбітах (LEO) стало активно розвиватися наприкінці минулого століття. Проекти таких мереж включають у себе групи супутників, такі як Iridium із 66 супутниками, OneWeb із 648 супутниками, а також ініціативи від Amazon, Telesat та інших компаній.

Однак особливо визначальну роль у цьому грав SpaceX, яка веде найбільш масштабний проект - угруповання Starlink. Це проект з використанням тисяч малих супутників LEO, розміщених у трьох оболонках, призначених для глобального покриття широкосмугового Інтернету. Це включає в себе інтеграцію з наземними станціями та організацію супутниково-земної мережі.

На момент 24 жовтня 2020 року SpaceX вже розмістила 893 супутники на низьких орбітах, а загальне планування включає розгортання практично 12 000 супутників. Трійку орбітальних оболонки розподілено так: перший ряд - 1440 на висоті 550 км, другий - 2825 на висоті 1110 км, третій - 7500 на висоті 340 км. Це стане можливим завдяки 72 орбітальним площинам з 20 супутниками кожна у першій оболонці, яка планується завершити до 2024 року.

Для ефективного функціонування супутникових мереж у LEO необхідно впроваджувати два типи наземних станцій: станції користувача та станції для контролю та обслуговування. Спілкування з користувачами передбачає встановлення низького кута підйому, і SpaceX подала запит до FCC для

зменшення цього кута з 40° до 25° . Додатково, для експлуатації супутників передбачено 32 наземні станції у Сполучених Штатах.

На 1 квітня 2020 року база даних активних супутників на орбітах Союзу занепокоєних вчених оголосила про 2666 супутників у космосі, включаючи 1918 на LEO. За участю SpaceX та інших компаній очікується значне збільшення кількості супутників, що обгортають землю неодмінно вплине на вигляд неба та призведе до його трансформації.

У контексті комунікаційної перспективи важливо відзначити, що розгортання супутникових мереж, таких як Starlink, є значним технологічним кроком для забезпечення рівних можливостей доступу до широкопasmового Інтернету для людей у всьому світі. Такий підхід спростить комунікацію з будь-якої точки планети, створюючи основу для глобальної взаємодії.

На прикладі картин, що символізують простоту та складність проекту Starlink, можна вбачити, як супутникові технології стають не лише зручними для користувачів, але й представляють складнощі, з якими необхідно буде зіткнутися у майбутньому. Зокрема, зображено можливість співіснування технологій із природним середовищем. З іншого боку, "Сузір'я Starlink" ілюструє велику кількість супутників, яка може вплинути на зовнішній вигляд неба.

Загалом, розвиток супутникових технологій у сфері LEO відкриває нові можливості для глобальної комунікації та забезпечення доступу до Інтернету, але водночас вносить виклики, пов'язані з впливом на природні системи та вигляд неба. Майбутні наукові дослідження та інновації будуть вирішувати ці питання та формувати подальший розвиток супутникових мереж в контексті їхнього впливу на наше оточення.

1.4. Площина горизонту дальність нахилу та затримка сигналу

Земельні станції (користувачі на землі) є складовою будь-якої супутникової мережі, призначеної для блокування/розблокування зв'язку з супутниками. Земельні станції можуть бути заблоковані для зв'язку з LEO-супутниками лише тоді, коли супутник знаходиться в їхньому районі видимості. Тривалість видимості визначає тривалість зв'язку (Цакай, 2009; Цакай та ін., 2011). Аналізуватиметься продуктивність щодо площини горизонту, нахилу, і відповідної затримки для зв'язку між станцією користувача та супутниками Starlink для різних супутникових орбітальних шарів (шарів).

На першому етапі для трьох шарів визначаються швидкість, період і кількість щоденних проходів, як показано в Таблиці 1. Кожна кругова орбіта характеризується своєю висотою H , відповідно до її радіуса r , взаємопов'язаними так:

$$r = H + R_E, \quad (1.1)$$

де $R_E = 6\,371$ км - радіус Землі. Швидкість супутника v в круговій орбіті є:

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{r}}, \quad (1.2)$$

де r - орбітальний радіус, а $\mu = M \cdot G = 3.986 \times 10^5$ км³/с² - константа, яка представляє собою добуток маси Землі та гравітаційної константи Землі (Річхарія, 1999; Цакай та Маларік, 2007). Період обертання орбіти виражається як:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{\mu}}, \quad (1.3)$$

і кількість щоденних проходів (n) - це відношення сидерального дня ($T = 23$ год 56 хв 4,1 с) до періоду обертання орбіти.

Орбітальна площина супутника в космосі визначається орбітальними параметрами, які в ідеальних умовах залишаються нерухомими відносно тіла Землі. Оскільки LEO літають дуже низько і, отже, мають короткий період пролітання, вони здійснюють кілька щоденних проходів над Землею за тими ж орбітальними параметрами.

Оскільки LEO літають у власній орбіті над Землею, Земля обертається навколо своєї вісі північ-південь під супутниковою орбітою. Через обертання Землі, земна станція на поверхні Землі змінює своє положення відносно просторової орбітальної площини, тому направлення від земельної станції (користувача) до супутника не ідентичне для різних щоденних проходів тієї ж самої орбіти.

Отже, вид супутника з земельної станції (користувача) різний для кожного щоденного проходу. Різні види супутника з боку користувача (земельної станції) означають різні тривалості видимості між користувачем та супутником, і відповідно різні тривалості зв'язку. Це є типовим для LEO-супутників. Загалом, з однієї земельної станції (точки розташування користувача) супутник в своїй орбіті бачиться по-різному під час різних проходів тієї самої орбіти, отже, кожен прохід LEO забезпечує різні тривалості зв'язку з відповідною точкою на землі (користувачем) (Цакай та Маларік, 2007). Це стосується будь-якої земельної станції (користувача) на поверхні Землі.

Геометричний опис, який надає просторовий вид між супутником та земельною станцією, наведено на рисунку 1.2 (Цакай, 2009; Цакай та ін., 2011). Горизонтальна площина розглядається як дотична площина (перпендикулярна) до вектора користувача (земельної станції) до центру Землі ($RE \rightarrow$). Сині еліпси на рисунку 1.2 представляють ідеальну горизонтальну площину, яку бачить користувач (земна станція - GS). Теоретично, кожна точка на поверхні Землі має власну горизонтальну площину, що означає, що з кожної точки на Землі LEO-супутник бачиться під різними кутами огляду. З точки зору

земельної станції (користувача), положення супутника в космосі в межах його орбіти визначається кутами азимута та елевації. Азимут - це кут напрямку супутника, виміряний в горизонтальній площині від географічного північного напрямку за годинниковою стрілкою, від 0° до 360° . Елевація - це кут між супутником і горизонтальною площиною користувача (земельної станції), від 0° до 90° (Цакай, 2009; Цакай та ін., 2011).

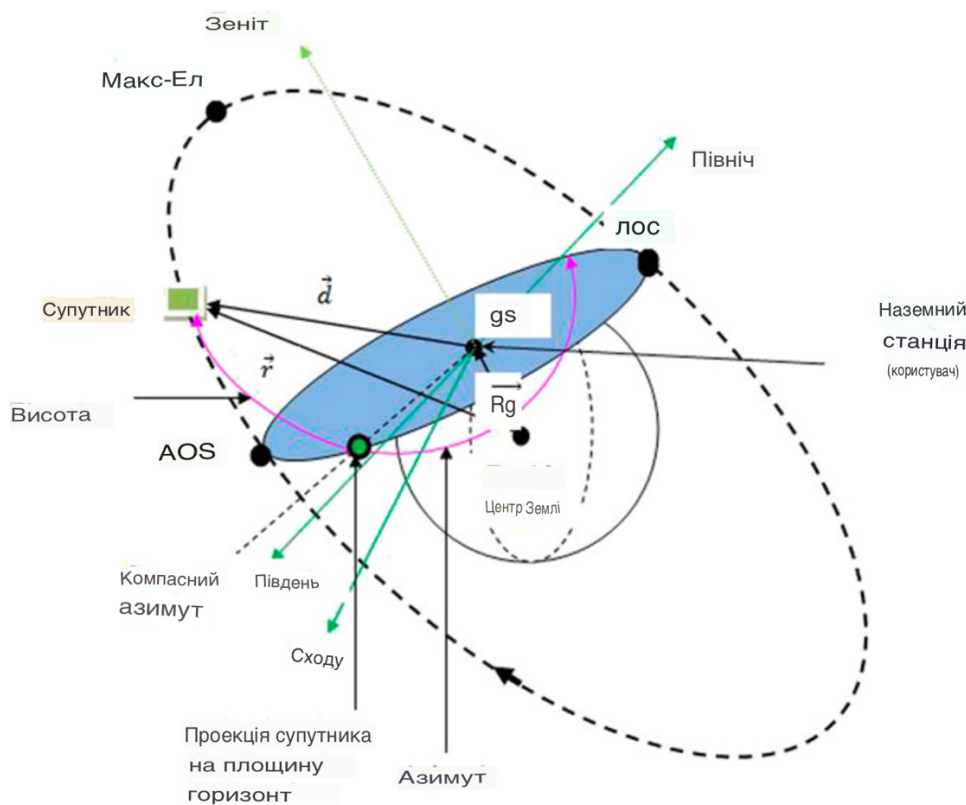


Рис.1.1. План горизонту та діапазон нахилу

На рисунку 1.1 показано, що зв'язок між LEO-супутником та користувачем блокується, коли супутник з'являється на горизонтальній площині користувача, і зв'язок розблоковується, коли супутник зникає з горизонтальної площини користувача.

Прохід супутника над земною станцією характеризується трьома типовими подіями, які відбуваються в такому порядку. По-перше, коли

супутник з'являється на горизонтальній площині, визначеній як подія Acquisition of the Satellite (AOS), це встановлює зв'язок з користувацькою станцією. Теоретично це відбувається при елевації 0° . Друга подія відбувається, коли супутник досягає максимальної елевації (Max-El) відповідного проходу супутника над станцією користувача. Третя подія відбувається, коли супутник зникає з горизонтальної площини, відомої як подія Loss of the Satellite (LOS), теоретично відбувається також при елевації 0° . Ці події на рисунку 1.2 позначені як AOS, Max-El та LOS.

Кожен прохід супутника над станцією користувача характеризується його максимальною елевацією (Max-El), баченою зі станції користувача (подія Max-El). Для проходу супутника від події AOS до події Max-El елевація збільшується (до Max-El), і від події Max-El до події LOS елевація симетрично зменшується. Очевидно, чим вищий кут на події Max-El, тим довший шлях супутника, і навпаки, чим нижчий кут Max-El, тим коротший шлях супутника. Коротший шлях супутника (менший Max-El) дозволяє коротший зв'язок з земельною станцією (користувачем), а довший шлях супутника (більший Max-El) дозволяє довший зв'язок. Загалом тривалість зв'язку між супутником і користувачем залежить від максимальної елевації (Max-El) з погляду користувача, з якої бачиться супутник.

Віртуальна лінія, що з'єднує супутник і земельну станцію на рисунку 3, представляє справжню відстань між супутником і земельною станцією (користувачем), відому як вектор нахилу $d \rightarrow$ між супутником і земельною станцією (користувачем). Нахил (модуль вектора $d \rightarrow$) між земельною станцією і LEO-супутником залежить від максимальної елевації (Max-El) траєкторії супутника над земельною станцією (користувачем).

1.5. Геостаціонарна орбіта

Геостаціонарна орбіта - це орбіта, в якій супутник обертається навколо Землі точно з такою самою швидкістю, як і Земля обертається, і на тій самій широті, а саме нульовій, широті екватора. Супутник, який обертається в геостаціонарній орбіті, здається знаходитися над тією самою точкою на небі і прямо над тією самою ділянкою землі в будь-який момент часу.

Геосинхронна орбіта - це орбіта, в якій супутник синхронізований з обертанням Землі, але орбіта нахилена відносно площини екватора. Супутник в геосинхронній орбіті буде коливатися вгору та вниз по широті, хоча залишиться над тією самою лінією довготи. Хоча терміни "геостаціонарний" та "геосинхронний" іноді використовуються взаємозамінно, технічно вони не є ідентичними; геостаціонарна орбіта - це підмножина всіх можливих геосинхронних орбіт.

Особа, якій насамперед приписують розвиток концепції геостаціонарних орбіт, - відомий автор наукової фантастики Артур С. Кларк (автор творів "Острови в небі", "Завершення дитинства", "Зустріч з Рамою" та фільму "2001: Космічна одісея"). Інші раніше вказували, що тіла, які подолають певний відстань над Землею на екваторіальній площині, залишатимуться нерухомими відносно поверхні Землі. Але Кларк опублікував статтю у "Wireless World" у 1945 році, яка зробила крок від ракетних досліджень німців до ідеї створення постійних штучних супутників, які могли б служити комунікаційними реле.

Геостаціонарні об'єкти на орбіті повинні бути на певній відстані від Землі; ближче, і орбіта розпадеться, а далі - вони вийдуть з земної гравітації. Ця відстань становить 35 786 кілометрів (22 236 миль) від поверхні Землі.

Перший геосинхронний супутник був запущений у 1963 році, а перший геостаціонарний - наступного року. Оскільки є тільки одна геостаціонарна орбіта в площині з екватором на відстані 35 786 кілометрів, існує лише один круг довкола світу, де виконуються ці умови.

Це означає, що "нерухома власність" геостаціонарна - це обмежене поняття. Хоча супутники наразі не загрожують один одному, їх повинні розташовувати вздовж кола так, щоб їхні частоти не втручалися в роботу найближчих сусідів.

Геостаціонарні супутники. Є два види штучних супутників на небі: один вид супутника обертається навколо Землі один або два рази на день, інший вид називається комунікаційним супутником, і він розташований в стаціонарному положенні на відстані 22 300 миль (35 900 км) над екватором стаціонарної Землі.

До типу обертового супутника входять космічний шаттл і міжнародна космічна станція, які обертаються на низькій земній орбіті (НЗО), щоб уникнути смертельних поясів ван-Аллен.

Найвідоміші супутники на середній земній орбіті (СЗО) - це супутники, які складають систему глобального позиціонування або GPS, як її називають. Система глобального позиціонування

Система глобального позиціонування була розроблена військами США і потім відкрита для цивільного використання. Вона використовується сьогодні для відстеження літаків, кораблів, потягів, автомобілів або буквально будь-чого, що рухається. Кожен може придбати приймач і відстежувати своє точне місцезнаходження за допомогою приймача GPS.

Ці супутники рухаються навколо Землі із швидкістю приблизно 7 000 миль на годину (11 200 км/год). Супутники GPS живляться сонячною енергією. У них є резервні батареї на борту, які тримають їх в роботі в разі сонячного затемнення, коли немає сонячної енергії. Невеликі ракетні прискорювачі на кожному супутнику допомагають їм летіти по правильній траєкторії. Супутники мають термін служби приблизно 10 років, доки вся їхня паливе не вичерпається.

На точній відстані 22 300 миль над екватором сила тяжіння компенсується центробіжною силою обертання всесвіту. Це ідеальне місце для розташування стаціонарного супутника.

