

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО
“ _____ ” _____ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА
РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР

Тема: «Сегмент супутникової радіолінії системи Starlink»

Виконавець: _____ Максим ГЛЕЙ
(підпис)

Керівник: _____ Олексій ГОЛУБНИЧИЙ
(підпис)

Нормоконтролер: _____ Денис БАХТІЯРОВ
(підпис)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

:

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ ” 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Глея Максима Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Сегмент супутникової радіолінії системи Starlink»

затверджена наказом ректора від «29» березня 2023 р. № 421/ст

2. Термін виконання роботи: з 22.05.2023 р. по 25.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Аналіз структури системи супутникового зв'язку Starlink та визначення викликів при розгортанні системи на повну потужність; проведення розрахунків енергетики сегменту супутникової радіолінії та їх порівняння.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз будови та особливостей системи супутникового зв'язку Starlink; енергетика супутникової радіолінії системи Starlink; розрахунок енергетики сегменту супутникової радіолінії системи Starlink.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: Визначення напрямку на ШСЗ з використанням азимуту та кута місця.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	22.05.2023- 24.05.2023	Виконано
2	Вступ	25.05.2023	Виконано
3	Аналіз будови та особливостей системи супутникового зв'язку Starlink	26.05.2023- 29.05.2023	Виконано
4	Енергетика супутникової радіолінії системи Starlink	30.05.2023- 07.06.2023	Виконано
5	Розрахунок енергетики сегменту супутникової радіолінії системи Starlink	08.06.2023- 14.06.2023	Виконано
6	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	15.06.2023- 25.06.2023	Виконано

7. Дата видачі завдання: “19” травня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис керівника)

Олексій ГОЛУБНИЧИЙ

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис випускника)

Максим ГЛЕЙ

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Сегмент супутникової радіолінії системи Starlink» містить 38 сторінки, 1 рисунок, 15 використаних джерел.

ШТУЧНИЙ СУПУТНИК ЗЕМЛІ, ГЕОСТАЦІОНАРНА ОРБИТА ЗЕМЛІ, НАЗЕМНИЙ ТЕРМІНАЛ, КУТ МІСЦЯ, ВХІДНА ПОТУЖНІСТЬ.

Об'єкт дослідження – сегмент супутникової радіолінії Starlink, який є складовою системи, що покриватиме всю планету.

Предмет дослідження – ефективність роботи сегменту супутникової радіолінії Starlink.

Мета кваліфікаційної роботи – Аналіз супутникової системи Starlink та визначення доцільності покриття всієї планети на основі дослідження тематики та проведення розрахунків.

Метод дослідження – аналіз наукової літератури, розрахунки, метод порівняння.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при реалізації проекту Starlink для підвищення безпеки космічної інфраструктури на орбіті Землі та зменшення ризиків виникнення катастроф.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ БУДОВИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ STARLINK.....	9
1.1. Базові відомості про штучні супутники землі.....	9
1.2. Мережі VSAT.....	13
1.3. Опис Starlink.....	14
1.3.1. загальна інформація.....	14
1.3.2. Технічні характеристики супутникової системи Starlink.....	15
1.3.3. Вплив на космічні дослідження.....	17
1.3.4. Ризики космічного забруднення.....	17
РОЗДІЛ 2. ЕНЕРГЕТИКА СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛІНІЇ СИСТЕМИ STARLINK.....	20
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИКИ СЕГМЕНТУ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛІНІЇ СИСТЕМИ STARLINK.....	28
3.1. Розрахунок енергетики при $E_i \approx 90$	28
3.2. Розрахунок для меншого кута місця.....	32
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ШСЗ – штучний супутник Землі.

ССЗ – супутникова система зв'язку.

ШСР – штучний супутник-ретранслятор

GES (Ground Earth System) – наземна земна станція.

AES (Airborne Earth Station) – авіаційна земна станція.

LEO (Low Earth Orbit) – низька земна орбіта.

GEO (Geostationary Earth Orbit) – геостаціонарна земна орбіта.

МССЗ - малосупутникова система зв'язку.

VSAT (Very Small Aperture Terminal) – тип супутникової мережі з малим діаметром антени.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки.

МКС – Міжнародна космічна станція.

ВСТУП

Актуальність теми. Ми живемо в епоху інформаційного суспільства, де доступ до новин, переписки з людиною чи контенту знаходиться в межах хвилин. Інтернет закріпився в усіх сферах життя людини яка проводить десятки, якщо не сотні, операцій в інтернеті на день, з будь якої точки де до нього є доступ. Через інтернет задовольняються потреби людини в інформації, вирішуються робочі питання, проводяться банківські операції та виконуються безліч інших задач, що в свою чергу формує необхідність доступу до мережі з будь якої точки у світі. Це завдання покликаний вирішити проект Starlink.

Starlink – це проект американської компанії SpaceX, що ставить за мету запуск великої кількості супутників зв'язку на орбіту для створення мережі, яка покриватиме всю Землю та надаватиме доступ до інтернету в будь-якій точці планети. З початку 2019 було запуснено більше 4000 супутників, за планом для покриття планети їх кількість має досягнути 12000. Що в свою чергу формує виклики для космічних досліджень та безпеки космічної інфраструктури, з якими людство вже починає стикатися.

Мета і завдання дослідження. Аналіз супутникової системи Starlink та визначення доцільності покриття всієї планети на основі дослідження тематики та проведення розрахунків.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі наукові завдання.

1. аналіз структури системи супутникового зв'язку Starlink;
2. визначення викликів при розгортанні системи на повну потужність;
3. проведення розрахунків енергетики сегменту супутникової радіолінії;
4. проведення порівняльного аналізу розрахунків.

Об'єктом дослідження є – сегмент супутникової радіолінії Starlink, який є складовою системи, що покриватиме всю планету.

Предметом дослідження є – ефективність роботи сегменту супутникової радіолінії Starlink.

Методи досліджень. Для виконання роботи були використані такі методи досліджень як: аналіз наукової літератури, розрахунки, метод порівняння.

Практичне значення отриманих результатів.

Приведені результати аналізу сегменту супутникової радіолінії Starlink, що вказують на проблеми та ризики використання системи Starlink. На основі інформації, що представлена у кваліфікаційній роботі можливо переосмислити підходи до реалізації проекту та підвищити безпеку на орбіті планети. Уникнення катастрофи має бути найвищим пріоритетом.

Апробація отриманих результатів. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

- Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», м. Київ, 2023 р.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ БУДОВИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ STARLINK

1.1. Базові відомості про штучні супутники землі

В космосі на сьогоднішній день існує значна кількість систем зв'язку зі штучними супутниками Землі (ШСЗ), які надають глобальне, регіональне або національне покриття. Для надання різноманітних телекомунікаційних послуг використовуються конкретні орбіти та діапазони частот.

Однак, при зв'язку з мобільними абонентами стикаються зі складнощами, такими як ускладнення процесу відстеження ретранслятора, проблеми електромагнітної сумісності між станціями та іншими наземними радіослужбами, можливість блокування радіотрас об'єктами у місцевості та перебої у радіозв'язку. У таких динамічних умовах, де електромагнітна обстановка постійно змінюється, необхідні спеціальні заходи для забезпечення стійкості та надійності. Це свідчить про те, що технологія мобільних систем зв'язку (МСЗ) є однією з найбільш складних серед інших супутникових служб.

Зазвичай, до складу супутникової системи зв'язку (ССЗ) входять:

- космічний сегмент, до якого належать декілька штучних супутників-ретрансляторів (ШСР);
- наземний сегмент, до якого входять центр керування системою (ЦКС), центр запуску ШСЗ, командно-вимірювальні станції, центр керування зв'язком та шлюзові наземні земні станції (GES – Ground Earth System);
- абонентський сегмент, до якого в AMSS входять авіаційні (бортові) земні станції (AES – Airborne Earth Station);
- наземні мережі зв'язку, які базуються на відомчих каналах або каналах загального користування і до яких через відповідні інтерфейси підключаються GES [1].

Орбіти штучних супутників Землі (ШСЗ) можна класифікувати за кількома параметрами, включаючи форму, висоту, періодичність проходження над точками земної поверхні та нахил.