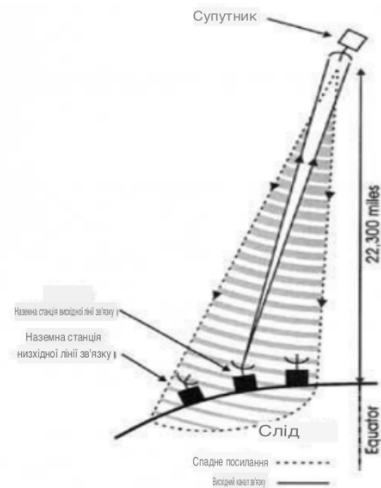


Рис. 1.2.: Супутник на відстані 35 900 км над екватором

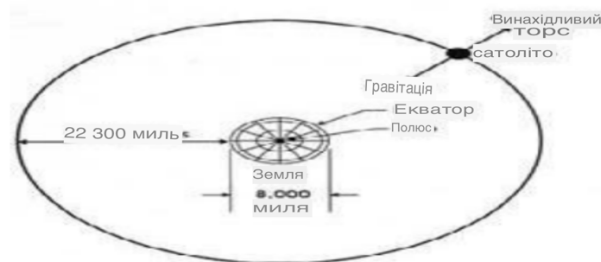


Рис. 1.3. Сила тяжіння Землі компенсується центробіжною силою обертання всесвіту.

1.6. Геометрична інтерпретація та її підтвердження

Додатково, всі вищезазначені обговорення та результати застосовані для геометричної інтерпретації та підтвердження процесу передачі-прийому (відомого як передача) між двома супутниками на низькій орбіті (LEO), з метою досягнення глобального покриття та неперервності надання послуг у реальному часі.

Для відстеження супутників використовується програмне забезпечення у реальному часі, яке отримує дані з елементів Кеплера. Відповідне програмне забезпечення надає інформацію з відстеження, яку зазвичай відображають в різних режимах (вигляд супутника, радіо-карта, табличний і т. д.). Режим "радіо-карти" додатково розглядається для призначеної геометричної інтерпретації процесу передачі-прийому. Режим "радіо-карти" включає точний шлях супутника з урахуванням земельної станції, розташованої в центрі, як показано на Рис. 1.4.

Коло зовнішнього периметра представляє горизонт користувача, з півночі ($Az = 0^\circ, 360^\circ$), далі схід ($Az = 90^\circ$), південь ($Az = 180^\circ$) та захід ($Az = 270^\circ$). Користувач розташований у центрі горизонтальної площини. Три концентричні кола представляють різні висоти: 0° , 30° та 60° . У центрі висота становить 90° . Площина з висотою 0° відображає ідеальну горизонтальну площину. Більшість параметрів програмного забезпечення, які визначають рух супутника відносно користувача, включають: AOS_{time} —Час знаходження супутника в полі зору (час), LOS_{time} —Час виходу супутника з поля зору (час), AOS_{Az} —Час знаходження супутника в полі зору (азимут), LOS_{Az} —Час виходу супутника з поля зору (азимут) і $Max\ El$ —Максимальна висота (Сакаї et al., 2011; Сакаї et al., 2014). Для супутників на низькій орбіті (LEO) максимальна висота є основним параметром, що визначає час знаходження супутника над станцією користувача та визначає тривалість зв'язку між супутником на низькій орбіті та відповідною станцією користувача. Горизонтальна площина з визначеною мінімальною висотою вважається проектованою горизонтальною площиною. Для супутників Starlink проектована горизонтальна площина для користувачів визначається на 40° і позначена товщиною чорного кола, вказаною як 40° на Рис. 1.4.

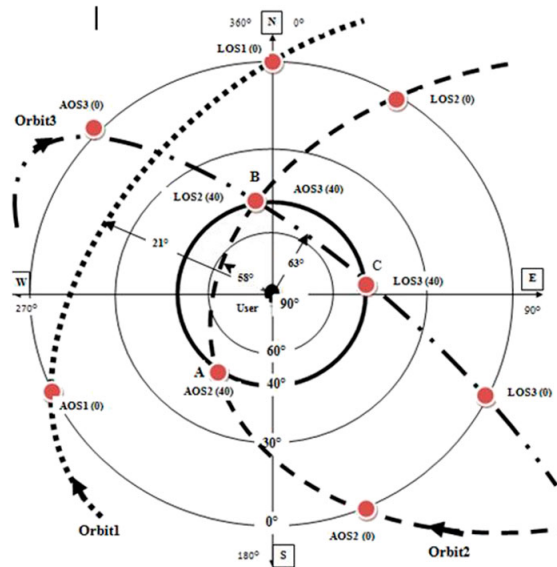


Рис.1.4. Геометрична інтерпретація процесу передачі-прийому

Для інтерпретації та підтвердження було вибрано три випадкові орбіти під назвами Orbit1, Orbit2 та Orbit3, разом із відповідними супутниками для кожної з них. Для кожної орбіти надається стрілка, яка ідентифікує напрямок руху супутника, бачений з боку користувача. Користувач розташований у центрі. На кожній орбіті визначаються точки отримання супутника (AOS) та втрати супутника (LOS) в космосі. Оскільки це лише геометричний підхід, час як змінна не розглядається. Отримання та втрата супутників розглядаються для ідеальної горизонтальної площини при (0°) та для проектованої горизонтальної площини при (40°), позначених як AOS(0), AOS(40) і LOS(0), та AOS(40) відповідно. Ці події в космосі визначаються азимутом та висотою. Кожен з трьох проходів визначається власною максимальною висотою та відповідним азимутом. Для всіх точок, вказаних на Рис. 1.3, координати подаються в Таблиці 1.1 у вигляді пар азимута та висоти [Az° , El°]. Значення витягуються та апроксимуються з Рис. 1.3, оскільки орбіти вибрані випадковим чином.

Таблиця координатів

Висота горизонтальної площини	Перший шар H=550 км C(%)	Другий шар H=1,110км C(%)	Третій шар H=340км C(%)
Ідеальний: 0°	4.003	7.461	2.55
Розроблено при: 25°	0.560	1.614	0.247
Розроблено при: 30°	0.394	1.185	0.175
Розроблено при: 35°	0.283	0.885	0.121
Розроблено при: 40°	0.206	0.657	0.088

Супутник, рухаючись по Орбіті 1, з'являється на ідеальній горизонтальній площині користувача приблизно на азимуті 240° із висотою 0° , відзначаючись як подія AOS1(0). Супутник піднімається, досягаючи максимальної висоти в 21° (при $Az = 305^\circ$), а потім опускається до події LOS1(0) за координатами $[360^\circ, 0^\circ]$, зникаючи з ідеальної горизонту користувача. Комунікації між користувачем та цим супутником не відбулися, оскільки супутник завжди перебуває нижче проєктованої горизонтальної площини користувача при 40° ($21^\circ < 40^\circ$) і, відповідно, не заблоковані. Таким чином, цей супутник віддаляється від користувача непомічений. Цей факт пояснює результат "NA" (не застосовується) для подій AOS(40) та LOS(40) для Орбіти 1.

Супутник, що рухається по Орбіті 2, з'являється на ідеальній горизонтальній площині користувача приблизно на азимуті 160° із висотою 0° , відзначаючись як подія AOS2(0), але не заблокований користувачем. Супутник піднімається до події AOS2(40) за координатами ($Az = 220^\circ, 40^\circ$), де супутник блокується з користувачем, встановлюючи зв'язок. Відстань між супутником та користувачем на цьому етапі становить 809,5 км (Таблиця 2). Супутник рухається вгору до події Мах E1 за координатами ($Az = 310^\circ, 58^\circ$), все ще знаходячись у зв'язку і будучи найближчим на відстані 641,4 км. Супутник опускається, продовжуючи спілкування, до події LOS2(40) за координатами ($Az = 345^\circ, 40^\circ$), знову маючи дальність 809,5 км. На цьому етапі супутник покидає проєктовану горизонтальну площину користувача і розблоковує зв'язок.

Супутник рухається далі до події LOS2(0) за координатами ($Az = 30^\circ, 0^\circ$) і

залишає ідеальну горизонтальну площину користувача. Для подальших цілей події AOS2(40) та LOS2(40) позначаються відповідно як А та В. Таким чином, протягом Орбіти 2 користувач і супутник спілкувалися від точки А до В, із зміною відстані від 641,4 до 809,5 км, відповідно односторонній затримці сигналу від 2,13 до 2,69 мс.

Супутник, який рухається по Орбіті 3, з'являється на ідеальній горизонтальній площині користувача приблизно на азимуті 315° із висотою 0° , відзначаючись як подія AOS3(0), але не заблокований користувачем. Супутник піднімається до події AOS3(40) за координатами ($Az = 345^\circ, 40^\circ$), де супутник блокується з користувачем, встановлюючи зв'язок. Відстань між супутником та користувачем на цьому етапі становить 809,5 км (Таблиця 2). Супутник рухається вгору до події Max E1 за координатами ($Az = 30^\circ, 63^\circ$), все ще знаходячись у зв'язку і будучи найближчим на відстані 611,2 км. Супутник опускається, продовжуючи спілкування, до події LOS3(40) за координатами ($Az = 85^\circ, 40^\circ$), знову маючи дальність 809,5 км. На цьому етапі супутник покидає проєктовану горизонтальну площину користувача і розблоковує зв'язок. Супутник рухається далі до події LOS3(0) за координатами ($Az = 125^\circ, 0^\circ$) і залишає ідеальну горизонтальну площину користувача. Для подальших цілей події AOS3(40) та LOS3(40) позначаються відповідно як В та С. Таким чином, протягом Орбіти 3 користувач і супутник спілкувалися від точки В до С, із зміною відстані від 611,2 до 809,5 км, відповідно односторонній затримці сигналу від 2,03 до 2,69 мс.

Користувач взаємодіяв з супутником в Орбіті 2 від точки А до В. Той самий користувач взаємодіяв з супутником в Орбіті 3 від точки В до С. Точка В вказує на втрату зв'язку з супутником в Орбіті 2 з користувачем горизонтальною площадкою, а також на отримання зв'язку з супутником в Орбіті 3 через дизайнову користувачем горизонтальну площадку [подія AOS 3(40)]. Якщо супутник в Орбіті 2 може взаємодіяти за допомогою між супутникового протоколу з супутником в Орбіті 3 у цей момент (зоні), встановлюється процес передачі-прийому між супутниками в Орбіті 2 та Орбіті

З, що забезпечує неперервний зв'язок між користувачем і констеляцією від точки А до С. Таким чином, процес передачі-прийому в точці В забезпечує неперервність послуг для користувача та утримує зв'язок від А до С. Ця геометрична інтерпретація підтверджує неперервність послуг двома супутниками. Те саме стосується і більше їх.

Це високоорганізований і синхронізований процес (інтерпретація цього буде моєю наступною роботою). Для полегшення процесу передачі-прийому області покриття супутників у низькоорбітальному ряду (зона близько 1 мільйона км²) перекриваються на кілька градусів; саме ці перекриті зони використовуються для процесу передачі-прийому. Для цього процесу супутники повинні бути прилеглими один до одного і мати можливість взаємодіяти між собою (Сакаї et al., 2010b). Для наочності процесу передачі-прийому в космосі припустимо, що цей процес відбудеться на 39° висоті для супутника в Орбіті 2 (лише за 1° до виходу з дизайнованої користувачем горизонтальної площадки) і на 41° висоті для супутника в Орбіті 3 (лише за 1° до входу в дизайновану користувачем горизонтальну площадку). Різницю у 2° забезпечено перекриттям. Чи можуть ці два супутники взаємодіяти між собою для забезпечення процесу передачі-прийому між супутником в Орбіті 2 та супутником в Орбіті 3. Під 39° для користувача супутник в Орбіті 2 знаходиться на відстані 827.9 км, готовий до процесу передачі-прийому та готовий залишити дизайновану користувачем горизонтальну площадку. З іншого боку, супутник в Орбіті 3 на висоті 41° знаходиться на відстані 800.6 км від користувача, готовий увійти в дизайновану користувачем горизонтальну площадку і самостійно взяти на себе зв'язок від супутника в Орбіті 2. На цих позиціях ці супутники можуть взаємодіяти. Застосовуючи косинусове правило, виявляється, що вони досить далеко один від одного, приблизно на 40 км в космосі, тому вони можуть легко взаємодіяти між собою, забезпечуючи процес передачі-прийому. Зрештою, це є геометричне підтвердження процесу передачі-прийому, що підтверджує неперервність послуг в реальному часі за

допомогою супутників, включаючи широкосмугові світові інтернет-послуги, які є основною метою Starlink.

Параметри руху супутника, нахил, параметри горизонтального виду та покриття для легкого порівняння. Параметри, залежні від висоти, розглядаються при заданій висоті $\epsilon_0 = 40^\circ$.

1.7. Висновки до розділу 1

В даному розділі було описано основні поняття про супутниковий зв'язок, як працює супутниковий інтернет і які існують актуальні проекти на низькій орбіті. Також описано площу горизонту і наведені основні формули для визначення площини горизонту і дальності нахилу та затримки сигналу. На завершення розділу було опрацьовано і наведено геометричну інтерперенцію та її підтвердження.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Система супутникового інтернету Starlink.

Starlink був обраний в якості модельного угруповання, оскільки це добре вивчена мегаконстеляція, яка відповідає нашому робочому опису угруповання супутників. Starlink - це мегаконстеляція низькоорбітальних інтернет-супутників, в якій тисячі супутників обмінюються даними для забезпечення інтернету з низькою затримкою. Ці міжсупутникові зв'язки (ISL) роблять Starlink мережею взаємодіючих супутників, які спільно працюють як розподілена система, і інтернет-зв'язок, забезпечений Starlink, є виниклим властивостями системи. Starlink також цікава як модельне угруповання, оскільки зауважено, що вона внесла свій вклад у питання щодо сталості космосу та втручання у земне астрономічне спостереження. ISL між супутниками Starlink та відповідна топологія мережі, так само як технічна та економічна продуктивність її інтернет-мережі. Супутники Starlink були розгорнуті партіями приблизно по 60 супутників за раз за допомогою ракетно-носія SpaceX Falcon 9 постійно з 2019 року, і на даний момент в космосі перебуває 1669 супутників. Щоб досягти великої частоти запуску, необхідної для реалізації повної констеляції з 32 000 супутників, супутники пласко-пакуються для запуску.

2.2. Моделювання Starlink

Для надання початкових позицій для симуляцій кооперативної локалізації було створено модель Starlink з використанням мови програмування Python. Угруповання складалось з 1584 супутників у низькій земній орбіті на висоті 550 км, що відповідає Фазі 1 констеляції Starlink. Параметри цієї орбіти наведено в

таблиці 2.1. Агенти угруповань супутників рухаються по простим круговим Кеплерівським орбітам в ідеалізованій двоохтіловій системі, ігноруючи відхилення, такі як аеродинамічний опір чи ефект J2. Цей набір даних був опублікований на IEEE DataPort™ як набір даних з відкритим доступом, а код був оприлюднений на GitHub 3. Орбіти були прогнозовані за допомогою вбудованої функції Polastro twobody.propagation.vallado, яка прогнозує орбіти за допомогою реалізацій алгоритмів. Цей метод також виводить положення та швидкість кожного супутника в декартових координатах.

Ідентифікація супутників: Відповідно до методології Chaudhry & Yanikomeroğlu, кожен супутник Starlink має унікальний ідентифікатор у форматі sXXYYU, де XX - це номер площини, а YYU - номер супутника. Наприклад, перший супутник у першій площині має ідентифікатор s01001.



Рис. 2.1.: Супутники Starlink перед їх розгортанням з ракети-носія SpaceX Falcon 9.

Щоб досягти великої частоти запуску, необхідної для побудови всієї констеляції, приблизно по 60 супутників Starlink запускають за один раз.

Опорна система координат для положень і швидкостей симульованих супутників мегаконстеляції - це Геоцентрична Селестіальна Опорна Система (GCRS) з параметрами за замовчуванням, показаними в Таблиці в пункті 2.1. Супутник s01001 має початкове положення $[a, 0, 0]$, де a – наполовину велика вісь орбіти.

Таблиця 2.1.

Параметри моделювання

Параметр	Значення
Кількість часових кроків	573
ΔT	10 секунд
T	5730 секунд

В Таблиці 2.1 наведено довжину кроку в часі де: (ΔT), загальний час (T), а також кількість часових кроків, використаних для створення ефемерид для мегасузір'я Starlink. Загальна тривалість симуляції дорівнює одному орбітальному періоду супутника Starlink.

Параметри, які використовуються для запуску моделювання, де T – загальний час моделювання та ΔT це тривалість одного тимчасового кроку. Код, який використовується для створення набору даних ефемерид Starlink, можна легко модифікувати для створення ефемерид для інших мегасузір'їв, таких як OneWeb або Kuiper, і є загальнодоступним за дозвоільною ліцензією MIT за адресою це посилання. У цьому коді є деякі

Однак існують обмеження:

– Незважаючи на спільний дизайн констеляції, ефемериди симульованих супутників не обов'язково відображають фактичні орбітальні положення супутників Starlink.

– Симульована мегаконстеляція складається з одного шару супутників з однаковою висотою, тоді як запропоновані мегаконстеляції в кінці кінців складатимуться з декількох шарів.

– Орбітальні відхилення, такі як ефект J2 або аеродинамічний опір, не враховуються.

Дані ефемерид мають формат, показаний в таблиці 2.2. Дані були експортовані з Pandas DataFrame з багаторівневим індексуванням, і перші дві колонки файлу .csv - це індекси для кожного окремого супутника та кожного окремого мітки часу.

Таблиця 2.2.

Орбітальні параметри модельного угруповання

Параметри орбіти модельного угруповання		
Параметр	Значення	Примітки
Висота, км	550	LEO
Кількість слітаків	72	Оновлено з 50
Супутників та літаків	22	Оновлено з 50
Нахил, і	53	
Орбітальний період, T	1.59	
Загальна кількість супутників	1584	

Припущено, що орбітальні площини рівномірно розташовані, так само, як і супутники в межах кожної площини. Зверніть увагу, що числа відрізняються від тих, які представлено, оскільки вони були оновлені для відображення найновіших планів Starlink на основі інформації у поданні Федеральної комісії зв'язку (FCC), датованого 17 квітня 2020 року.

Таблиця 2.3.

Системи відліку моделювання

Параметри	Значення
Час спостереження	J2000.000
Положення спостерігача відносно барицентру	[0,0,0]м
Швидкість спостерігача відносно барицентру	[0,0,0]м

В таблиці 2.3. наведено параметри опорної системи координат, використаної для створення ефемерид для мегаконстеляції Starlink.

2.3. Мережа Starlink

У кінцевому підсумку Starlink буде пов'язаний оптичними міжсупутниковими зв'язками, що дозволить системі передавати інформацію та переносити інтернет-трафік, але інформації про цю систему, доступної публіці, майже немає. Щоб визначити, які зв'язки були можливі в мережі між супутниками, ми враховували три обмеження: видимість, дальність і обмеження апаратного забезпечення. Кожне обмеження описано докладно нижче, а обмеження лінії видимості ілюстровано на рисунку 2.2.

– Видимість: Також відома як лінія видимості (LOS), члени угруповання можуть встановлювати зв'язки один з одним лише в тому випадку, якщо вони видимі один для одного. На рисунку 2.2а показано, як затінення центральним тілом впливає на цю ситуацію в низькій земній орбіті, режиму орбіт, який ми використовуємо для прикладу Starlink. В низькій земній орбіті присутність центрального тіла обмежує максимальну довжину зв'язку до 5016 км, припускаючи, що іоносфера повністю непрозора до висоти 80 км, як показано на рисунку 2.2б.

– Апаратне забезпечення: Дальність і LOS накладають фізичні обмеження на потенційні зв'язки, але сам дизайн супутників також впливає на можливість встановлення зв'язків. У Starlink, наприклад, кількість лазерних зв'язків, яку може підтримувати кожен супутник, на практиці обмежується кількістю оптичних голівок на кожному супутнику.

– Дальність: Відстань між агентами супутникових угруповань визначає, чи можуть вони встановити зв'язок.

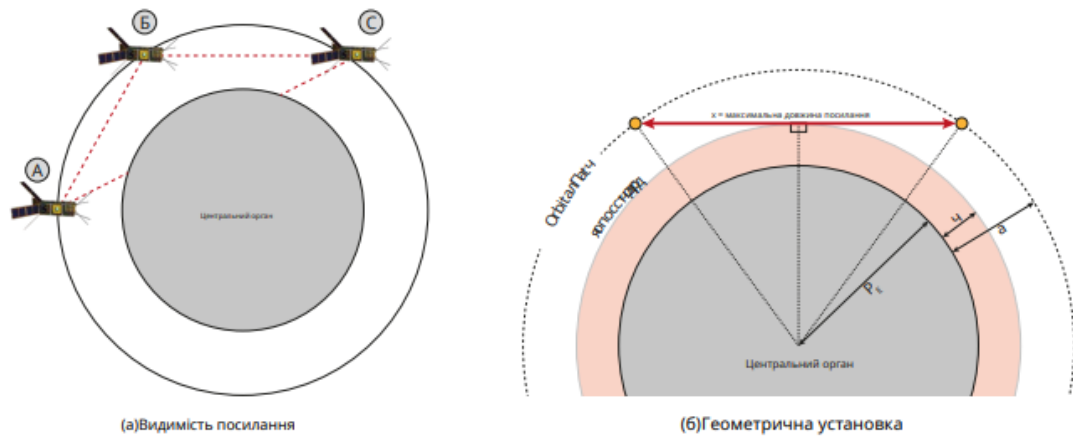


Рис. 2.2. Геометричні обмеження через центральне тіло для угруповання супутників в низькій земній орбіті.

На рисунок 2.2а показано, як лінія видимості (LOS) впливає на наявність центрального тіла. Агенти угруповань А і С можуть створити зв'язки з проміжним агентом В, але не можуть створювати зв'язки один з одним. Рисунок 2.2b показує геометричну конфігурацію для визначення того, як радіус Землі (RE) та висота іоносфери (h) встановлюють верхню межу дальності зв'язку LOS в низькій земній орбіті на висоті a. Проста геометрія дає максимальну довжину зв'язку $x = 2\sqrt{(RE + a)^2 - (RE + h)^2} = 5016$ км.

Топологія мережі Starlink - форма мережі між супутниками - визначається тими супутниками, які пов'язані, з урахуванням фізичних обмежень видимості і дистанції та технічних обмежень самих супутників. Цей вибір може бути оптимізований інноваційним дизайном мережі, з урахуванням часу, необхідного для встановлення зв'язків, а також виклику отримання та відстеження зв'язків між супутниками на перетинаючись орбітальних площинах. У автори класифікують і аналізують часово-змінні зв'язки, доступні в констеляції Starlink. Схожий аналіз, використовуючи найновішу орбітальну конфігурацію мегаконстеляції Starlink, показано на рисунках 2.3 і 2.4. Як показують результати, найбільша кількість можливих з'єднань відбувається приблизно на середніх широтах близько 60° .

Орбітальна динаміка констеляцій LEO означає, що кількість міжсупутникових зв'язків, які може встановити один супутник, змінюється протягом орбіти. Це є фундаментальним наслідком орбіт LEO, на яких супутники рухаються приблизно зі швидкістю 27 000 миль на годину.

Для розрахунку CRB для Starlink ми припускаємо топологію "Plus Grid" (+Grid), в якій супутники з'єднані з 4 сусідніми супутниками - двома в одній орбітальній площині і двома в сусідніх площинах, як описано в. Це показано на рисунку 2.5a для повної мережі Starlink. Рисунок 2.5b показує топологію "+Grid" для одного супутника, і ця топологія мережі використовується протягом всього цього розділу.

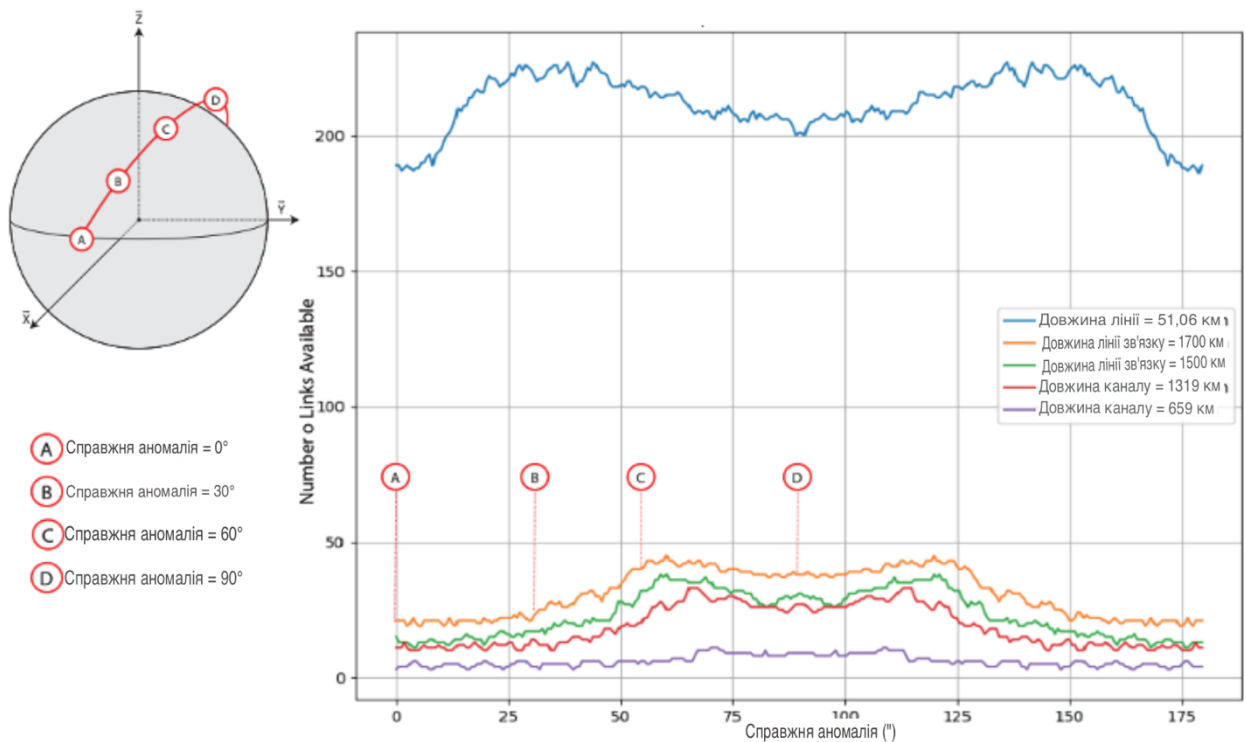


Рис. 2.3. Графік часово-змінної кількості зв'язків в кожній точці

Виділені в різних точках орбіти для максимальної довжини зв'язку 1700 км. Графік часово-змінної кількості зв'язків в кожній точці показано на рисунку 2.3. Знімки ідентифіковані за справжньою аномалією супутника, показаного червоним, об'єктом угруповання супутників s01001. З'єднані супутники

позначені синім кольором. Рисунок демонструє той самий результат, що й Рисунок 2.3., а саме, що кількість можливих з'єднань у фазі 1 Starlink найбільша при широтах приблизно 60° і найменша вище екватора.

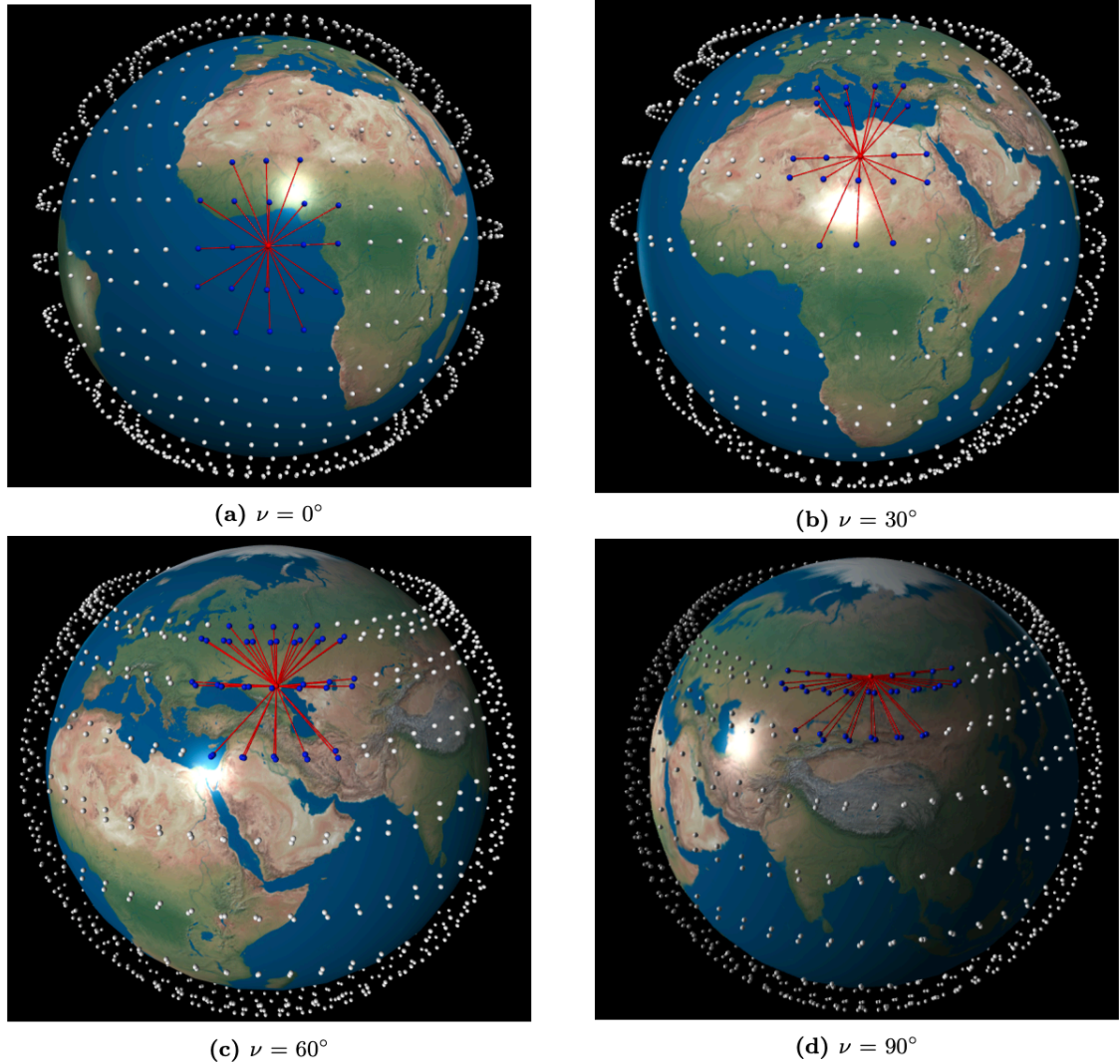


Рис. 2.4. Можливі з'єднання в мережі Starlink,

Графік кількості можливих зв'язків проти справжньої аномалії для об'єкта угруповання s01001 з різноманітням максимальних довжин зв'язку від 659 км до 5016 км. Знімки A-D відображені на рисунку 2.4. Орбітальна динаміка Starlink означає, що кількість можливих з'єднань сильно змінюється з часом. Як показує графік, найбільша кількість можливих з'єднань відбувається на середніх

широтах близько 60° , і, очікувано, більша максимальна довжина зв'язку призводить до більшої кількості можливих з'єднань.