За формою існують кілька основних типів орбіт в ССЗ, включаючи кругові орбіти, орбіти, близькі до кругових, та еліптичні орбіти. Кругові орбіти вимагають частішої корекції за допомогою бортових двигунів ШСЗ, що призводить до збільшення вартості супутників та їхньої експлуатації. Тому найпоширенішим типом орбіт в ССЗ є орбіти, близькі до кругових. На таких орбітах висота апогею (найвища точка орбіти) та перигею (найнижча точка орбіти) відрізняються на кілька десятків кілометрів.

На еліптичних орбітах висоти апогею H_a та перигею H_p значно відрізняються. Наприклад, $H_a = 38000 \dots 40000$ км, а $H_p = 400 \dots 500$ км. Такі орбіти тепер широко використовуються в ССЗ, але не для систем ОПР. Для авіаційних ССЗ в теперішній час використовують кругові екваторіальні орбіти з періодом обертання, який дорівнює періоду обертання Землі ($T \approx 23$ год 56 хв). Такі орбіти і ШСЗ на них отримали назву геостаціонарних (GEO – Geostationary Earth Orbit). Висоти GEO $H_a = H_p = 35786$ км (≈ 36000 км).

За висотою функціонування ШСЗ відрізняють такі типи орбіт:

- низькі земні (LEO – Low Earth Orbit), коли $H < 2000$ км;
- середні земні (MEO – Medium Earth Orbit), коли виконується умова 2000 км $< H < 20000$ км;
- геостаціонарні земні (GEO – Geostationary Earth Orbit), коли $H = 35786$ км; – геосинхронні (GSO – Geosynchronous Orbit), коли $H = 35000$ км;
- середні кругові (ICO – Intermediate Circular Orbit), коли $H = 10000$ км (випадок MEO);
- високі еліптичні (HEO – Highly Elliptical Orbit). У теперішній час для систем AMSS використовуються орбіти GEO (стандарт INMARSAT AERO). Однак з метою збільшення покриття, пропускнуої спроможності ССЗ, ефективності використання частотних ресурсів та зниження енергетичних вимог планується використання MEO та LEO [1].

Залежно від періодичності проходження над точками земної поверхні, орбіти штучних супутників Землі (ШСЗ) можуть бути класифіковані як синхронні та несинхронні. Синхронні орбіти, у свою чергу, поділяються на ізомаршрутні і квазіізомаршрутні. В ізомаршрутних орбітах проекції орбіт ШСЗ на земну поверхню збігаються щодня. У квазіізомаршрутних орбітах такий збіг відбувається один раз протягом кількох днів. У несинхронних орбітах траєкторії, що відповідають двом будь-яким повним обертам ШСЗ навколо Землі, не збігаються.

Нахиленням орбіти вважається кут між площинами екватора Землі та орбіти ШСЗ. Відлік кута нахилення α відбувається від площини екватора до площини орбіти проти годинникової стрілки. За кутом нахилення відрізняють такі типи орбіт: прямі ($\alpha < 90^\circ$), зворотні ($\alpha > 90^\circ$), полярні ($\alpha = 90^\circ$), квазіполярні ($\alpha \approx 90^\circ$), екваторіальні (α дорівнює 0 або 180°). При $\alpha = 0$ ШСЗ рухається в напрямку обертання Землі (тобто зі сходу на захід). Таким чином $\alpha = 0$ відповідає орбіті GEO.

Низькоорбітальні малосупутникові системи зв'язку (МССЗ) можна класифікувати на три типи: системи зонового зв'язку, системи з запам'ятовуванням інформації на супутниках і її зчитуванням за запитом, та системи глобального зв'язку в реальному часі.

У системах першого типу ретранслятори здійснюють пряму передачу сигналів. Зв'язок між двома земними станціями можливий, якщо супутник перебуває в області їх видимості. Зв'язок між абонентами може бути сеансовим, відповідно до попереднього графіку, або ініційованим прийомом пілот-сигналу.

Системи другого типу можна порівняти з системами електронної пошти. Інформація, яка зберігається на супутнику, зчитується під час проходження супутника над відповідним абонентом. У таких системах неможливий прямий телефонний зв'язок.

Системи третього типу найбільш придатні для авіаційного електровз'язку. Примірниками систем цього типу є "Iridium" і "Globalstar".

Низькоорбітальні малосупутникові системи зв'язку (МССЗ) можна розділити на два типи залежно від надання послуг: системи пакетного передавання даних і системи радіотелефонного зв'язку та передавання даних.

У системах пакетного передавання даних швидкості передачі можуть досягати декількох десятків кілобіт на секунду. Вимоги до миттєвості доставки інформації менш жорсткі. Це дозволяє:

- експлуатувати супутники без необхідності коригування їх орбіт, що спрощує систему орієнтації, зменшує масу супутників (50-200 кг) і вартість;
- використовувати метровий діапазон хвиль (130-400 МГц), слабо спрямовані антени та передавачі невеликої потужності (2-10 Вт), що значно полегшує і здешевлює земну станцію та мобільні термінали.

У системах радіотелефонного зв'язку обслуговування мобільних абонентів повинно бути неперервним у реальному часі. Це вимагає стабілізації орбіт супутників, що ускладнює систему і підвищує її вартість. Тому кількість радіотелефонних каналів на одному супутнику повинна бути значною, а діапазон частот ширшим (1,5 ГГц). Регіональні земні станції мають складне комунікаційне обладнання. Один з типових прикладів регіональної МССЗ з низькою орбітою (LEO) є система "Гонець".

1.2. Мережі VSAT

Мережа VSAT (Very Small Aperture Terminal) є типом супутникової мережі, де використовуються малий діаметр антени (часто менше 3 метрів). Ця технологія дозволяє забезпечити зв'язок між різними точками земної поверхні і супутниками.

Основною складовою мережі VSAT є термінали, які складаються з зовнішньої антени, приймально-передавального обладнання (трансивера) і внутрішнього обладнання для з'єднання з локальною мережею. Кожен VSAT-термінал працює як вузол мережі і може здійснювати двосторонній зв'язок з супутником.

Мережі VSAT широко використовуються в різних галузях, таких як телекомунікації, охорона довкілля, банківські послуги, нафтогазова промисловість, транспорт і багато інших. Вони дозволяють забезпечити доступ до Інтернету, передавати дані, голосові та відео сигнали, здійснювати відеоконференції і багато

іншого у віддалених або недоступних територіях, де провідний зв'язок є складним або недоступним.

Із погляду трафіку існує три основних варіанти організації зв'язків у мережах VSAT: "точка–точка", "зірка", "кожний з кожним".

Мережа типу "точка-точка" представляє собою просту форму дуплексної лінії зв'язку між двома віддаленими станціями. Це означає, що комунікація відбувається безпосередньо між цими двома станціями, без участі інших проміжних вузлів.

Мережа типу "зірка" використовується для багатоспрямованого передавання трафіку між центром мережі і периферійними пунктами зв'язку. В контексті мереж VSAT, ця структура є стандартною. Вона характеризується тим, що всі комунікаційні лінії спрямовані від центру мережі до кожного периферійного пункту. Це дає зручність управління, простоту встановлення і недорогість обладнання на кінцевих станціях. Мережа типу "зірка" є зручною, коли потрібно передавати дані одночасно на кілька терміналів або збирати дані одночасно. Проте, в такій мережі два периферійних пункти зв'язку не можуть безпосередньо обмінюватися даними між собою, вони повинні здійснювати комунікацію через центральну станцію. Таким чином, сигнал у такій лінії проходить шлях до супутника-ретранслятора і повертається назад двічі.

У мережі "кожний з кожним" (повнозв'язаній мережі) забезпечується пряме з'єднання між будь-якими станціями VSAT, які розташовані в усіх пунктах зв'язку. Комунікація між двома станціями у такій мережі встановлюється безпосередньо через супутник за допомогою одного каналу зв'язку. Ця схема з'єднання є дуже ефективною для телефонних мереж у важкодоступних і віддалених районах, а також для мереж передавання даних з обмеженою кількістю віддалених терміналів VSAT.

1.3. Опис Starlink

1.3.1. загальна інформація

Starlink - це проект компанії SpaceX, що базується в США, і має на меті розробку високопродуктивної супутникової платформи для створення та запуску

великої кількості комунікаційних супутників у космос. Ця система надає доступ до широкопasmового Інтернету в будь-якій точці планети. У 2020 році компанія SpaceX розпочала надавати послуги Starlink в Канаді та США.

В січні 2020 року SpaceX стала володарем найбільшої кількості супутників на орбіті (180 штук). Starlink - це глобальна супутникова система, яка розгортається з метою забезпечення швидкого широкопasmового доступу в Інтернет в тих місцях, де Інтернет був ненадійним, дорогим або зовсім недоступним.