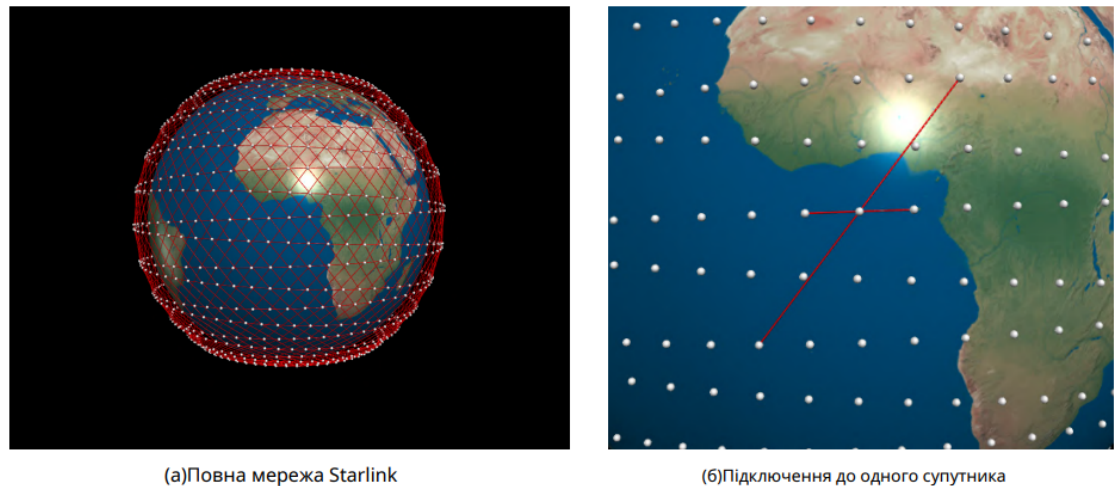


Рис. 2.5. Повна мережа мегаконстеляції Starlink за умови топології "+grid".

На рисунку 2.5а показано повну мережу, яка складається з повторюваних патернів, як показано на рисунку 2.5b. Ця мережа передбачає, що кожен супутник обмежений чотирма з'єднаннями через обмеження обладнання.

2.4. Розрахунок межі Крамера-Рао для Starlink

З визначеними позиціями, мережею та місцезнаходженням анкерів для Starlink Phase 1 тепер можна розрахувати межу Крамера-Рао для мегаконстеляції. Математична основа - розширення тієї, що використовується в пункті 2.5, але на відміну від однієї великої матриці Фішера для всієї констеляції, ми розраховували окрему матрицю Фішера для кожного супутника Starlink на кожному кроці часу. Цей вибір зменшив час виконання симуляції, зменшивши розмір матричного обертання, необхідного для розрахунку межі

Крамера-Рао, що вимагає значних обчислювальних ресурсів. Вибір обчислення окремих матриць Фішера також більш прийнятний для розподілених систем, таких як мегаконстеляції супутників. Припускаючи вимірювання ТОА, формули, використовувані для розрахунку межі Крамера-Рао для одного супутника Starlink з позицією $[x, y, z]$, такі:

$$F = \gamma \begin{bmatrix} F_{xx} & F_{xy} & F_{xz} \\ F_{xy}^T & F_{yy} & F_{yz} \\ F_{xz}^T & F_{yz}^T & F_{zz} \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

Де:

$$F_{xx} = \sum_{i \in H(k)} (x - x_i)^2 / d_i^S, \quad (2.2)$$

$$F_{yy} = \sum_{i \in H(k)} (y - y_i)^2 / d_i^S, \quad (2.3)$$

$$F_{zz} = \sum_{i \in H(k)} (z - z_i)^2 / d_i^S, \quad (2.4)$$

$$F_{xy} = \sum_{i \in H(k)} (x - x_i)(y - y_i) / d_i^S, \quad (2.5)$$

$$F_{xz} = \sum_{i \in H(k)} (x - x_i)(z - z_i) / d_i^S, \quad (2.6)$$

$$F_{yz} = \sum_{i \in H(k)} (y - y_i)(z - z_i) / d_i^S, \quad (2.7)$$

де d_i - це відстань між супутником Starlink і підключеним вузлом і з позицією $[x_i, y_i, z_i]$, а $H(k)$ складається з чотирьох підключених супутників у мережі +Grid, а також будь-яких земних станцій, що знаходяться в зоні зв'язку.

Обертаючи матрицю Фішера F , отримуємо матрицю Крамера-Рао (CRB), діагоналі якої представляють найкращі досяжні дисперсії місцезнаходження по координатах x , y та z . Для генерації єдиного показника якості обчислювальної точності, значення квадратичної середньої похибки (RMSE) межі локалізації обчислювалося за допомогою відношення:

$$CRLB_{RMSE} = \left(\frac{1}{\pi}\right) \text{tr}F^{-1})^{1/2}. \quad (2.8)$$

Для обчислення миттєвого CRB для всіх супутників Starlink необхідно було обчислити та інвертувати матрицю Фішера для 1584 супутників на кожному з 573 часових кроків - загалом 907,632 матриці. Для отримання єдиної цифри якості, використовувалася рівняння 2.8 для визначення CRB RMSE. Обчислення CRB для Starlink протягом повного періоду обертання $T = 5730$ секунд дає результати, показані на Рисунку 2.9. Середнє значення RMSE позначено пунктирною чорною лінією і має досить сталий показник приблизно 10,15 м. Значення CRB змінюється від максимального значення 36,5 м до мінімального приблизно 2 м. Рисунок 2.6 також показує CRB для одного супутника (s01001) протягом його орбітального періоду. Значення в основному близьке до середнього, але має дві виразні вершини при $t = 1430$ та $t = 4300$ секунд. Також помітний спад значення при $t = 4750$. Ці три ситуації (позначені як А, В та С).

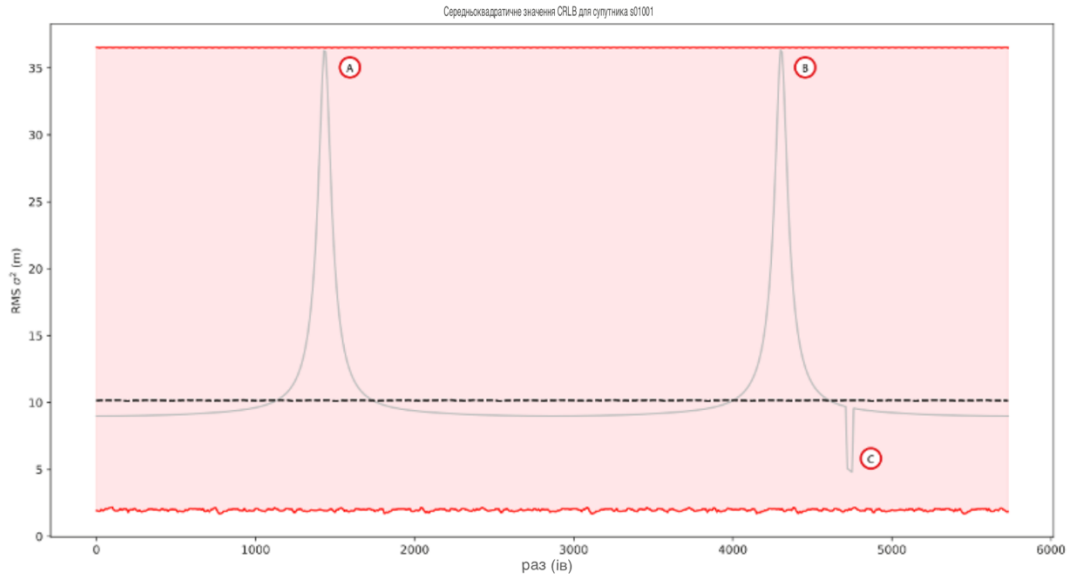
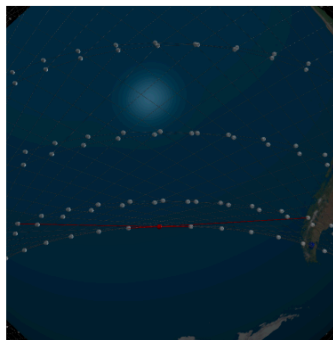


Рис. 2.6. Середній CRB для сукупності супутників Starlink

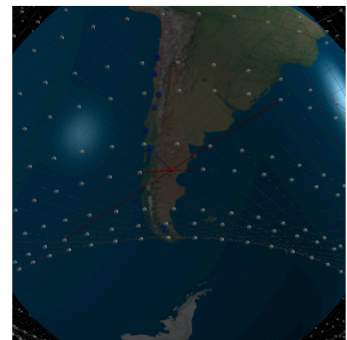
Середній CRB для сукупності супутників Starlink показаний пунктирною чорною лінією і вказує, що супутники Starlink можуть бути локалізовані в середньому з точністю до 10,15 метрів. Заштрихована червона область вказує на діапазон між максимальним (36,5 м) та мінімальним (2 м) значеннями CRB. CRB для супутника s01001 показано сірим кольором і має виражені вершини (позначені як А і В) та яр.оз (позначений як С). Використовуючи s01001 як посилення, результати вказують, що можливо локалізувати супутники в межах менше ніж 10 метрів для більшості його орбіт. Позиція s01001 відтворена в Розділі 2.4.



(a) Situation A, $t=1430$ s



(b) Situation B, $t=4300$ s



(c) Situation C, $t=4750$ s

Рисунок 2.7. Знімки супутника s01001 в симуляції Starlink у часи

Для ситуації А, у час $t=1430$ с, супутник s01001 знаходиться на найвищому широті своєї орбіти. Ситуація В, у час $t=4300$ с, супутник знаходиться на своєму найнижчому широті. Ситуація С показує, що супутник s01001 перетинає Т'єрра-дель-Фуєго на південному кінці Чилі. У кожній ситуації з'єднання між супутником s01001 та іншими вузлами (включаючи земні станції) показані червоним (синім) кольором. Ці три ситуації відповідають екстремумам в CRB для супутника s01001.

Огляд пункту 2.7 та Рисунку 2.10, а також графіків треків, показаних на Рисунку 2.11 та Рисунку 2.12, дозволяє нам інтерпретувати вершини та яри в CRB для супутника s01001. Ситуації А та В виникають, коли супутник знаходиться на найвищому і найнижчому широті своєї орбіти. Геометричне розміщення з'єднань з іншими супутниками менше рівномірно розподілене, ніж для решти орбіти. Це призводить до ефекту, схожого на розрідження точності в глобальних супутникових системах позначення, де вирівняні супутники призводять до менш точної позиції. Рисунок 2.7 розкриває причину нижчого CRB в ситуації С - коли супутник s01001 перетинає над земною станцією на південному заході Чилі, з'єднання з земною станцією надає більше інформації, знижуючи значення CRB.

Прохід s01001 над земною станцією показано більш детально на рисунку 2.8, який відображає трек над Т'єрра-дель-Фуєго та детальний графік CRB для s01001. CRB падає приблизно на 50%, як тільки він знаходиться в зоні зв'язку з земною станцією в Пуерто-Монт. Хоча CRB зменшується через підключення до земної станції, основний тренд в CRB залишається незмінним. Цей тренд зумовлений змінюваною геометрією мережі Starlink і може бути помічений у поступовому зменшенні графіка CRB для s01001, навіть коли супутник перебуває в зоні досяжності земної станції Пуерто-Монт.

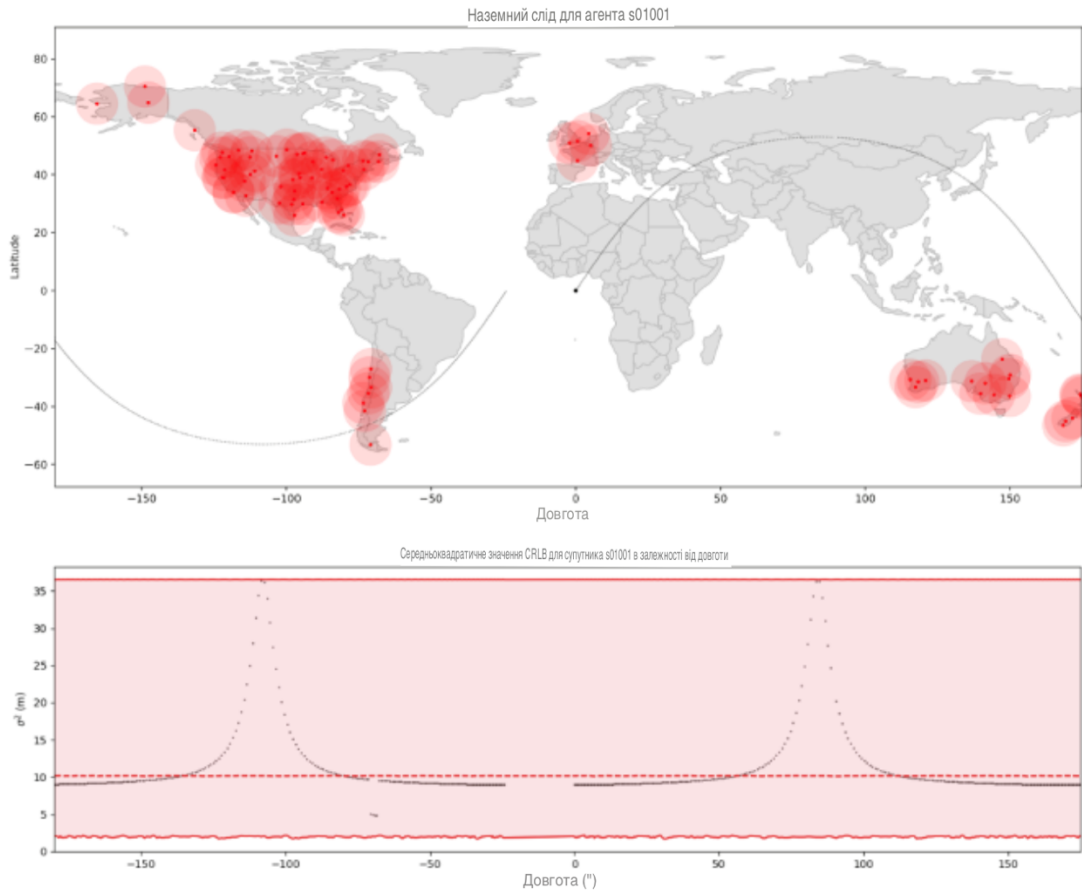


Рисунок 2.8. Графік для супутника s01001

У верхньому графіку показано наземна доріжка для супутника s01001, а також положення земних станцій Starlink. У нижньому графіку показано CRB в залежності від довготи, при цьому середній CRB для сукупності відображений пунктирною червоною лінією, а область між максимальним та мінімальним значеннями для сукупності зафарбована червоним. Звертаючись до двох графіків, стає зрозуміло, що вершини в CRB відповідають найвищим і найнижчим широтам для орбіти s01001, і яри в CRB виникають, коли s01001 знаходиться в зоні досяжності земної станції в Південній Америці. Прохід s01001 над земною станцією показано детально на Рисунку 2.11.