Угруповання Starlink складається з двох окремих супутникових мереж. Перша мережа передбачає наявність 4425 супутників у діапазонах Ku і Ka. Робоча орбіта для цих супутників знаходиться на висоті до 550 км над Землею.

Ku-діапазон використовує частоти сантиметрових хвиль і відповідає діапазону частот від 12 до 18 ГГц згідно з визначенням IEEE (Інститут електротехніки та електроніки). Цей діапазон охоплює довжини хвиль від 2,5 до 1,67 см. В супутниковому зв'язку також використовується частина X-діапазону, який включає діапазон Ku з частотами від 10,7 до 18 ГГц.

Ka-діапазон представляє собою діапазон частот, який охоплює сантиметрові та міліметрові хвилі, і використовується головним чином для супутникового радіозв'язку та радіолокації. За визначенням IEEE, цей діапазон простягається від 26,5 до 40 ГГц електромагнітного спектру, що відповідає довжинам хвиль від 1,13 до 0,75 см. В січні 2015 року SpaceX офіційно оголосила про створення комунікаційної супутникової мережі. Прогнозувалося, що ця мережа зможе обробляти 50% всього Інтернет-трафіку та 10% трафіку великих густонаселених міст.

У березні 2017 року компанія оголосила про намір створити сузір'я супутників у V-діапазоні, які будуть розташовуватися на не-геосинхронних орбітах для надання комунікаційних послуг в електромагнітному спектрі, що раніше не використовувався широко для комерційних комунікаційних послуг. Це сузір'я буде складатися з 7518 супутників, які доповнять раніше заявлені 4425 супутників, що працюватимуть у Ku та Ka-діапазоні. Більша група (7518 супутників) буде

розташована на орбіті на висоті 340 км, тоді як менша група (4425 супутників) працюватиме на висотах 550 км та 1200 км [6].

У кінці 2017 року компанія оприлюднила свій план щодо рішення проблеми збільшення кількості космічного сміття. Згідно з цим планом, супутники зі сузір'я Starlink, які вичерпають свій термін експлуатації, будуть в змозі самостійно знижуватися з орбіти, використовуючи свої власні рушії, і контрольовано спускатися у атмосфері. Цей процес буде здійснюватися протягом року після закінчення їх терміну використання, який становить 5-7 років. Якщо система власних рушіїв супутника вийде з ладу, то завдяки висоті орбіти (приблизно 550 км) супутник зможе потрапити у щільні шари атмосфери протягом 1-5 років та повністю згоріти там, уникнувши накопичення сміття на навколоземній орбіті.

1.3.2. Технічні характеристики супутникової системи Starlink

Згідно з документами, поданими до Федеральної комісії зв'язку США, супутники в космосі будуть взаємодіяти один з одним за допомогою лазерного променя на частоті понад 10 ГГц. Зв'язок між земними станціями та користувачами буде відбуватися в радіодіапазонах Ku та Ka на частоті 12 ГГц. Ku-антени будуть більш надійними навіть у хмарну та дощову погоду, тоді як Ka-антени забезпечать значно більшу пропускну здатність [6].

Обіцяна швидкість передачі даних становить 1 Гбіт/с для кожного користувача. Кожен запуск 60 супутників забезпечує потенційну пропускну здатність в 1 терабіт, що може підтримувати одночасну передачу високоякісного контенту для 40 000 користувачів. Зазвичай зв'язок з геостаціонарними супутниками супроводжується круговою затримкою сигналу приблизно 239 мс, але іноді вона може досягати 600 мс. Оскільки супутники Starlink будуть обертатися на відстані, яка становить лише 1/30 цієї відстані, затримка сигналу складатиме всього 25-30 мс, що еквівалентно зв'язку по кабелю або оптоволокну. Система буде використовувати протокол peer-to-peer.

Користувацькі термінали та наземні станції супутникової системи Starlink на відміну від Iridium Satellite Constellation, де сигнал безпосередньо поступає в

телефон, система Starlink вимагатиме використання додаткового терміналу, який включає супутникову тарілку з роутер. Цей термінал буде слідкувати за супутниками за допомогою фазованої антенної решітки.

У березні 2020 року, SpaceX отримала дозвіл від Федеральної комісії зі зв'язку США на розгортання 1 млн. наземних антен розміром 48 см, що дозволить обслуговувати саме таку кількість користувацьких терміналів. Після запуску 840 супутників розпочалося тестування, під час якого були отримані наступні результати:

- Затримка сигналу становила від 20 до 94 мс.
- Швидкість завантаження коливалася від 11 до 60 Мбіт/с.
- Швидкість відправлення даних становила від 5 до 18 Мбіт/с.

Для прямого підключення до глобальної мережі компанія SpaceX вимагає встановлення сотень наземних станцій обробки даних. Однак, завдяки великій кількості супутників, це число є незначним. У випадку, якщо неподалік користувача відсутня така станція, супутники зможуть швидко передавати інформацію один одному за допомогою лазера, поки один із супутників знайде потрібну станцію для обслуговування менш населених територій.

Наземний термінал Starlink-2 є важливою складовою глобальної супутникової системи Starlink і призначений для бездротового підключення користувачів до Інтернету. Швидкість передачі даних може варіюватися в діапазоні від 8 Мбіт/с до 200 Мбіт/с або навіть до 500 Мбіт/с. Затримки передачі сигналу становлять приблизно від 15 до 40 мс. Термінал живиться від стандартної мережі змінного струму з напругою 220 В та має споживану потужність в діапазоні 25–30 Вт. Антена терміналу може сканувати простір з кутом $\pm 50^\circ$. Кожен супутник буде видимим для антени протягом близько 3-5 хвилин, після чого відбувається перемикання на наступний супутник.

Зона покриття системи охоплює приблизно 900 кілометрів навколо наземних хабів. У комплекті поставки включається наступне обладнання: зовнішній елемент (ODU), внутрішній елемент (IDU) і кабелі. Зовнішній елемент (ODU) представляє собою антену, яка монтується на стійці і має фазовані решітки. Вона розташовується

під захисним ковпаком прямокутної форми, що пропускає радіосигнали. Усередині корпусу антени знаходиться підсилювач слабкого сигналу, відомий як Low-Noise Amplifier (LNA). Внутрішній елемент (IDU) складається з Wi-Fi роутера, блока живлення та можливого перехідника для підключення користувацького обладнання через роз'єм RG-45, якщо це необхідно.

Система управління Starlink здійснюється за допомогою мобільного додатку на смартфоні. Найкращі показники швидкості та стабільності сигналу можна отримати в умовах сприятливої погоди і без густого хмарного покриву. У випадку, коли температура перевищує 50°C, антени автоматично відключаються. Рекомендується використовувати будь-які доступні заходи для захисту антени від прямого сонячного проміння. Усі термінали мають вбудовані GPS-датчики, а координати кожного терміналу зберігаються на серверах глобальної супутникової системи Starlink. При розгортанні антени необхідно забезпечити пряму видимість на кут 100° відносно центру антени [6].

1.3.3. Вплив на космічні дослідження

Одна з проблем полягає в тому, що супутники Starlink мають яскраві рефлексії, коли сонячне світло відбивається від їхніх панелей і відображається на датчиках телескопів та зменшує кількість зібраних даних. Це створює яскраві смуги на знімках неба які затьмарюють зірки та інші об'єкти, заважаючи виявленню віддалених об'єктів або слабких сигналів. Крім того, супутники в системі також набагато більші за звичайні, що полегшує їх виявлення та відстеження. Це може спричинити проблеми з інструментами, які покладаються на відстеження об'єктів на нічному небі, наприклад, для астрометрії. SpaceX вживає заходів для зменшення яскравості супутників, покриваючи їх темним матеріалом. Однак поки неясно, наскільки ефективним буде цей захід [7].

1.3.4 Ризики космічного забруднення

Утворення космічного сміття є серйозним ризиком, пов'язаним з використанням супутникової системи Starlink та будь-якої іншої супутникової

мережі. Зі збільшенням кількості супутників Starlink зростає ймовірність їх зіткнення з іншими супутниками або космічними об'єктами. Кожне зіткнення може створити значну кількість космічного сміття, що загрожує як іншим супутникам, так і майбутнім космічним місіям. Космічне сміття залишається у орбіті на довгий час, що може призвести до накопичення сміття та зростання загрози для майбутніх космічних місій. Великі фрагменти сміття можуть стати особливо небезпечними, оскільки вони можуть спричинити ланцюгові реакції зіткнень [8].