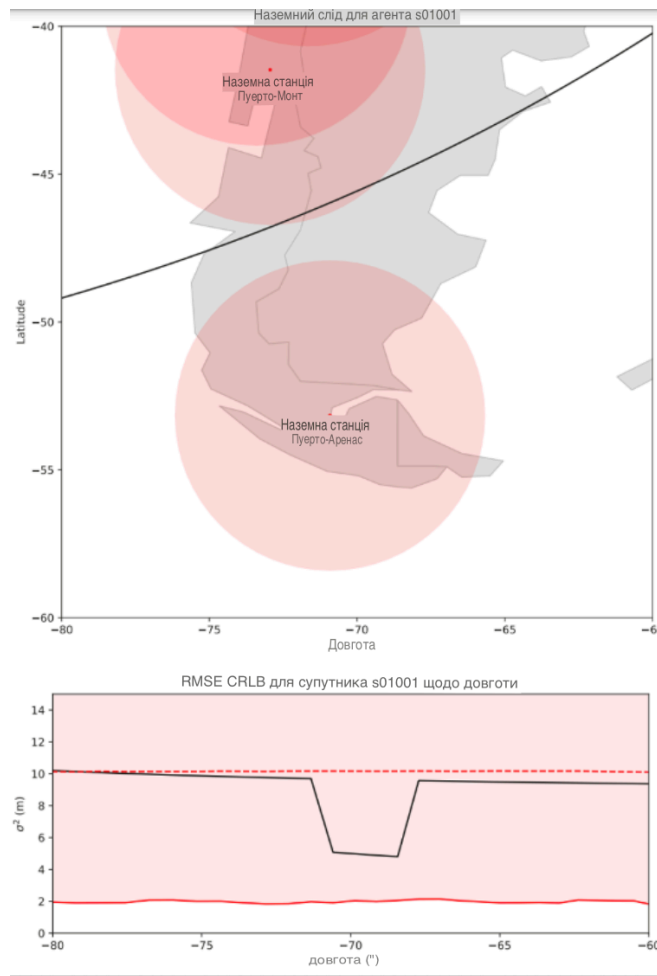


Рисунок 2.9. На графіку показано супутник s01001, що проходить над Вогняною землею на південному кінці Чилі.

Також CRB під час цього проходження. Порівняння двох графіків показує, що CRB падає приблизно на 50%, коли супутник перебуває в зоні досяжності земної станції в Пуерто-Монт. Загальний тренд у CRB, який є поступовим зменшенням, обумовленим геометрією мережі Starlink, продовжується, навіть коли s01001 знаходиться в зоні досяжності земної станції.

Отримані результати свідчать, що положення супутників Starlink може бути визначено за допомогою між супутникових вимірювань з середнім RMSE приблизно 10,15 метрів для більшості їхньої орбіти. Однак цей результат сильно залежить від значення γ , використаного для обчислення CRB, і також ігнорує динаміку системи, як пояснено у наступних двох розділах.

Припущення щодо γ

Розрахунки, представлені у розділі показують, що значення CRB дуже чутливе до значення γ , і більші значення γ призводять до менших значень CRB. Це вказує на те, що точність, яку можна досягти за допомогою кооперативної локалізації в Starlink, залежить від характеристик між супутникових зв'язків. На жаль, деталі цих зв'язків не є загальнодоступними, але можна зробити деякі початкові висловлення щодо характеристик зв'язку, необхідних для кооперативної локалізації в Starlink. Значення γ для вимірювань часу передачі (TOA) становить:

$$\gamma = \frac{1}{(v_p \sigma_T)^2}, \quad (2.9)$$

де вираз для σ_T :

$$\sigma_T \geq \frac{1}{8\pi^2 B T_s F_c^2 SNR}, \quad (2.10)$$

де B - ширина смуги в герцах, F_c - центральна частота в герцах, T_s - тривалість сигналу, а SNR - відношення сигнал/шум, ігноруючи ефекти багатолучінкового зв'язку. Використане значення γ у симуляції Starlink було $\gamma = 29,8605$. З рівняння (4.25) і припускаючи, що швидкість поширення v_p становить $3 \cdot 10^5$ км/с, це означає, що характеристики зв'язку, які задовольняють умову:

$$\frac{1}{B T_s F_c^2 SNR} \leq 4.18 \cdot 10^{-7} \text{ s}. \quad (2.11)$$

Найкращий випадок можливостей, представлених у пункті 2.4. Повторення аналізу для різних характеристик зв'язку на основі наявного

супутникового обладнання може дозволити здійснити технічний вибір. Інші аспекти між супутникових зв'язків, такі як робочі цикли обладнання, також можуть впливати на між супутникові зв'язки — наприклад, автор розглядав робочі цикли зв'язку в парах супутників та малих супутникових констелаціях.

Результати, представлені у попередньому пункті, показують RMSE для оцінювання місцезнаходження без врахування динаміки системи. Іншими словами, передбачальний фільтр, який враховує динаміку стану, такий як розширений фільтр Калмана, може забезпечити кращі результати, ніж передбачено CRB. Інтуїтивно, моделювання динаміки системи надає більше інформації, ніж просто між супутникові вимірювання, що означає, що можлива більш точна локалізація.

Порівняння із існуючими методами локалізації. Ця ефективність порівнюється з ефективністю Глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) та останніми дослідженнями в галузі локалізації з використанням лазерних між супутникових зв'язків для невеликих констелацій у низькій орбіті Землі [40], обидва з яких досягають ефективності приблизно 2 метри в ННО. Наші результати трошки вищі, але оскільки вони ще не враховують динаміку стану, можливо покращити їх за допомогою більш вдосконаленого моделювання. Можливі методи покращення симуляції описані у наступному розділі.

2.5. Висновки до розділу 2

Узагальнюючи, хоча отриманий результат є першим етапом у правильному напрямку, існують певні можливості для поліпшень у подальших дослідженнях. Доцільно розширити застосування нашого методу на інші мега-констеляції, такі як Kuiper чи OneWeb, для більш широкого розуміння його ефективності. Додаткові вдосконалення моделювання, такі як врахування ефекту J2 та аеродинамічної тяги, можуть покращити точність симуляцій.

Також рекомендується дослідження впливу змін топології мережі Starlink та вдосконалення методів локалізації супутників. Використання топології, залежної від широти, та розгляд можливостей внутрішньо-супутникової навігації можуть призвести до подальших покращень результатів. Далі слід розглядати реальну реалізацію кооперативної локалізації для супутників Starlink, зосереджуючись на розподіленому підході для визначення їхніх позицій.

Крім того, дослідження впливу автономних систем супутників на орбітальне середовище важливе для сталого розвитку космічної діяльності. Врахування цих аспектів у майбутніх дослідженнях буде сприяти більш глибокому розумінню впливу мега-констеляцій, зокрема Starlink, на космічну обстановку.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Ідеальна площина горизонту для розміщення супутника

Події AOS (придбання супутника) і LOS (втрата супутника), які, за кутом підняття 0° , географічно визначають ідеальну площину горизонту. Перша подія вказує на ситуацію, коли супутник з'являється безпосередньо на площині горизонту, готовий бути заблокованим і встановлювати зв'язок з наземною станцією (користувачем), тоді як друга подія описує момент, коли супутник зникає з площини горизонту, розблокований і відключається від наземної станції (користувача).

Наземна станція (користувач) грає ключову роль у встановленні зв'язку. Віртуальна лінія, що з'єднує точки в просторі, де відбуваються AOS і LOS на висоті 0° , визначає ідеальну ширину площини горизонту (IHPW), яка представлена на Рис. 4. Ширина цієї площини залежить від висоти орбіти супутника (Сакаї et al., 2011).

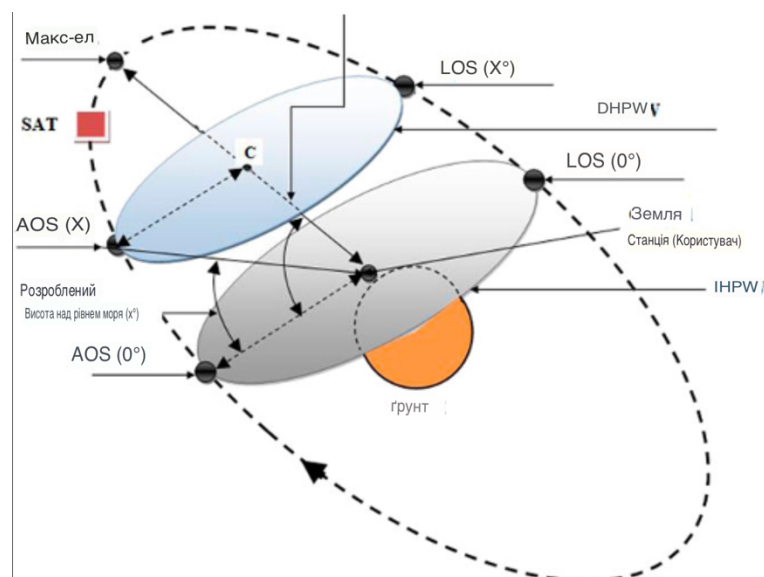


Рис.3.1. Площина горизонту

Ідеальна площина горизонту фактично представляє область видимості під 0° кутом місця. Однак, через різноманітні бар'єри (природні чи штучні), ця область видимості може бути прихованою, і, отже, може виникнути ситуація, коли ніякий зв'язок між супутником і користувачем не може бути ні заблокованим, ні розблокованим. З метою уникнення таких проблем, розробники передбачають мінімальну висоту площини горизонту для безпечного зв'язку, який можна заблокувати або розблокувати.

Площина горизонту з відповідною проектованою висотою (X°) розглядається як проектована площина горизонту з розрахованою шириною площини горизонту (DHPW). Зазвичай розрахована ширина менша за ідеальну ширину площини горизонту (Сакаї et al., 2011). IHPW та DHPW представлені на (Рисунку 3.1). З метою забезпечення безпечного і надійного зв'язку між користувачами та супутниками кут підняття проектованої площини горизонту визначається вищим. Наприклад, констеляція OneWeb використовує кут підняття для проектованої площини горизонту 55° для станцій користувачів (Yang, 2018).

Starlink, для першого супутника (шар на висоті 550 км), використовує кут підняття для проектованої площини горизонту 40° для користувачів, які мають тенденцію до зміни цього кута, або 25° для користувачів у інших орбітах підняття. Таким чином, для подальшого моделювання та аналізу висота проектованої площини горизонту для користувачів обробляється від 25° до 40° із кроком 5° ."

3.2. Розташування супутникових прив'язок

Для розрахунку CRB для Starlink необхідно визначити місцезнаходження анкерних вузлів. Спочатку ми вивчили, як кількість та розподіл земних станцій впливають на кількість підключених супутників, припускаючи, що анкерні

вузли мережі будуть співпрацювати з на земними станціями, рівномірно розташованими на поверхні Землі. Для визначення супутників, які виступатимуть в ролі анкерних вузлів, ми розрахували видимість супутників зі земних станцій, використовуючи рівняння. Геометрична конфігурація показана на рисунку 2.6, і похідна відстані між земною станцією та супутником починається з косинусного закону для трикутників:

$$r^2 = R_E^2 + d^s - 2 \cdot R_E \cdot d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \epsilon_0\right). \quad (3.1)$$

Перегрупування цього рівняння за допомогою квадратного рівняння та деякого спрощення дає наступне рівняння:

$$\frac{2 \cdot R_E \cdot \cos(90 + \epsilon_0) \pm \sqrt{4 \cdot R_E^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2} + \epsilon_0\right) - 4 \cdot (R_E^2 + r^2)}}{2}. \quad (3.2)$$

Застосовуючи прості тригонометричні тотожності ($\cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 1$, $\cos \theta = \sin(\pi/2 - \theta)$, та $\sin(-\theta) = -\sin \theta$), можна отримати наступне рівняння після деякого тривіального перегрупування:

$$d = R_E \left(\sqrt{\left(\frac{r}{R_E}\right)^2 - \cos^2 \epsilon_0} - \sin \epsilon_0 \right). \quad (3.3)$$

Нарешті, підставляючи $r = R_E + a$, отримуємо максимальну відстань до супутника під кутом елевації ϵ_0 над горизонтом земної станції:

$$d = R_E \left(\sqrt{\left(\frac{a+R_E}{R_E}\right)^2 - \cos^2 \epsilon_0} - \sin \epsilon_0 \right). \quad (3.4)$$

Щоб знайти максимально можливу відстань, на якій земна станція може відстежувати супутник, встановлюємо $\theta_0 = 0$, отримуючи $\cos^2 \theta_0 = 1$ і $\sin \theta_0 = 0$. Рівняння спрощується до:

$$d = R_E \left(\sqrt{\left(\frac{a+R_E}{R_E} \right)^2} - 1 \right) . \quad (3.5)$$

Підставивши значення $a = 550$ км та $R_E = 6371$ км, отримуємо максимальну відстань 2704 км, що відповідає результатам. Розрахунок супутників, які підключені до земних станцій, дозволяє визначити положення анкерних вузлів для мережі Starlink. Положення вузлів для різної кількості прив'язок, за умови, що на земних станцій рівномірно розподілені по поверхні Землі. Як показано на рисунку, багато супутників Starlink може бути підключено до однієї земної станції за умови, що $\theta_0 = 0$, тобто що супутники видимі на горизонті. Однак на практиці

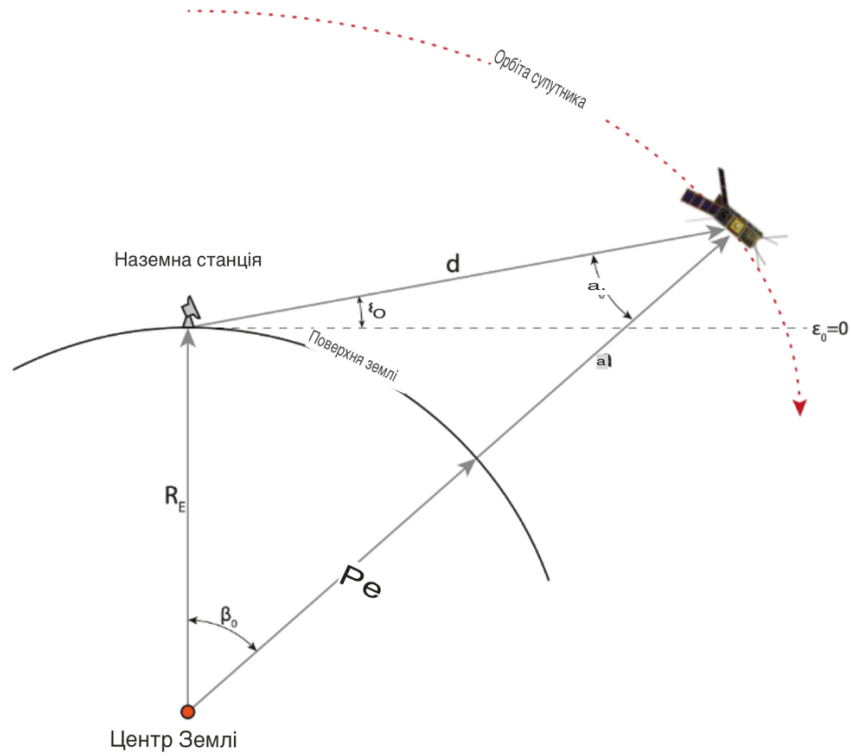


Рис. 3.2.: Діаграма геометричного устрою

Діаграма геометричного устрою, яка використовується для розрахунку видимості супутників з земної станції. Супутник має висоту a і утворює кут ϵ_o з місцевим горизонтом земної станції. Максимальну відстань, на якій супутник видно, можна визначити, визначивши d .

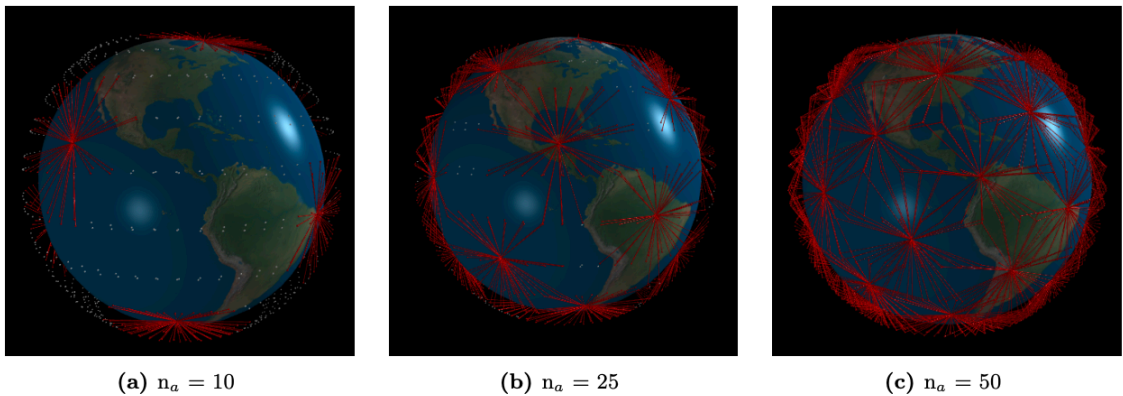


Рис. 3.3.: Візуалізація анкерних вузлів для мережі Starlink

Для зростаючої кількості випадково розподілених земних станцій n_a . Положення супутників показано білим кольором, а червоні лінії з'єднують земні станції з вузлами з припущеною величиною $\theta_0 = 0^\circ$.

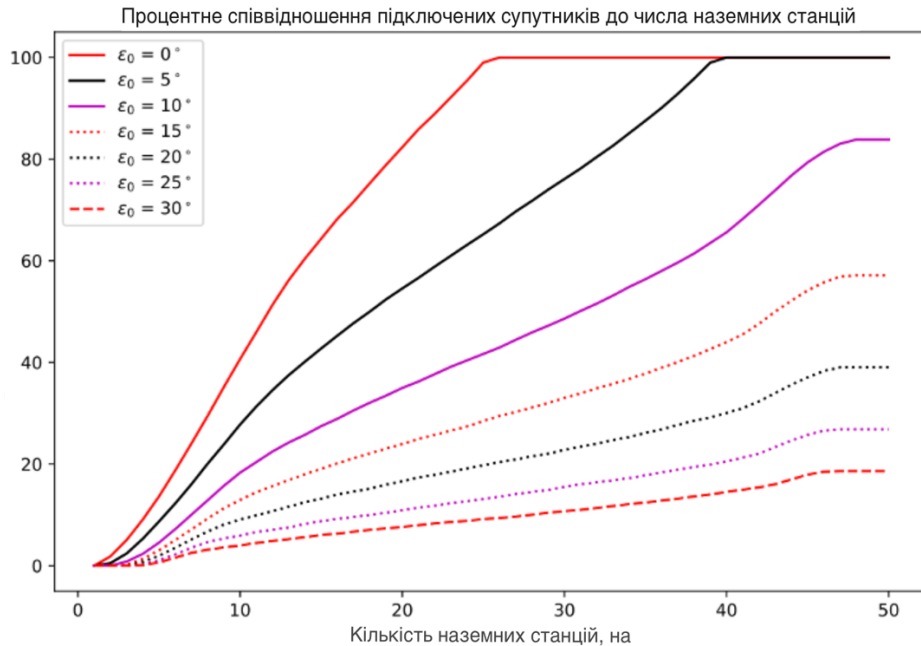


Рис. 3.4. Графік показує кількість підключених супутників проти кількості рівномірно розподілених земних станцій n_a .

Для досить малих значень θ_0 та досить великої кількості земних станцій відсоток підключених супутників максималізується - тобто, кожен супутник підключений до земної станції. Збільшення значення θ_0 драматично зменшує загальну кількість підключених супутників. Безпечний маржинальний θ_0 уникає бар'єрів, таких як пагорби, ліси чи будівлі. Це значення коливається від $\theta_0 = 0^\circ$ до 30° , а видимість для кожного значення θ_0 така: $0^\circ = 2704$ км, $5^\circ = 2205$ км, $10^\circ = 1815$ км, $15^\circ = 1518$ км, $20^\circ = 1294$ км, $25^\circ = 1123$ км і $30^\circ = 993$ км.

Бар'єри, такі як пагорби, ліси чи будівлі, означають, що оператори супутників часто визначають безпечний маржин θ_0 , який уникає цих бар'єрів. Це значення коливається від $\theta_0 = 0^\circ$ до 30° . Підставляючи ці значення в рівняння (2.4), отримуємо результати, зображені на рисунку 2.7. Значення θ_0 та кількість земних станцій n_a визначають, який відсоток констеляції підключений до земної станції, як показано на рисунку 2.7. Збільшення кількості земних

станцій та зменшення значення θ_0 обидва — згідно з інтуїцією — збільшують відсоток підключених супутників.

У реальності земні станції Starlink розташовані не рівномірно по всій земній кулі, а обмежені географією, політикою, доступністю та вартістю. Рисунок 2.8 показує місце розташування 87 запланованих або активних земних станцій Starlink на підставі регуляторних документів в США, Чилі, Великобританії, Франції, Австралії та Новій Зеландії. Назви та місцезнаходження всіх земних станцій наведені в Додатку С. Надання цих місцезнаходжень симуляції Starlink показує, що в середньому підключено $126+9-12$ супутників протягом обертання, тобто між 7,8% та 9,1% від загальної кількості супутників⁶. Враховуючи тенденції, показані на рисунку 2.7, відносно невеликий відсоток підключених супутників при наявності $n_a = 87$ земних станцій може бути призначений відносно консервативному значенню $\theta_0 = 40^\circ$. Загалом існує $341+18-22$ підключення від супутників до земних станцій, тобто багато супутників підключено до кількох земних станцій. Це виникає через те, що зони покриття деяких земних станцій перекриваються, як показано на рисунку 3.5.

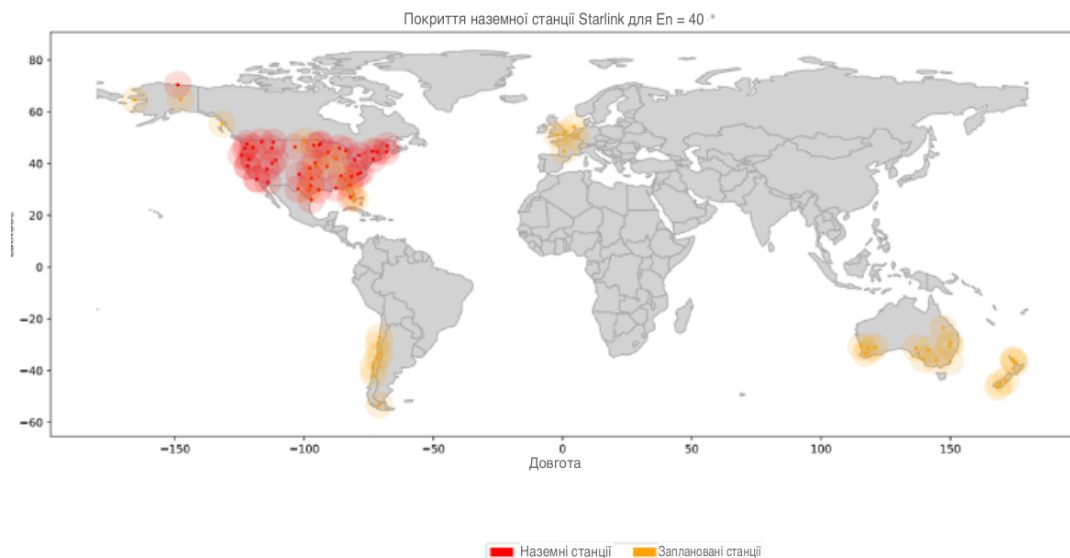


Рис. 3.5. Місцезнаходження 87 запланованих та активних наземних станцій Starlink та їх покриття при умові $\theta = 40^\circ$.

Місця станцій підтвержені документами, поданими до Федеральної комісії зі зв'язку у США, Міністерства транспорту та зв'язку Республіки Чилі, підсекретаріату зв'язку Республіки Чилі, Регулятора електронних зв'язків та пошт во Франції, Управління зв'язку у Великобританії, Влади зв'язку та медіа в Австралії та Міністерства бізнесу, інновацій та зайнятості, Управління радіочастотного управління в Новій Зеландії. Усі широти та довготи є приблизними (точність на рівні міста/міста). Встановлення $\theta = 40^\circ$ надає видимість на відстань $d = 812$ км. Оскільки Starlink - американська компанія, активні наземні станції переважно розташовані в США. Імена та місцезнаходження всіх наземних станцій наведено в Додатку С.

3.6. Метод зменшення затримка сигналу

Математичні розрахунки, пов'язані із нахиленим діапазоном між супутником та земною станцією (користувачем). На Рисунку 1.2 показаний трикутник, що описує супутник, земну станцію та центр Землі, який можна побачити в інших двох статтях (Сакажетал., 2011; Сакажетал., 2014). Детально аналізується нахилений діапазон, який математично виражається як:

$$d = \left[\sqrt{\left(\frac{H + R_E}{R_E} - \cos^2 \varepsilon_0 - \sin \varepsilon_0 \right)} \right], \quad (3.6)$$

де (d) - це нахилений діапазон під кутом підйому (ε_0), (H) - висота орбіти, а ($R_E=6371$ км) - радіус Землі. Навпаки, кут підйому (ε_0) виражений через нахилений діапазон (d) як:

$$\sin \varepsilon_0 = \frac{H(H + 2R_E) - d^2}{2dR_E}, \quad (3.7)$$

де $d^2 = H(H + 2R_E)$ впливає, що $\varepsilon_0 = 0 \rightarrow \varepsilon_0 = 0$, що представляє найбільшу відстань між супутником та земною станцією (користувачем):

$$d_{max} = d(\varepsilon_0 = 0) = \sqrt{H(H + 2R_E)}. \quad (3.8)$$

Цей діапазон під найменшим можливим кутом $\varepsilon_0 = 0$: підйому представляє максимально можливу відстань між земною станцією (користувачем) та супутником на висоті (H), і, отже, найгірший випадок бюджету посилення. Згідно з обговоренням, пов'язаним з Рисунком 3,1, ця відстань фактично представляє собою відстань між земною станцією (користувачем) та точкою в космосі події AOS (Захоплення супутника) або LOS (Втрата супутника) при $\varepsilon_0 = 0$, оскільки AOS і LOS симетрично пов'язані з земною станцією (користувачем). Математично це виражено як:

$$d_{max} = d_{AOS} = d_{LOS}. \quad (3.9)$$

Наостанок, віртуальна географічна відстань між точками AOS та LOS у космосі під кутом $\varepsilon_0 = 0$ представляє Ширину Ідеального Горизонтального Плану (IHPW), математично виражену як:

$$IHPW = d_{AOS} + d_{LOS}, \quad (3.10)$$

$$IHPW = 2d_{max} = 2d(\varepsilon_0 = 0) = 2\sqrt{H(H + 2R_E)}, \quad (3.11)$$

і схематично показану на Рисунок 3,1, позначену як IHPW.

Мінімальна відстань між супутником та земною станцією відбувається під час події Макс-Ел (Максимальний Підйом) відповідного проходження супутника, і вона виражається як:

$$d_{min}(\varepsilon_0 = MaxEl) = R_E \left[\sqrt{\left(\frac{H+R_E}{R_E}\right)^2 - \cos^2 - \sin(MaxEl)} \right]. \quad (3.12)$$

Тепер припустимо $\varepsilon_{0D} = X^\circ$, що заданий горизонтальний план визначений найменшим кутом підйому (індекс D додається для "заданого") (див. Рисунок 3,1). Для констеляції супутників Starlink, для першого шару (шар на висоті 550 км), застосовується кут підйому для заданого горизонтального плану в 40° для користувачів, але оскільки його можна змінити, для подальшого аналітичного вивчення вважається ($X^\circ = [25, 30, 35, 40]$).

Максимальна відстань між супутником та земною станцією (користувачем) $\varepsilon_{0D} = X^\circ$ для визначається рівнянням 4 для , як $\varepsilon_{0D} = X^\circ$:

$$d_{max}(X^\circ) = d(\varepsilon_{0D} = X^\circ). \quad (3.13)$$

Нарешті, рух супутника в його власній орбіті відносно заданого горизонтального плану при $\varepsilon_{0D} = X^\circ$ виглядає наступним чином, інтерпретовано через Рисунок 3,1. Супутник з'являється на ідеальному горизонті через подію AOS (0°) (Захоплення Супутника), але не заблокований земною станцією (користувачем) до події AOS (X°) при $\varepsilon_{0D} = X^\circ$ куті підйому, коли він блокується з земною станцією (користувачем) та нахилений діапазон $d_{max}(X^\circ)$ (у цьому випадку максимальний діапазон досягається при заданому (X°)).

Таким чином, немає блокування (немає комунікації) між супутником та користувачем від події AOS (0°) до події AOS (X°). Блокування встановлюється саме при AOS (X°). Далі супутник піднімається вище до події Максимального Підйому $\varepsilon_0 = \text{Max}El^\circ$ при, досягаючи нахилений $\varepsilon_{0D} = X^\circ$ діапазон (d_{min}), а потім обертається вниз до події LOS (X°) при куті підйому, знову маючи нахилений $\varepsilon_{0D} = X^\circ$ діапазон, відблокований від земної станції (користувача), і все ще летить вище над земною станцією (користувачем), але без комунікації, поки супутник не зникає при події LOS (0°). Це - цикл комунікації між супутником та земною станцією (користувачем).

Важливо підкреслити, що нахилений діапазон d_{min} залишається незмінним, незалежно від заданого кута підйому, і виражається рівнянням 10, оскільки користувач не змінює своє положення за заданим підйомом, лише заданий горизонтальний план рухається вгору, завжди залишаючись паралельно ідеальному горизонтальному плану.