З кожним зіткненням зростає ймовірність нових зіткнень, оскільки кожний фрагмент стає потенційною загрозою для інших супутників та космічних апаратів. Це може створити небезпеку для існуючих та майбутніх космічних місій.

Зіткнення може призвести до серйозних наслідків для комунікаційних систем, навігаційних систем, зондів та інших космічних апаратів, які використовуються для наукових, комерційних або військових цілей.

Космічне сміття може становити загрозу для Міжнародної космічної станції та астронавтів, які перебувають на борту. Іноді МКС змушені виконувати маневри уникнення зіткнення, щоб уникнути зіткнення зі сміттям.

Зіткнення можуть пошкодити космічну інфраструктуру, таку як супутникові мережі, супутникові телескопи та інші пристрої. Це може призвести до втрати зв'язку, наукових даних та інших послуг, які залежать від цих систем.

Очищення орбіти від сміття у разі ланцюгової реакції, спричиненої супутниками Starlink або будь-якою іншою супутниковою мережею, є складним завданням, і час, необхідний для повного очищення орбіти, залежить від кількох факторів. Основні фактори, що впливають на час очищення орбіти від сміття, включають:

1. Кількість сміття: Чим більше сміття виникає внаслідок ланцюгової реакції зіткнень, тим більше часу знадобиться на його очищення. Кількість сміття може зростати з кожним новим зіткненням ланцюгової реакції.

2. Розмір і маса сміття: Великі фрагменти сміття можуть бути легше виявлені і видалені, ніж менші шматочки. Очищення від менших фрагментів може вимагати більше часу та зусиль.

3. Технології очищення: Розробка та використання технологій для активного очищення космічного сміття є активною галуззю. Використання супутників-мисливців на сміття, засобів затримання та видалення сміття, а також інших інноваційних методів може прискорити процес очищення орбіти.

4. Міжнародна співпраця: Очищення орбіти від сміття є завданням, яке вимагає спільних зусиль і міжнародної співпраці. Установлення нормативних актів, спільне використання ресурсів та співпраця між країнами та супутниковими операторами може сприяти швидшому очищенню орбіти.

Враховуючи всі ці фактори, точний час очищення орбіти від сміття у разі ланцюгової реакції Starlink важко передбачити. Процес очищення може зайняти роки або навіть десятиліття, залежно від складності ситуації та швидкості впровадження технологій очищення.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У цьому розділі було розглянуто базові відомості про штучні супутники землі. Представлена класифікація систем супутникового зв'язку за їх складом та орбіти штучних супутників Землі (ШСЗ) за формою, висотою, періодичністю проходження над точками земної поверхні. За формою існують кілька основних типів орбіт в ССЗ, а саме: кругові орбіти, орбіти, близькі до кругових, та еліптичні орбіти. За висотою функціонування ШСЗ відрізняють такі типи орбіт: низькі земні, середні земні, геостаціонарні земні, геосинхронні, середні кругові, високі еліптичні. Залежно від періодичності проходження над точками земної поверхні, орбіти штучних супутників Землі (ШСЗ) можуть бути класифіковані як синхронні та несинхронні.

Розглянуто три основних варіанти організації зв'язків у мережах VSAT: “точка–точка”, “зірка”, “кожний з кожним”.

Описана ССЗ Starlink, її супутникова лінія, наземні термінали зв'язку, негативний вплив на космічні дослідження та ризики космічного забруднення.

РОЗДІЛ 2

ЕНЕРГЕТИКА СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛІНІЇ СИСТЕМИ STARLINK

Проектування радіотехнічних систем та мереж на основі енергетичного розрахунку радіоліній, складається з обґрунтованого розрахунку енергетичних параметрів апаратури: потужності передавача, коефіцієнта шуму приймача, коефіцієнта підсилення антен і втрат в антенно-фідерному тракті, які відповідають заданій якості та надійності роботи мережі. Після енергетичного розрахунку визначаються структура станції та елементна база, уточнюється структура радіоканалів і мережі в цілому, проводиться їх техніко-економічне обґрунтування.

Взаємозв'язок рівнів потужності сигналу на вході і виході радіолінії може бути представлений виразом (2.1).

$$P_{\text{прм}}^{\text{дБм}} = P_{\text{прд}}^{\text{дБм}} - L_{\Sigma}^{\text{дБ}}, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{прм}}^{\text{дБм}}$ - потужність сигналу на вході приймача, дБм;

$P_{\text{прд}}^{\text{дБм}}$ - потужність сигналу на виході передавача, дБм;

$L_{\Sigma}^{\text{дБ}}$ - сумарне загасання сигналу супутникової радіолінії, дБ.

Позначення «дБм» означає «дБмВт», тобто рівень сигналу у децибелах відносно опорного значення потужності 1 мВт. Співвідношенням для переведення потужності сигналу (мВт) у рівень потужності сигналу (дБм) є

$$P_{\text{прд}}^{\text{дБм}} = 10 \lg P^{\text{мВт}},$$

Будь-яке співвідношення, виражене у разях, пов'язане з потужністю, можна використати формулу для переведення в децибели

$$L_{\Sigma}^{\text{дБ}} = 10 \lg L_{\Sigma},$$

де $L_{\Sigma}^{\text{дБ}} = P_{\text{прд}}^{\text{дБм}} / P_{\text{прм}}^{\text{дБм}}$ – загасання сигналу в супутниковій радіолінії у разях.

Для радіолінії «ШСЗ – GES» рівень потужності сигналу на вході приймача GES $P_{прм}^{дБм}$ може бути визначений з урахуванням (1) за формулою (2).

$$P_{прм}^{дБм} = P_{прд}^{дБм} - \Delta W_{прд}^{дБ} + G_{прд}^{дБ} - W_0^{дБ} - W_{дод}^{дБ} + G_{прм}^{дБ} - \Delta W_{прм}^{дБ}, \quad (2.2)$$

де $P_{прд}^{дБм}$ – рівень потужності сигналу на виході передавача ШСЗ, дБм;

$\Delta W_{прд}^{дБ}$ – втрати у антенно-фідерному тракті передавальної системи на ШСЗ, дБ;

значення $\Delta W_{прд}^{дБ}$ залежить від конструкції антенно-фідерного тракту, діапазону робочих частот та може бути розраховано за формулою (2.3);

$\Delta W_{прм}^{дБ}$ – втрати у антенно-фідерному тракті приймальної системи GES, дБ;

значення $\Delta W_{прм}^{дБ}$ аналогічно до $\Delta W_{прд}^{дБ}$ може також бути розраховано за формулою (2.3);

$G_{прд}^{дБ}$ – коефіцієнт підсилення передавальної апертурної антени ШСЗ, дБ, значення якого можна визначити за формулою (2.4);

$G_{прм}^{дБ}$ – коефіцієнт підсилення приймальної апертурної антени GES, дБ, значення якого можна також визначити за формулою (2.4);

$W_0^{дБ}$ – втрати сигналу у вільному просторі, дБ, значення яких можна визначити за формулою (2.5);

$W_{дод}^{дБ}$ – Загасання сигналу в радіолінії, виражене в децибелах (дБ), включає в себе загасання радіосигналу в атмосфері, втрати сигналу через опади та втрати, спричинені неточністю наведення антени. (2.8).

Налаштування антени - це процес налаштування системи з метою досягнення оптимальної роботи. Включає в себе правильне вирівнювання і орієнтацію антени для отримання максимально можливої сигнальної якості та забезпечення оптимального зв'язку. Під час юстування антени зазвичай враховуються такі фактори:

1. Напрямок - Антену слід правильно спрямувати на цільовий об'єкт або сигнальний джерело.

2. Кут нахилу - Антена повинна мати відповідний кут нахилу, щоб оптимально взаємодіяти з сигналом.

3. Поляризація - Антенна система повинна бути налаштована на відповідну поляризацію сигналу (горизонтальну, вертикальну або кругову).

4. Захист від перешкод - Антену слід розташувати таким чином, щоб мінімізувати вплив перешкод, таких як будівлі, дерева або інші перешкоди, які можуть знижувати якість сигналу.

Параметри підключення - Налаштування роз'ємів, кабелів та інших параметрів підключення антени для забезпечення правильної роботи системи.