Отже, лінія, що з'єднує AOS (X°) та LOS (X°), представляє собою ширину заданого горизонтального плану (HPW), математично виражену як:

$$DHPW = d_{AOS(X)} + d_{LOS(X)}, \quad (3.14)$$

де $d_{AOS(X)}$ та $d_{LOS(X)}$ виміряні відносно точки С на Рисунку 3,1. Точка С - це проекція користувача на заданий горизонтальний план.

Далі визначається, наскільки заданий горизонтальний план відрізняється від ідеального та наскільки вони віддалені один від одного. З точки зору земної станції (користувача), ширина заданого горизонтального плану (HPW) є основою віртуального невідповідного конуса з вершиною точно в земній станції (користувача). Ширина заданого горизонтального плану (HPW) фактично є діаметром основи відповідного віртуального конуса. Розв'язання трикутника між земною станцією (користувачем) - AOS (X°) - центром ШЗГП (С) на Рисунку 3.1 дозволяє визначити, що:

$$DHPW = 2d_{AOS(X)} = 2d(\varepsilon_{oD} = X^\circ) \sin(90 - X) = 2d(\varepsilon_{oD} = X^\circ) \cos X. \quad (3.10)$$

Позначаючи через LDHPW паралельну відстань між заданою площадкою горизонту та ідеальною (див. Рисунок 3,1), з того ж трикутника випливає, що LDHPW є:

$$L_{DHPW} = d(\varepsilon_{oD} = X^\circ) \cos(90 - X) = d(\varepsilon_{oD} = X^\circ) \sin X. \quad (3.15)$$

Слант-дальність між супутником та користувачем змінюється з часом, що призводить до різних затримок сигналу від супутника до користувача або навпаки. Позначаючи затримку сигналу (латентність) як τ , для траєкторії супутника, сприйнятої від користувача, у випадку одностороннього зв'язку, діапазон затримки сигналу визначається як:

$$\tau_{\min} (\text{due to } d_{\min}) < \tau < \tau_{\max} (\text{due to } d_{\max}). \quad (3.16)$$

3.3 Висновки до розділу 3

У цьому розділі вивчено ключові події AOS (Acquisition of Signal) та LOS (Loss of Signal), які визначають ідеальну площину горизонту. Наземна станція грає важливу роль у встановленні зв'язку, а ідеальна площина горизонту може бути обмежена бар'єрами. Мінімальна висота площини горизонту визначається для безпечного заблокування чи розблокування зв'язку.

Проектована площина горизонту залежить від кута підняття. Моделювання Starlink та OneWeb показує використання різних кутів для проєктованих площин горизонту в залежності від висоти та розташування

супутників. Результати підкреслюють необхідність уточнення висоти проєктованої площини горизонту для ефективного зв'язку. Рекомендується розширити діапазон висот у моделюванні для врахування різноманітних умов та конфігурацій мега-констеляцій. Також було розглянуто математичні розрахунки, пов'язані з нахиленим діапазоном між супутником і земною станцією (користувачем). Досліджено нахилений діапазон, використовуючи кут підйому та висоту орбіти. Введені рівняння, що описують максимальну та мінімальну відстань між супутником та земною станцією.

Далі розглядається віртуальна географічна відстань між точками AOS та LOS у космосі, представлена як Ширина Ідеального Горизонтального Плану (IHPW). Введені рівняння для мінімальної відстані та руху супутника відносно заданого горизонтального плану.

Визначено віртуальний невідповідний конус та розглянуто затримку сигналу між супутником та користувачем у випадку одностороннього зв'язку.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

Основні вимоги до побудови і функціонування системи управління охороною праці (СУОП).

Забезпечення функціонування та побудова СУОП в організації. Положення про СУОП, структура та зміст його розділів.

В Україні функціонує багаторівнева СУОП, функціональними ланками якої є відповідні структури державної законодавчої і виконавчої влади різних рівнів, управлінські структури підприємств і організацій, трудових колективів.

Залежно від спрямування вирішуваних завдань всі ланки СУОП можна розділити на дві групи:

- ланки, що забезпечують вирішення законодавчо-нормативних, науково-технічних, соціально-економічних та інших загальних питань охорони праці;
- ланки, до функціональних обов'язків яких входить забезпечення безпеки праці в умовах конкретних організацій, підприємств. До першої групи належать органи державної законодавчої ініціативи та органи державного управління охороною праці:
 - Верховна Рада України;
 - Кабінет Міністрів України; - Державна служба гірничого нагляду та промислової безпеки України (Держгірпромнагляд України);
 - міністерства та інші центральні органи державної виконавчої влади;
 - Фонд соціального страхування від нещасних випадків і профзахворювань;
 - місцева державна адміністрація, органи місцевого самоврядування.

Верховна Рада України зі своєї ініціативи у взаємодії з відповідними структурами державної виконавчої влади визначає державну політику в сфері

охорони праці, вирішує питання щодо удосконалення і розвитку законодавчої бази охорони праці, соціальні питання, пов'язані зі станом умов і охорони праці.

Кабінет Міністрів України забезпечує реалізацію державної політики в сфері охорони праці, виходячи із стану охорони праці в державі, організує розробку загальнодержавних програм відповідно до поліпшення цього стану, затверджує ці програми і контролює їх виконання, визначає функції органів виконавчої влади щодо вирішення питань охорони праці і нагляду за охороною праці.

Для вирішення цих питань при Кабінеті Міністрів України функціонує Національна рада з питань безпечної життєдіяльності населення, яку очолює віце-прем'єр-міністр України.

Держгірпромнагляд України здійснює комплексне управління охороною праці на державному рівні, реалізує державну політику в цій сфері, розробляє за участі відповідних органів державної програми в сфері охорони праці, координує роботу державних органів і об'єднань підприємств із питань безпеки праці, розробляє і переглядає разом з компетентними органами систему показників і обліку умов і безпеки праці, здійснює міжнародне співробітництво з питань охорони праці і нагляд за охороною праці в державі тощо.

Рішення Держгірпром-нагляду України, що відноситься до її компетенції, обов'язкові для виконання всіма міністерствами, іншими центральними органами державної виконавчої влади, місцевими державними адміністраціями, місцевими радами народних депутатів і підприємствами.

Фонд соціального страхування від нещасних випадків здійснює профілактику нещасних випадків і профзахворювань, а також координацію всієї страхової діяльності, пов'язаної з охороною праці.

Міністерство праці і соціальної політики України здійснює також державну експертизу умов праці, визначає порядок і здійснює контроль за якістю проведення атестації робочих місць згідно з їх відповідністю нормативним актам про охорону праці, бере участь у розробці нормативних документів про охорону праці.

Інші міністерства і центральні органи державної виконавчої влади як ланки системи управління охороною праці визначають науково-технічну політику галузі з питань охорони праці, розробляють і реалізують комплексні заходи щодо поліпшення безпеки праці, здійснюють методичне керівництво діяльністю підприємств галузі з охорони праці, співробітничать з галузевими профспілками щодо вирішення питань безпеки праці, організують у встановленому порядку навчання і перевірку знань правил і норм охорони праці керівниками і фахівцями галузі, створюють, у разі необхідності, професійні воєнізовані аварійно-рятувальні формування, здійснюють внутрішній контроль за станом охорони праці.

Для забезпечення виконання перелічених функцій в апаратах міністерств і інших центральних органів державної виконавчої влади створюються служби охорони праці.

Місцеві державні адміністрації й органи місцевого самоврядування в межах підвідомчої їм території забезпечують реалізацію державної політики в сфері охорони праці, формують за участі профспілок місцеві програми заходів щодо поліпшення безпеки, гігієни праці і виробничого середовища, здійснюють контроль за дотриманням нормативних актів про охорону праці. Для забезпечення виконання названих функцій при місцевих органах державної виконавчої влади створюються відповідні структурні підрозділи.

Управлінські структури підприємств забезпечують в умовах конкретних виробництв реалізацію вимог законодавчих і нормативних актів про охорону праці з метою створення безпечних і нешкідливих умов праці, попередження виробничого травматизму і професійних захворювань, вирішують весь комплекс питань з охорони праці, пов'язаних з даним виробництвом. У своїй діяльності стосовно охорони праці управлінські структури підприємств взаємодіють з комісією з питань охорони праці підприємства (за наявності такої), з профспілками підприємства та уповноваженими трудових колективів.

СУОП в умовах конкретної організації, на конкретному об'єкті завжди є багаторівневою системою управління, у якій верхнім рівнем є державне

управління, а нижнім - управління охороною праці на конкретному об'єкті. Як проміжні рівні управління можуть виступати відомче, регіональне управління, а також управління в об'єднанні, тресті тощо.

Слід зазначити, що вихідні параметри СУОП визначаються, виходячи з вимог норм, правил, проектної документації, аналізу фактичного стану виробничої ситуації і ряду факторів виробничого середовища, тому СУОП варто віднести до категорії звичайних, багатоконтурних систем, які піддаються програмуванню. Багато-контурність систем управління в даному випадку пояснюється складністю об'єкта управління, його великою інерційністю, складністю і інерційністю реалізації управлінських впливів.

Правовою основою СУОП є: Конституція України, Кодекс законів про працю України, Закони України «Про охорону праці» і «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві і професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності», накази і розпорядження Президента України, розпорядження і постанови Кабінету Міністрів, Держгірпромнагляд, Міністерства охорони здоров'я, Міністерства праці і соціальної політики, а також інших директивних органів України з питань охорони праці (органи Державного управління охороною праці).

Позитивна дія впровадження систем управління охороною праці (СУОП) на рівні організації як на зниження небезпек і ризиків, так і на продуктивність, нині визнана урядами, роботодавцями і працівниками.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Надзвичайні екологічні ситуації та екологічний ризик

Особливу роль у житті людини відіграють надзвичайні ситуації, що виникають під час стихійних лих або техногенних катастроф. Разом із соціальними та економічними збитками надзвичайні ситуації завдають також екологічної шкоди, що відображається в руйнуванні й деградації природних

систем, забрудненні повітря, водойм і ґрунтів. У результаті виникають надзвичайні екологічні ситуації. Надзвичайні екологічні ситуації — ті ситуації, що виникають унаслідок раптових природних лих або техногенних аварій і супроводжуються великими збитками. Характерними особливостями цих 60 ситуацій є велика гострота прояву, значні відхилення показників навколишнього середовища від норми (перевищення граничнодопустимих концентрацій (ГДК) забруднювальних речовин у сотні, тисячі й навіть десятки тисяч разів); ураганні швидкості вітру; затоплення селітебних територій (населених пунктів); виникнення катастрофічних селевих потоків та ін.

Звичайно, такі відхилення тривають недовго — години, дні, десятки днів, іноді більше. Потім ступінь гостроти екологічного стану зменшується, хоча може залишатися досить високим. Отже, поняття надзвичайна екологічна ситуація та катастрофічна екологічна ситуація розрізняються тим, що перша триває порівняно недовго, але настає раптово та характеризується виключно високими відхиленнями стану навколишнього середовища від норми, а друга — досить тривала (як правило, роки), але має меншу гостроту прояву.

Надзвичайна ситуація за певних обставин може перетворитися на катастрофічну. Наприклад, ситуація у Чорнобильській зоні. Протягом майже місяця радіаційна обстановка в Чорнобилі була надзвичайною. Після спорудження саркофага викиди радіоактивних елементів різко зменшилися, але забруднення до того часу охопило великі території. Таке високе радіаційне забруднення продовжується вже понад два десятиріччя. За оцінкою спеціалістів, екологічна ситуація в Чорнобильській зоні є катастрофічною.

Таким чином, надзвичайні екологічні ситуації відображаються у порушенні нормального функціонування природних і природно-антропогенних систем, пов'язаних із раптовими природними або техногенними впливами (стихійні лиха, катастрофи, аварії), що супроводжуються соціальними, економічними та екологічними збитками і потребують для ліквідації особливих управлінських рішень. Збитки виявляються у загибелі та пораненні людей, погіршенні їх здоров'я, руйнуванні матеріальних об'єктів, структури природних

і природно-антропогенних систем, втраті їх природно-ресурсного і екологічного потенціалу. Довготривала надзвичайна ситуація зумовлює формування зони екологічної катастрофи або екологічного лиха. [18]

Надзвичайні екологічні ситуації виникають унаслідок дії трьох основних груп факторів:

- свідомого руйнування природного середовища, походження техніки, погіршення становища економічних об'єктів під час війн і диверсійних актів;
- руйнівних катастроф, які виникають у зв'язку з некомпетентними та помилковими технічними рішеннями (наприклад, Чорнобильська аварія);
- природних стихійних явищ. Той факт, що різко збільшилися їх частота та інтенсивність в останні десятиріччя, спеціалісти пов'язують з антропогенною стимуляцією, що спричинює посилення відхилень природних процесів від нормального рівня коливань.

Економічні збитки, завдані у зв'язку з несприятливими і небезпечними природними процесами та явищами, значно збільшилися. За деякими оцінками, вони зростають швидше, ніж показники світового валового продукту, тобто може бути досягнута межа просторового і технологічного розвитку виробництва за його здатністю компенсувати збитки, які збільшуються, від несприятливих і небезпечних явищ. Первинні процеси, що виникають у природному середовищі внаслідок цих факторів, посилюватимуться або послаблюватимуться залежно від природної обстановки (стійкість ландшафтів, погодні умови, фаза коливань екосистеми тощо) і соціально-економічних умов (психологічна готовність і неготовність населення до ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, технічна оснащеність спеціальних служб, економічні можливості та ін.). Таким чином, надзвичайні екологічні ситуації в більшості випадків мають комплексну природу.

Заходи щодо запобігання надзвичайним екологічним ситуаціям або подолання їх наслідків можна згрупувати у три класи:

- організаційні, серед яких розрізняють планувальні та оперативні;
- інженерно-технічні;

— технологічні.

Отже, заходи, спрямовані на запобігання надзвичайним екологічним ситуаціям та подолання, їх можна поділити на два типи: заходи, спрямовані на зниження піддатливості об'єктів небезпечним впливам, і заходи, спрямовані на зниження чутливості об'єктів до небезпечних впливів. У першому випадку здійснюють заходи з метою зовнішнього захисту об'єктів, виключення тих чи інших територій з використання у виробничих цілях тощо. Зниження чутливості об'єктів до небезпечних впливів досягається, насамперед, за рахунок досконаліших технологій, шляхом регулювання технологічних режимів у зв'язку з природними циклами, створення системи дублювання об'єктів, інформаційних систем і систем швидкого реагування.

Основні функції щодо запобігання надзвичайним екологічним ситуаціям та подолання їх на державному рівні виконують міністерства з надзвичайних ситуацій.

Ризик — це об'єктивне поняття, він пов'язаний практично з будь-якою діяльністю людини. Уміння усвідомлювати ступінь ризику дає змогу людині оцінити власні можливості й вибрати напрями поведінки при цьому. Під сутністю терміна ризик розуміють імовірність, по-перше, будь-якої небезпечної події; по-друге, негативних наслідків від неї та обсягу очікуваних збитків. Одні ризики конкретні, інші — не мають такого визначення. Існують професійні ризики (наприклад, безпека професійних захворювань) і такі, яких зазнає все населення (екологічний, економічний, геологічний, політичний ризики).