Налаштування антени є важливим кроком у забезпеченні оптимального зв'язку та максимальної продуктивності антенної системи.

Втрати у антенно-фідерному тракті передавальної системи на ШСЗ та приймальної системи GES

$$\Delta W^{\text{дб}} = 10 \lg\left(\frac{1}{\eta}\right), \text{ дБ}, \quad (2.3)$$

де $\eta \approx 0,85 \dots 0,98$ – коефіцієнт передачі потужності антенно-фідерного тракту.

Коефіцієнт підсилення апертурної антени визначається за діаметром її дзеркала та довжині робочої хвилі:

$$G^{\text{дб}} = 10 \lg\left[\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) \gamma_A\right], \text{ дБ}, \quad (2.4)$$

де D – діаметр апертури антени, м;

λ – довжина робочої хвилі у радіолінії “ШСЗ – GES”, м;

$\gamma_A \approx 0,5 \dots 0,7$ – коефіцієнт використання площі апертури антени.

Втрати енергії радіохвиль для радіолінії “ШСЗ – GES” у вільному просторі визначаються виразом

$$W_0^{\text{дб}} = 20 \lg\left(\frac{4\pi R_{\Pi}}{\lambda}\right), \text{ дБ}, \quad (2.5)$$

де R_{Π} – похила дальність, м; відстань по прямій від GES до ШСЗ, яка може бути визначена за допомогою виразу

$$R_{\Pi} = \sqrt{R3^2 + (R3 + H)^2 - 2(R3 + H)R3\cos\rho}, \text{ м}, \quad (2.6)$$

де $R3 = 6,367 * 10^6$ м – радіус Землі;

H – висота орбіти ШСЗ, м;

ρ – топоцентричний параметр, з виразу

$$\cos\rho = \cos Lat \cos(D - Lon) \cos\text{Ш} + \sin Lat \sin\text{Ш}, \quad (2.7)$$

де Lon – географічна довгота підсупутникової точки, $^{\circ}$ сх. д.; градуси західної довготи враховуються як від’ємні, тобто із знаком «-»;

Lat – географічна широта підсупутникової точки, $^{\circ}$ пн.ш.; градуси південної широти враховуються як від’ємні, тобто із знаком «-»;

D – географічна довгота розташування GES, $^{\circ}$ сх.д.; градуси західної довготи враховуються як від’ємні, тобто із знаком «-»;

Ш – географічна широта розташування GES, $^{\circ}$ пн.ш.; градуси південної широти враховуються як від’ємні, тобто із знаком «-».

Підсупутниковою точкою є точка на поверхні Землі, яка утворюється при перетині поверхні Землі з прямою, яка сполучає центр Землі та ШСЗ.

Умовним додатним напрямом градусів довготи є напрям на схід, а для градусів широти – на північ.

Для забезпечення прямого підключення до глобальної мережі, компанія SpaceX вимагає розміщення сотень наземних станцій обробки даних. Однак, завдяки великій кількості супутників, ця вимога стає незначною. У випадку, коли немає наземної станції поблизу користувача, супутники можуть швидко передавати інформацію один одному за допомогою лазерної технології, поки один з супутників не знайде відповідну наземну станцію для обслуговування менш населених територій.

Сузір'я супутників, що працюватимуть у Ku та Ka-діапазоні буде розташоване на орбіті на висоті 550.

Додаткове загасання сигналу в радіолінії $W_{\text{дод}}^{\text{дб}}$ складається із загасання радіосигналу в атмосфері $W_{\text{А}}^{\text{дб}}$, його загасання в опадах (гідрометеорах) $W_{\text{Г}}^{\text{дб}}$ та втрат через неточність наведення антен $W_{\text{Н}}^{\text{дб}}$:

$$W_{\text{дод}}^{\text{дб}} = W_{\text{А}}^{\text{дб}} + W_{\text{Г}}^{\text{дб}} + W_{\text{Н}}^{\text{дб}}, \text{ дБ.} \quad (2.8)$$

При вивченні різних методів розрахунку напруженості поля було виявлено, що умови приймання сигналу визначаються не абсолютним значенням його напруженості, а відношенням напруженості поля до рівня перешкод. Саме з цієї причини важливим є вміння визначати рівень перешкод. Знання того, в якій мірі поле сигналу повинно перевищувати рівень перешкод для даного виду зв'язку, дозволяє визначити необхідну напруженість поля в місці приймання, а, відповідно, і інші параметри радіозв'язку, які розраховуються. Однак, при розгляді перешкод обмежимося зовнішніми перешкодами, відділивши їх від джерел перешкод, які виникають в самому приймальному обладнанні.

Зовнішні перешкоди включають промислові, атмосферні та космічні перешкоди. Промислові перешкоди створюються різного роду електричними установками, які широко застосовуються в народному господарстві та побуті. Рівень промислових перешкод особливо великий у великих містах з розвинутою промисловістю. Для зниження рівня промислових перешкод найефективнішими є заходи, що вживаються на місці їх виникнення, такі як використання фільтрів та екранів, які перешкоджають випромінюванню радіохвиль та поширенню радіохвиль по живильних проводах. Рівень промислових перешкод визначається за допомогою спеціальних радіокомпараторів - вимірників рівня перешкод, які одночасно використовуються для виявлення джерел перешкод та контролю ефективності заходів щодо їх придушення.

Атмосферні перешкоди були вперше виявлені винахідником радіо А. С. Поповим, який у 1895 році реєстрував грозові розряди за допомогою свого

грозівідмічника. А. С. Попов вказав, що джерелом атмосферних перешкод є розряди накопичених в атмосфері статичних зарядів, які мають коливальний характер і можна розглядати як гігантські вібратори. Встановлено, що основним джерелом атмосферних перешкод дійсно є грози. Слід розрізняти місцеві грози, що створюють перешкоди, від перешкод, що походять від глобальних вогнищ грозової діяльності. Існування останніх пояснює, чому перешкоди впливають на прийомні пристрої навіть під час відсутності місцевих гроз [2].

Загасання в атмосфері $W_A^{дб}$ спричинюється головним чином поглинанням в тропосфері та має яскраво виражений частотно-залежний характер з резонансними піками на частотах 22 та 165 ГГц для водяної пари, а також 60 та 120 ГГц для кисню. Довжина шляху розповсюдження радіосигналу в атмосфері і, як наслідок, загасання залежить від еквівалентної товщини атмосфери та від кута місця ЕІ налаштування антени земної станції:

$$W_A^{дб} = \frac{\gamma_o h_o + \gamma_B h_B}{\sin El}, \text{ дБ}, \quad (2.9)$$

де γ_o – погонне загасання радіосигналу у кисні, дБ/км; у діапазоні частот 10...20 ГГц

$$\gamma_o \approx 0,02 \text{ дБ/км};$$

γ_B – погонне загасання у водяній парі, дБ/км; при абс. вологості повітря 7,5 г/м³ на частоті 10 ГГц $\gamma_B \approx 0,004$ дБ/км; 15 ГГц – $\gamma_B \approx 0,03$ дБ/км; 20 ГГц – $\gamma_B \approx 0,3$ дБ/км;

h_o – еквівалентна товщина (висота) шару кисню; на практиці з достатньою точністю можна вважати, що $h_o \approx 6$ км;

h_B – еквівалентна товщина (висота) шару водяної пари; на практиці з достатньою точністю можна вважати, що $h_o \approx 2,2$ км.

Важливими параметрами, які визначають напрям на ШСЗ чи інший об'єкт у місці розташування користувача (GES, спостерігача тощо), є азимут Az та кут місця El , які вимірюються у градусах (рис. 1).