Предметом нашого дослідження є екологічний ризик, чіткого визначення якого досі немає. М.Ф. Реймерс вважає, що це ймовірність наслідків будь-яких (специфічних або випадкових, поступових або катастрофічних) антропогенних змін природних об'єктів і факторів. З екологічним ризиком пов'язані поняття екологічної безпеки і небезпеки. Ці альтернативні категорії стосуються населення як реципієнта дії навколишнього середовища за його відповідно несприятливого чи сприятливого статусу.

Екологічний ризик пов'язаний із такими групами факторів: 1) техногенними; 2) природними; 3) військовими; 4) соціально-економічними; 5) політичними; 6) тероризмом.

Техногенний екологічний ризик виникає у зв'язку з аваріями на ЛЕС, аваріями танкерів, на небезпечних хімічних виробництвах, під час руйнування гребель водосховищ тощо.

Причинами аварій є інтенсивність технологічних процесів та зв'язків, висока концентрація виробництва, ресурсомісткість і б3 багатовідходність технологій, погана оснащеність очисними й утилізаційними пристроями. Природний екологічний ризик пов'язаний із ймовірністю вияву багатьох несприятливих природних явищ, таких як землетруси, вулканізм, селі, повені, цунамі та ін. Потрібно враховувати особливості геологічної будови (властивості гірських порід, наявність або відсутність розламів тощо), рельєфу (наприклад, посилення ризику забруднення в улоговинах), ландшафтів (ступінь їх стійкості до техногенних навантажень). Варто також зважати на сусідство цінних та унікальних природних об'єктів, територій особливого режиму охорони. Екологічний ризик збільшується за високої густоти населення, а також залежить від характеру сприйняття населенням подій, що відбуваються. Відомо, що катастрофічні наслідки аварій і стихійних природних явищ різко зростають у результаті психологічної неготовності населення до таких подій.

Особливу групу факторів виникнення екологічного ризику становлять воєнні дії, які зумовлюють різноманітні зміни навколишнього середовища та безпосередньо впливають на людину й інші суб'єкти. Екологічний ризик пов'язаний також із соціально-економічними факторами. Йдеться про ймовірність виникнення несприятливих екологічних ситуацій у разі прийняття рішень про будівництво тих чи інших небезпечних об'єктів у зв'язку з соціальною й економічною потребами такого будівництва. До цієї категорії належить будівництво багатьох АЕС, створення небезпечних хімічних виробництв, транспортних систем. У деяких випадках аналогічні рішення пов'язані з політичними факторами.

Нині є та розробляється велика кількість науково обґрунтованих постанов, нормативів, правил, державних стандартів, за якими регламентується господарська діяльність, встановлюються граничнодопустимі концентрації шкідливих і токсичних компонентів у ґрунтах, підземних і поверхневих водах тощо. На основі цих документів та екологічного законодавства в Україні розроблено систему заходів на державному, відомчих та об'єктних рівнях, що регламентують ведення екологічно безпечної господарської діяльності, будівництво різних споруд, межі забруднення природного середовища в рамках не лише окремих локальних систем, а й великих регіонів, держави в цілому. Такі заходи можна об'єднати у три основні групи — соціально-організаційні, оцінювально-прогнозні та технічні. Усі види заходів взаємопов'язані і є основою для організації безпечної життєдіяльності. Якщо їх правильно дотримуватися, можна не тільки зберегти стан навколишнього середовища, а й поліпшити його, уникнути екологічно небезпечних явищ і катастроф, зумовлених антропогенно-техногенною діяльністю.

4.3. Висновок до розділу 4

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано основні вимоги до побудови і функціонування системи управління охороною праці, а також надзвичайні екологічні ситуації та екологічний ризик.

ВИСНОВКИ

Метою даної роботи було дослідження способу передачі сигналу з використанням системи супутникового зв'язку Starlink.

Для досягнення поставленої мети, в ході роботи були вирішені наступні завдання:

- Розглянуто як працює супутниковий інтернет;
- Детально розглянуто користувацькі термінали та наземні станції супутникової системи Starlink, як проходить передача зв'язку із супутника до користувача;
- Були розглянуті актуальні проекти супутникового інтернету на низькій орбіті також був розглянутий склад угруповання Starlink і архітектуру мережі та його космічний сегмент.
- Представлені розрахунки зони покриття і також розрахунки визначення площини горизонту, похилої дальності зв'язку, затримки сигналу супутника LEO

На підставі проведеної роботи можна зробити висновок про те, що впровадження супутникових технологій є потенційним рішенням для збільшення пропускної здатності, глобального охоплення та мобільності мереж доступу, а також може знизити вартість мереж доступу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Хвостівський М.О., Дунець В.Л., Дедів І.Ю. Методичні рекомендації з оформлення кваліфікаційних робіт магістра за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. 21 с.
2. Сучасні супутникові системи зв'язку [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50386/1/Suchasni_suputnykovi_systemy_zv'язku.pdf (Дата звернення 13.11. 2023).
3. Хвостівська Л.В., Осухівська Г.М., Хвостівський М.О., Шадріна Г.М., Дедів, І. Ю. Розвиток методів та алгоритмів обчислення періоду стохастичних біомедичних сигналів для медичних комп'ютерно-діагностичних систем. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. /Категорія В/ 2019. Вип. 79. С. 78-84.
4. Низькоорбітальні системи супутникового зв'язку [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://kunegin.com/ref1/sput/loworb.htm> (Дата звернення: 12.11.23)
5. Starlink Satellite Missions (2020). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellitemissions/s/starlink>(Дата звернення 15.11. 2023).
6. Van Allen radiation belt (2020). [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt (Дата звернення 01.12. 2023).
7. Дозорська , О. Ф., Яворська , Є. Б., Дозорський, В. Г., Дедів , Л. Є. і Дедів , І. Ю. Метод виявлення ознак основного тону в структурі електроміографічних сигналів для задачі компенсації порушеної комунікативної функції людини», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (81), с. 56-64.
8. Дозорський В.Г., Дозорська О.Ф., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Паньків І. М., Яворська Є.Б. Структура системи відбору біосигналів для задачі відновлення

комунікативної функції людини. Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – Хмельницький: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету". – 2019. - №2(271) – с. 183-186.

9. Порівняння параметрів угруповання супутників LEO "Starlink" для різно орбітальної оболонки [Електронний ресурс]. Режим доступу: DOI:10.3389/frcmn.2021.643095 (Дата звернення 30.11. 2023).

10. Орбіти штучних супутників Землі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lib.qrz.ru/node/1357> (Дата звернення 22.11. 2023).

11. Дедів І.Ю. Структурний синтез вібротерапевтичної апаратури / О.В. Гевко, В.Г. Дозорський, Л.Є. Дедів, І.Ю. Дедів, О.Ф. Дозорська // Перспективні технології та прилади, № 20, Луцьк, 2022. – с. 23-31.

12. Новітні проекти низькоорбітальних супутникових систем [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://habr.com/ru/top/daily/> (Дата звернення 03.12. 2023)

13. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. L. Khvostivska, M. Khvostivskyu, V. Dunets, I. Dediv. CEUR Workshop Proceedings. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022 Ternopil 22- 24 November 2022. Том 3309, с. 314-318.

14. Starlink [Електронний ресурс]. Режим доступу:<https://www.starlink.com/> (Дата звернення 12.11. 2023).

15. Дедів Л.Є., Свєрстюк А.С., Дедів І.Ю., Хвостівський М.О., Дозорський В.Г., Яворська Є.Б. Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу: наукова монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. 120 с.

16. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. (2023) Matematychnе, alhorytmichne ta prohramne zabezpechennia synfaznoho vyjavlennia radiosyhnaliv v elektronnykh komunikatsiinykh merezhakh iz zavadamy [Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio

signals in electronic communication networks with noises]. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 111, no 3, pp. 48-57

17. Starlink [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Starlink> (Дата звернення 12.11. 2023).

18. Starlink в Україні [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.the-village.com.ua/village/city/how-it-works-city/325497-gid-po-starlink> (Дата звернення 11.12. 2023).

19. Інтернет від Ілона Маска [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://visitukraine.today/uk/blog/1046/starlink-comu-internet-vid-ilona-maskavazlivii-dlya-ukraini> (Дата звернення 12.12. 2023).

20. The Parameters Comparison of the “Starlink” LEO Satellites Constellation for Different Orbital Shells [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frcmn.2021.643095/full> (Дата звернення 13.12. 2023).

21. Towards Performant Networking from Low-Earth Orbit [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://bdeboram.github.io/papers/phd_thesis_deboram_2021.pdf (Дата звернення 13.11. 2023).

22. Dozorskyi V., Dediv I., Sverstiuk S., Nykytyuk V., Karnaukhov A. The Method of Commands Identification to Voice Control of the Electric Wheelchair. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.233-240. ISSN 1613-0073. CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine.

23. Дунець В.Л., Цимбала Т.І., Ракуш Р.В. Метод оптимального виявлення сигналів в каналах зв'язку. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. Тернопіль : ТНТУ, 2016. С.37-38.

24. Лакоцький С., Винницький М. Хвостівська Л. Метод верифікації

алгоритмів опрацювання радіосигналів в телекомунікаційних системах.

Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 1-2 лютого 2018 р.). Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. С.5.

25. Liliya Khvostivska, Iryna Dediv, Mykola Khvostivskyu, Leonid Dediv. Computer Tool for generating of Test Radio Signals for verification of the Radio Computer Systems Software. ADVANCED APPLIED ENERGY and INFORMATION TECHNOLOGIES 2021. Proceedings of the International Conference (Ternopil, 15-17 of December 2021.) / Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil Ivan Puluj National Technical Universtiy [and other.]. – Ternopil : TNTU, Zhytomyr : «Publishing house “Book-Druk”» LLC, 2021. – P.200-205.

26. Хвостівська Л.В., Дедів І.Ю., Ісаєнко Д.В. Генерування радіосигналів для тестування програмного забезпечення комп'ютерних радіосистем. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей VIII міжнар. наук.-техн. конф.

Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27–28 листоп. 2019.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. Тернопіль : ТНТУ, 2019. С. 108-109

27. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА 48 В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А

ДОДАТОК А

Копія тези конференції

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine)
Pierre and Marie Curie University (The French Republic)
University of Maribor (The Republic of Slovenia)
Technical University of Kosice (The Slovak Republic)
Vilnius Gediminas Technical University (The Republic of Lithuania)
International Academy Mohammed VI of Civil Aviation (Morocco)
T. Shevchenko Scientific Society**

CURRENT ISSUES IN MODERN TECHNOLOGIES

Book
of abstracts

**of the XII International scientific and practical
conference of young researchers and students**
December, 6th-7th, 2023



**UKRAINE
TERNOPIL – 2023**

УДК 621.3

А. І. Маняк, к.т.н.; І. Ю. Дедів

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

СПОСІБ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛУ В СИСТЕМАХ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

A. I. Maniak Ph.D, I.Y. Dediv

METHOD OF SIGNAL TRANSMISSION IN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

В останні роки технологія супутникового зв'язку зазнала значних змін та стрімко розвивається в системах глобального підключення. Широке використання супутникового зв'язку дозволило людям залишатися на зв'язку один з одним, незалежно від їх фізичного розташування. Поява супутникового широкосмугового зв'язку революціонізувала зв'язок, в результаті чого, ми отримали супутникове підключення до Інтернету, яке може забезпечити надійний високошвидкісний доступ до віддалених місць, які інакше були б недоступні для традиційних кабельних або оптоволоконних з'єднань.

Проте, впровадження такої технології стикається з низкою проблем. Зокрема, основною проблемою для глобального покриття є процес міжсупутникової передачі. Аналіз, проектування площини горизонту з її розрахунком дасть можливість уникати затримки передачі сигналів та збільшить зону покриття Землі. Що підвищить ефективність широкосмугового супутникового зв'язку.

Зона покриття супутника визначається, як частка поверхні Землі і зазвичай виражається у відсотках. Концепція зони покриття наведена на рис.1, де зображено два трикутники, які відповідають за зону покриття.

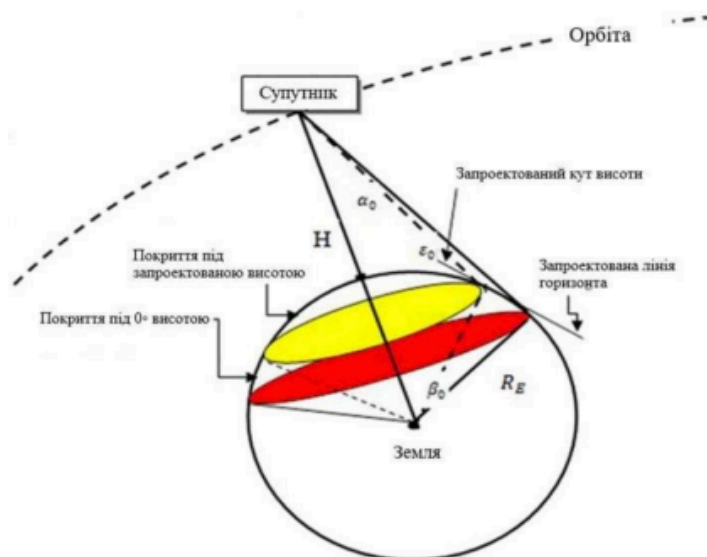


Рисунок 1. Випадок повного покриття супутником LEO

Більший із них представляє випадок повного покриття LEO під висотою $\epsilon_0=0^\circ$.

Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів
«АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» – Тернопіль, 6-7 грудня 2023 року

Відповідне покриття дає більше коло. Менше коло представляє зону покриття LEO на поверхні Землі під проектованою висотою. Для обох трикутників: ε_0 — кут місця, α_0 — кут нахилу (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, тоді виконується рівність:

$$\varepsilon_0 + \alpha_0 + \beta_0 = 90^\circ \quad (1)$$

В результаті отримаємо:

$$\sin \alpha_0 = \frac{R_E}{R_E + H} \cos \varepsilon_0 \quad (2)$$

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

$$\alpha_{0,max} = \sin^{-1} \left(\frac{R_E}{R_E + H} \right) \quad (3)$$

За визначенням, покриття C (%) — це частка поверхні Землі, яку охоплює супутник, що обчислюється, як відношення площі покриття супутника до поверхні Землі як:

$$C(\%) = \frac{S_{SATCOV}}{S_e} \quad (4)$$

$$C(\%) = \frac{1}{2} (1 - \cos \beta_0) \quad (5)$$

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

Література

1. Сучасні супутникові системи зв'язку [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50386/1/Suchasni_suputnykovi_systemy_zv'язku.pdf (Дата звернення 13.10. 2023).
2. Низькоорбітальні системи супутникового зв'язку [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://kunegin.com/ref1/sput/loworb.htm> (Дата звернення: 12.10.23)
3. Starlink Satellite Missions (2020). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellitemissions/s/starlink> (Дата звернення 15.10. 2023).
4. Van Allen radiation belt (2020). [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt (Дата звернення 01.10. 2023).
5. Порівняння параметрів угруповання супутників LEO "Starlink" для різно орбітальної оболонки [Електронний ресурс]. Режим доступу: DOI:10.3389/frcmn.2021.643095 (Дата звернення 30.09. 2023).
6. Орбіти штучних супутників Землі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lib.qrz.ru/node/1357> (Дата звернення 22.10. 2023).
7. Новітні проекти низькоорбітальних супутникових систем [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://habr.com/ru/top/daily/> (Дата звернення 03.10. 2023)