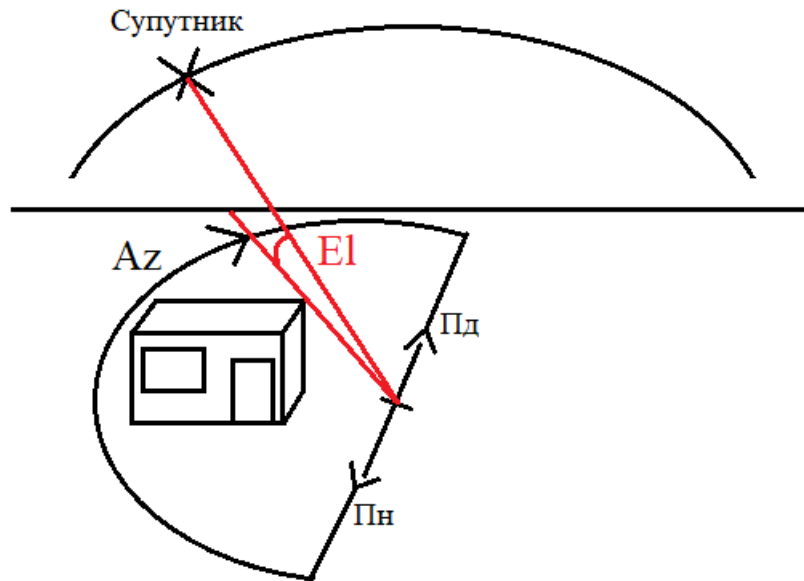


Рис. 2.1. Визначення напрямку на ШСЗ з використанням азимуту та кута місця

Азимут (Az - Azimuth) представляє собою кут, що вимірюється у площині горизонту (горизонтальній площині або площині, паралельній поверхні Землі в місці спостерігача або геостаціонарної земної станції), і відраховується за годинниковою стрілкою від північного напрямку до проекції напрямку на спостережуваний об'єкт (напрямок широти, зеніт-шлях - ШЗ) у площині горизонту. Азимут визначає просторову орієнтацію (напрямок) на спостережуваний об'єкт у горизонтальній площині. Під час налаштування земної антени азимут вказує, в якому напрямку слід повернути антену (зокрема, головний промінь її діаграми напрямленості) відповідно до сторін світу [5].

Кут місця (El – Elevation angle) є кутом між напрямом на спостережуваний об'єкт (ШСЗ) та площиною горизонту [5].

Кут місця залежить від географічних координат розташування GES, а також від положення ШСЗ на орбіті. В загальному випадку кут місця може бути визначений з виразу

$$El = \arctg \frac{\cos \rho - \alpha}{\sin \rho}, \text{ град.}, \quad (2.10)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R3}{R3+H}.$$

Загасання радіосигналу в опадах $W_{\Gamma}^{\text{дб}}$ можна припустити рівним 3 дБ, а втрати через неточність наведення антен $W_{\text{H}}^{\text{дб}} \approx 1$ дБ.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

В даному розділі представлена інформація щодо розрахунку енергетики супутникової радіолінії при простих погодних умовах з урахуванням потужності передавача, коефіцієнта шуму приймача, коефіцієнта підсилення антен і втрат в антенно-фідерному тракті, які відповідають параметрам обладнання. Також для обчислення важливою складовою є параметр кута місця, що залежить від географічних координат розташування GES, а також від положення ШСЗ на орбіті, і є кутом між напрямом на спостережуваний об'єкт та площиною горизонту. За результатом оформлені результати розрахунків у 3 розділі кваліфікаційної роботи, з порівнянням результатів при різних кутах місця.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИКИ СЕГМЕНТУ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛІНІЇ СИСТЕМИ STARLINK

3.1. Розрахунок енергетики при $EI \approx 90$

На відміну від супутникового зв'язку через Iridium Satellite Constellation, сигнал від якого подається безпосередньо у телефон, система Starlink потребуватиме додаткового термінала апертурою $D = 0.513$ м та коефіцієнтом використання площі апертури $\gamma_A = 0,7$. Антена підтримує зв'язок із супутником в інтервалі приблизно від 3 до 5 хвилин, після чого відбувається перемикання на наступний апарат.

Супутники знаходяться на висоті $H = 5.5 \cdot 10^5$ м та використовують діапазон частот сантиметрових довжин хвиль, що використовуються в супутниковому телебаченні. Він працює на частоті 12 ГГц з довжиною хвиль $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м та коефіцієнтом передачі потужності антенно-фідерного тракту $\eta = 0,9$. Втрати через неточність наведення антен складають $W_H^{дб} = 1$ дБ.

При розрахунку враховуються такі фактори: загасання радіосигналу у кисні $\gamma_o = 0,02$ дБ/км, водяній парі $\gamma_B = 0,004$ дБ/км, опадах $W_{\Gamma}^{дб} = 3$ дБ; еквівалентна товщина шару кисню $h_o = 6$ км та водяної пари $h_B = 2,2$ км, $R_3 = 6,367 \cdot 10^6$ м – радіус Землі.

Координати відповідають Дарницькому району м. Києва - супутник знаходиться майже над абонентом.

Lon – 30.73, географічна довгота підсупутникової точки, $^{\circ}$ сх.д.;

Lat – 50.43, географічна широта підсупутникової точки, $^{\circ}$ пн.ш.;

Д – 30.65, географічна довгота розташування GES, $^{\circ}$ сх.д.;

Ш – 50.41, географічна широта розташування GES, $^{\circ}$ пн.ш.;

Позначення «дБм» означає «дБмВт», тобто рівень сигналу у децибелах відносно опорного значення потужності 1 мВт. Співвідношенням для переведення потужності сигналу (мВт) у рівень потужності сигналу (дБм) є

$$P_{\text{прд}}^{\text{дБм}} = 10 \lg P^{\text{мВт}} = 10 \lg(15 * 1000) = 41.761, \text{ дБм} \quad (3.1)$$

ρ – топоцентричний параметр, з виразу

$$\rho = \cos Lat \cos(D - Lon) \cos III + \sin Lat \sin III, \quad (3.2)$$

$$\rho = \cos(30.73) \cos(30.65 - 30.73) \cos(50.41) + \sin(50.43) \sin(50.41) = 0.055$$

Кут місця (El – Elevation angle) є кутом між напрямом на спостережуваний об'єкт (ШСЗ) та площиною горизонту.

Кут місця залежить від географічних координат розташування GES, а також від положення ШСЗ на орбіті. В загальному випадку кут місця може бути визначений з виразу

$$El = \arctg \frac{\cos \rho - \alpha}{\sin \rho} = \arctg \frac{\cos(0.055) - 0.92}{\sin(0.055)} = 89.31, \text{ град.}, \quad (3.3)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_3}{R_3 + H} = \frac{6,367 * 10^6}{6,367 * 10^6 + 5.5 * 10^5} = 0.92$$

Загасання в атмосфері $W_A^{\text{дб}}$ спричинюється головним чином поглинанням в тропосфері та має яскраво виражений частотно-залежний характер з резонансними піками на частотах 22 та 165 ГГц для водяної пари, а також 60 та 120 ГГц для кисню. Довжина шляху розповсюдження радіосигналу в атмосфері і, як наслідок, загасання залежить від еквівалентної товщини атмосфери та від кута місця El налаштування антени земної станції:

$$W_A^{\text{дб}} = \frac{\gamma_o h_o + \gamma_B h_B}{\sin El} = \frac{0.02 * 6 + 0.004 * 2.2}{\sin(89.31)} = 0.129, \text{ дБ}, \quad (3.4)$$

Додаткове загасання сигналу в радіолінії $W_{\partial o \partial}^{\partial \delta}$ складається із загасання радіосигналу в атмосфері $W_A^{\partial \delta}$, його загасання в опадах (гідрометеорах) $W_{\Gamma}^{\partial \delta}$ та втрат через неточність наведення антен $W_H^{\partial \delta}$:

$$W_{\partial o \partial}^{\partial \delta} = W_A^{\partial \delta} + W_{\Gamma}^{\partial \delta} + W_H^{\partial \delta} = 0.129 + 3 + 1 = 4.129 \text{ , дБ.} \quad (3.5)$$

R_{Π} – похила дальність, м; відстань по прямій від GES до ШСЗ, яка може бути визначена за допомогою виразу

$$\begin{aligned} R_{\Pi} &= \sqrt{R_3^2 + (R_3 + H)^2 - 2(R_3 + H)R_3 \cos \rho} = \quad (3.6) \\ &= \sqrt{(6,367 * 10^6)^2 + ((6,367 * 10^6) + 5.5 * 10^5)^2 - 2((6,367 * 10^6) + 5.5 * 10^5) \\ &6,367 * 10^6 * \cos(0.055)} = 550.037 * 10^2, \text{ м} \end{aligned}$$

Втрати енергії радіохвиль для радіолінії “ШСЗ – GES” у вільному просторі визначаються виразом

$$W_0^{\partial \delta} = 20 \lg \left(\frac{4\pi R_{\Pi}}{\lambda} \right) = 20 \lg \left(\frac{4\pi(550.037 * 10^2)}{0.025} \right) = 168.833, \text{ дБ,} \quad (3.7)$$

Коефіцієнт підсилення апертурної антени визначається за діаметром її дзеркала та довжині робочої хвилі:

$$G^{\partial \delta} = 10 \lg \left[\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right) \gamma_A \right], \text{ дБ,} \quad (3.8)$$

$$G_{нрм}^{\partial \delta} = 10 \lg \left[\left(\frac{\pi * 0.513}{0.025} \right) * 0.7 \right] = 16.544, \text{ дБ}$$

$$G_{нр\partial}^{\partial \delta} = 10 \lg \left[\left(\frac{\pi * 1}{0.025} \right) * 0.7 \right] = 17.982, \text{ дБ}$$

Втрати у антенно-фідерному тракті передавальної системи на ШСЗ та приймальної системи GES

$$\Delta W^{дб} = 10 \lg\left(\frac{1}{\eta}\right), \text{ дБ} \quad (3.9)$$

$$\Delta W_{прд}^{\delta\delta} = 10 \lg\left(\frac{1}{0.9}\right) = 0.458, \text{ дБ}$$

$$\Delta W_{прм}^{\delta\delta} = 10 \lg\left(\frac{1}{0.9}\right) = 0.458, \text{ дБ}$$

Для радіолінії «ШСЗ – GES» рівень потужності сигналу на вході приймача GES $P_{прм}^{дБм}$ може бути визначений з урахуванням (2.1) за формулою (2.2).

$$\begin{aligned} P_{прм}^{\deltaБм} &= P_{прд}^{\deltaБм} - \Delta W_{прд}^{\delta\delta} + G_{прд}^{\delta\delta} - W0^{\delta\delta} - W\delta\delta^{\delta\delta} + G_{прм}^{\delta\delta} - \Delta W_{прм}^{\delta\delta} = \\ &= 41.761 - 0.458 + 17.982 - 168.833 - 4.129 + 16.544 - 0.458 = -97.79, \text{ дБм} \end{aligned} \quad (3.10)$$

де $P_{прд}^{\deltaБм}$ – рівень потужності сигналу на виході передавача ШСЗ, дБм;

$\Delta W_{прд}^{\delta\delta}$ – втрати у антенно-фідерному тракті передавальної системи на ШСЗ, дБ;

значення $\Delta W_{прд}^{\delta\delta}$ залежить від конструкції антенно-фідерного тракту, діапазону робочих частот та може бути розраховано за формулою (2.3);

$\Delta W_{прм}^{\delta\delta}$ – втрати у антенно-фідерному тракті приймальної системи GES, дБ;

значення $\Delta W_{прм}^{\delta\delta}$ аналогічно до $\Delta W_{прд}^{\delta\delta}$ може також бути розраховано за формулою (2.3);

$G_{прд}^{\delta\delta}$ – коефіцієнт підсилення передавальної апертурної антени ШСЗ, дБ, значення якого можна визначити за формулою (2.4);

$G_{прм}^{\delta\delta}$ – коефіцієнт підсилення приймальної апертурної антени GES, дБ, значення якого можна також визначити за формулою (2.4);

$W0^{\delta\delta}$ – втрати сигналу у вільному просторі, дБ, значення яких можна визначити за формулою (2.5);

$W\delta\delta^{\delta\delta}$ – Загасання сигналу в радіолінії, виражене в децибелах (дБ), включає в себе загасання радіосигналу в атмосфері, втрати сигналу через опади та втрати, спричинені неточністю наведення антени. (2.8).

3.2. Розрахунок для меншого кута місця

Розрахунок для супутника що знаходиться майже на лінії горизонту, задля порівняння потужності на вході приймача.

Lon – 54.32, географічна довгота підсупутникової точки, $^{\circ}$ сх. д.;

Lat – 39.74, географічна широта підсупутникової точки, $^{\circ}$ пн.ш.;

D – 30.65, географічна довгота розташування GES, $^{\circ}$ сх.д.;

Sh – 50.41, географічна широта розташування GES, $^{\circ}$ пн.ш.;

Позначення «дБм» означає «дБмВт», тобто рівень сигналу у децибелах відносно опорного значення потужності 1 мВт. Співвідношенням для переводу потужності сигналу (мВт) у рівень потужності сигналу (дБм) є

$$P_{\text{прд}}^{\text{дБм}} = 10 \lg P^{\text{мВт}} = 10 \lg(15 * 1000) = 41.761, \text{ дБм} \quad (3.11)$$

ρ – топоцентричний параметр, з виразу

$$\rho = \cos Lat \cos(D - Lon) \cos Sh + \sin Lat \sin Sh, \quad (3.12)$$

$$\rho = \cos(39.74) \cos(30.65 - 54.32) \cos(50.41) + \sin(39.74) \sin(50.41) = 19.698$$

Кут місця (El – Elevation angle) є кутом між напрямом на спостережуваний об'єкт (ШСЗ) та площиною горизонту.

Кут місця залежить від географічних координат розташування GES, а також від положення ШСЗ на орбіті. В загальному випадку кут місця може бути визначений з виразу

$$El = \arctg \frac{\cos \rho - \alpha}{\sin \rho} = \arctg \frac{\cos(0.055) - 0.92}{\sin(0.055)} = 3.565, \text{ град.}, \quad (3.13)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R3}{R3+H} = \frac{6,367*10^6}{6,367*10^6+5.5*10^5} = 0.92$$

Загасання в атмосфері $W_A^{\partial\delta}$ спричинюється головним чином поглинанням в тропосфері та має яскраво виражений частотно-залежний характер з резонансними піками на частотах 22 та 165 ГГц для водяної пари, а також 60 та 120 ГГц для кисню. Довжина шляху розповсюдження радіосигналу в атмосфері і, як наслідок, загасання залежить від еквівалентної товщини атмосфери та від кута місця Еі налаштування антени земної станції:

$$W_A^{\partial\delta} = \frac{\gamma_0 h_0 + \gamma_B h_B}{\sin E_i} = \frac{0.02 \cdot 6 + 0.004 \cdot 2.2}{\sin(3.565)} = 2.071, \text{ дБ}, \quad (3.14)$$

Додаткове загасання сигналу в радіолінії $W_{\partial\delta}$ складається із загасання радіосигналу в атмосфері $W_A^{\partial\delta}$, його загасання в опадах (гідрометеорах) $W_G^{\partial\delta}$ та втрат через неточність наведення антен $W_H^{\partial\delta}$:

$$W_{\partial\delta} = W_A^{\partial\delta} + W_G^{\partial\delta} + W_H^{\partial\delta} = 2.071 + 3 + 1 = 6.071, \text{ дБ}. \quad (3.15)$$

R_{II} – похила дальність, м; відстань по прямій від GES до ШСЗ, яка може бути визначена за допомогою виразу

$$\begin{aligned} R_{II} &= \sqrt{R^2 + (R + H)^2 - 2(R + H)R \cos \rho} = \\ &= \sqrt{(6,367 \cdot 10^6)^2 + ((6,367 \cdot 10^6) + 5.5 \cdot 10^5)^2 - 2((6,367 \cdot 10^6) + 5.5 \cdot 10^5) \cdot 6,367 \cdot 10^6 \cdot \cos(19.698)} = 2.336 \cdot 10^6, \text{ м} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Втрати енергії радіохвиль для радіолінії “ШСЗ – GES” у вільному просторі визначаються виразом

$$W_0^{\partial\delta} = 20 \lg \left(\frac{4\pi R_{II}}{\lambda} \right) = 20 \lg \left(\frac{4\pi(2.336 \cdot 10^6)}{0.025} \right) = 181.395, \text{ дБ}, \quad (3.17)$$

Коефіцієнт підсилення апертурної антени визначається за діаметром її дзеркала та довжині робочої хвилі:

$$G^{\partial\delta} = 10 \lg \left[\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right) \gamma_A \right] =, \text{ дБ}, \quad (3.18)$$

$$G_{нрм}^{\partial\delta} = 10 \lg \left[\left(\frac{\pi * 0.513}{0.025} \right) * 0.7 \right] = 16.544, \text{ дБ}$$

$$G_{нр\delta}^{\partial\delta} = 10 \lg \left[\left(\frac{\pi * 1}{0.025} \right) * 0.7 \right] = 17.982, \text{ дБ}$$

Втрати у антенно-фідерному тракті передавальної системи на ШСЗ та приймальної системи GES

$$\Delta W^{\text{дБ}} = 10 \lg \left(\frac{1}{\eta} \right), \text{ дБ} \quad (3.19)$$

$$\Delta W_{нр\delta}^{\partial\delta} = 10 \lg \left(\frac{1}{0.9} \right) = 0.458, \text{ дБ}$$

$$\Delta W_{нрм}^{\partial\delta} = 10 \lg \left(\frac{1}{0.9} \right) = 0.458, \text{ дБ}$$

Для радіолінії «ШСЗ – GES» рівень потужності сигналу на вході приймача GES $P_{нрм}^{\text{дБм}}$ може бути визначений з урахуванням (2.1) за формулою (2.2).

$$\begin{aligned} P_{нрм}^{\text{дБм}} &= P_{нр\delta}^{\text{дБм}} - \Delta W_{нр\delta}^{\partial\delta} + G_{нр\delta}^{\partial\delta} - W_0^{\partial\delta} - W_{\delta\delta}^{\partial\delta} + G_{нрм}^{\partial\delta} - \Delta W_{нрм}^{\partial\delta} \\ &= 41.761 - 0.458 + 17.982 - 181.395 - 6.071 + 16.544 - 0.458 = -112.094, \text{ дБм} \end{aligned} \quad (3.20)$$

де $P_{нр\delta}^{\text{дБм}}$ – рівень потужності сигналу на виході передавача ШСЗ, дБм;

$\Delta W_{нр\delta}^{\partial\delta}$ – втрати у антенно-фідерному тракті передавальної системи на ШСЗ, дБ;

значення $\Delta W_{нр\delta}^{\partial\delta}$ залежить від конструкції антенно-фідерного тракту, діапазону робочих частот та може бути розраховано за формулою (2.3);

$\Delta W_{нрм}^{\partial\delta}$ – втрати у антенно-фідерному тракті приймальної системи GES, дБ;

значення $\Delta W_{нрм}^{\partial\delta}$ аналогічно до $\Delta W_{нр\delta}^{\partial\delta}$ може також бути розраховано за формулою (2.3);

$G_{нр\delta}^{\partial\delta}$ – коефіцієнт підсилення передавальної апертурної антени ШСЗ, дБ, значення якого можна визначити за формулою (2.4);

$G_{прм}^{дб}$ – коефіцієнт підсилення приймальної апертурної антени GES, дБ, значення якого можна також визначити за формулою (2.4);

$W0^{дб}$ – втрати сигналу у вільному просторі, дБ, значення яких можна визначити за формулою (2.5);

$W_{доо}^{дб}$ – Загасання сигналу в радіолінії, виражене в децибелах (дБ), включає в себе загасання радіосигналу в атмосфері, втрати сигналу через опади та втрати, спричинені неточністю наведення антени. (2.8).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У цьому розділі були проведені розрахунки енергетики сегменту супутникової радіолінії Starlink при різних кутах місця та їх порівняння.

За результатами розрахунків вхідна потужність наземного терміналу при куті місця 89,3 градуси складає -97,59 дБм, що лежить в межах слабого сигналу мобільного зв'язку (-85 дБм ... -100 дБм) та дуже слабого WiFi (менше -70 дБм). Вхідна потужність наземного терміналу при куті місця 3,5 градуси становить -112,1 дБм.

При цьому розрахунок був проведений з урахуванням простих погодних умов, що ставить під сумнів використання Starlink в будь-якій точці світу, де умови можуть бути складнішими та вказує на потенційні можливості удосконалення системи. Також вхідна потужність знижується при зменшенні кута місця, що вказує на потребу великої кількості супутників для забезпечення постійного безперебійного сигналу, оскільки супутник має знаходитись в певному діапазоні відхилення від значення кута місця 90 градусів, після чого термінал перемикається на наступний. Виходячи з розрахунку можна визначити, що система Starlink потребує удосконалення.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі був проведений аналіз супутникової системи Starlink для визначення доцільності покриття всієї планети на основі дослідження тематики та проведення розрахунків.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі наукові завдання:

1. аналіз структури системи супутникового зв'язку Starlink;
2. визначення викликів при розгортанні системи на повну потужність;
3. проведення розрахунків енергетики сегменту супутникової радіолінії;
4. проведення порівняльного аналізу розрахунків.

Проведений розрахунок вхідної потужності наземного терміналу Starlink, з урахуванням простих погодних умов, для різних кутів місця. За результатами розрахунків вхідна потужність наземного терміналу при куті місця 89,3 градуси складає -97,59 дБм, що лежить в межах слабого сигналу мобільного зв'язку (-85 дБм ... -100 дБм) та дуже слабого WiFi (менше -70 дБм). Вхідна потужність при куті місця 3,5 градуси становить -112,1 дБм, що лежить в межах дуже слабого сигналу мобільного зв'язку (менше -100 дБм) та дуже слабого сигналу Wi-Fi (менше -70 дБм).

При цьому розрахунок був проведений з урахуванням простих погодних умов, що ставить під сумнів використання Starlink в будь-якій точці світу, де умови можуть бути складнішими.

Вхідна потужність знижується при зменшенні кута місця, що вказує на потребу великої кількості супутників для забезпечення постійного безперебійного сигналу, оскільки супутник має знаходитись в певному діапазоні відхилення від значення кута місця 90 градусів, після чого термінал перемикається на наступний.

Велика кількість та щільність супутників приводить до ризику зіткнення у разі несправності та ланцюгової реакції. Космічне сміття, що виникло після зіткнення, буде пошкоджувати все більше супутників та накопичуватися на орбіті. Це може мати серйозні наслідки для систем комунікації, навігації, зондів та

космічних станцій. Виведення нових космічних апаратів стане ризикованим та складнішим, або взагалі неможливим. Процес очищення може зайняти роки або навіть десятиліття, залежно від складності ситуації та швидкості впровадження технологій.

Людство уже стикається з викликами через запуск Starlink у сфері космічних досліджень. Велика кількість супутників зменшує кількість даних, зібраних телескопами. Коли супутники рухаються по нічному небу, вони створюють смуги світла на об'єктивах, які затьмарюють зірки та інші об'єкти. Крім того, супутники через свій розмір можуть спричинити проблеми з інструментами, які покладаються на відстеження об'єктів на нічному небі, наприклад, для астрометрії.

Виходячи з результатів аналізу, система Starlink не доцільно використовувати для покриття всієї планети супутниковим інтернетом адже вона потребує удосконалення для покращення характеристик. Також, доцільніше використовувати систему в окремих важкодоступних регіонах світу, з низькою щільністю покриття або його відсутністю, замість покриття всієї планети, заради зменшення ризиків космічних катастроф.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Супутникові системи авіаційного зв'язку / В.П. Харченко, С.М. Паук, Л.М. Нестерова, Є.А. Знаковська. – К.: НАУ, 2018. – 188 с.
2. Радіолінійні й супутникові системи передачі/ Сайко В.Г – 2015. – 60 с.
3. Мережа авіаційного електрозв'язку / Андрусак А.І., Дем'янчук В.С., Юр'єв Ю.М. – К.: НАУ, 2001. – 448 с.
4. Конспект лекцій з дисципліни «Проектування радіоелектронних пристроїв» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності - 172 «Телекомунікації та радіотехніка». /Укл.: С'янов О.М., Марченко С.В. - Кам'янське; ДДТУ, 2018 р. – 85 с.
5. Геодезичний енциклопедичний словник / За редакцією Володимира Літинського. — Львів: Євросвіт, 2001. — 668с.: іл.
6. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч. посібник /Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. – К.: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. –146 с.
7. Які шкідливі наслідки матиме starlink - ts2.space.uk/
8. Collision frequency of artificial satellites: the creation of a derbis belt/ Donald J. Kessler - <http://webpages.charter.net/dkessler/files/Collision%20Frequency.pdf>.
9. COLLISIONAL CASCADING: THE LIMITS OF POPULATION GROWTH IN LOW EARTH ORBIT / Donald J. Kessler - <http://webpages.charter.net/dkessler/files/Critical%20Density%201991.pdf>
10. VSATs: Very Small Aperture Terminals / John Everett , -458 с
11. Starlink satellites: Everything you need to know about the controversial internet megaconstellation - <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>.
13. 9.0 Communications - <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/communications>
14. Низькоорбітальні системи супутникового зв'язку - <https://studfile.net/preview/5157166/>
15. Satellite Basics - <https://www.intelsat.com/resources/tools/satellite-101/>