ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА МОБІЛЬНИХ ТА ВІДЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА МЕТОДИ ЇХ ПОКРАЩЕННЯ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення та телебачення
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Владислав ШЕНДЕРЧУК
(підпис) *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. АРДМ-61
Владислав ШЕНДЕРЧУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Назарій БЛАЖЕННИЙ
PhD Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент: _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2024

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення та телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МВТ Наталія РУДЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
«____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Шендерчуку Владиславу Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Метод дослідження енергетичних параметрів систем супутникового зв'язку та методи їх покращення

керівник кваліфікаційної роботи Назарій БЛАЖЕННИЙ, PhD,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «15» листопада 2024 р. № 320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Енергетичні системи супутникового зв'язку, науково-технічна література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Супутникові системи зв'язку
2. Пропускна здатність супутникового каналу зв'язку
3. Розрахунки та методи покращення супутникового зв'язку

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «___» _____ 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	11.10.24	виконано
2.	Дослідження видів супутникових систем зв’язку.	15.10.24	виконано
3.	Розбір, дослідження та опис характеристик супутникових систем зв’язку.	05.11.24	виконано
4.	Аналіз та дослідження методів підвищення сигналу на трасі ШС-Земля.	01.12.24	виконано
5.	Висновки, вступ, реферат	02.12.24	виконано
6.	Розробка презентації	05.12.24	виконано

Здобувач вищої освіти _____ Владислав ШЕНДЕРЧУК
(підпис) *(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник
кваліфікаційної роботи _____ Назарій БЛАЖЕННИЙ
(підпис) *(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 86 стор., 25 рис., 37 джерел.

Мета роботи – дослідження та аналіз методик підвищення енергетичних параметрів супутникових систем зв’язку.

Об’єкт дослідження – супутникові системи зв’язку.

Предмет дослідження – енергетичні параметри супутникових систем зв’язку.

Короткий зміст роботи: У роботі розглянуто основні принципи побудови супутникових систем зв’язку, зокрема їхні енергетичні параметри та методи вдосконалення. Досліджено вплив частотних діапазонів, атмосферних і магнітних ефектів на якість сигналу, а також запропоновано рішення для оптимізації енергоспоживання. Окремо висвітлено методи покращення енергетичних характеристик, включаючи використання новітніх технологій модуляції та конструкцій антен.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Супутниковий зв'язок, Енергетичні параметри, Комунікаційні системи, Мультиплексування, Розповсюдження сигналів

ABSTRACT

The text part of the master's qualification work: 86 pages, 25 pictures, 37 sources.

The purpose of the work is research and analysis of methods of increasing the energy parameters of satellite communication systems.

The object of research is satellite communication systems.

The subject of research is energy parameters of satellite communication systems.

Summary of the work: The work considers the main principles of building satellite communication systems, in particular their energy parameters and methods of improvement. The influence of frequency ranges, atmospheric and magnetic effects on signal quality was studied, and solutions for optimizing energy consumption were proposed. Methods of improving energy characteristics, including the use of the latest modulation technologies and antenna designs, are separately highlighted.

KEYWORDS: Satellite communication, Energy parameters, Communication systems, Multiplexing, Signal distribution

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Шендерчука Владислава Віталійовича

на тему «Метод дослідження енергетичних параметрів систем супутникового зв'язку та методи їх покращення»

Актуальність: Робота є актуальною через необхідність покращення енергетичних параметрів супутникових систем, які забезпечують надійний зв'язок в умовах глобальної цифровізації та складних географічних умов.

Позитивні сторони: У роботі досліджено ключові методи вдосконалення енергетичних характеристик супутникових систем, що дозволяє зменшити втрати сигналу і підвищити якість зв'язку. Розрахунки енергетичного балансу супутникових каналів є фундаментом для подальшого впровадження оптимальних рішень у практичних системах. Особливу увагу приділено використанню адаптивних антенних решіток, що забезпечують високий коефіцієнт підсилення сигналу. Використання сучасних технологій модуляції дозволяє значно підвищити пропускну здатність каналів зв'язку. Запропоновані методи оптимізації енергетичних параметрів можуть бути інтегровані в новітні телекомунікаційні системи, включаючи супутники низької орбіти.

Недоліки:

1. Робота обмежується аналізом лише декількох методів модуляції, не враховуючи новітніх тенденцій, таких як використання OFDM у супутникових системах.

2. У дослідженні недостатньо розглянуто вплив глобальних атмосферних явищ на параметри високочастотних супутникових трас.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота заслуговує оцінку "***добре***", а здобувач* Шендерчук Владислав Віталійович *заслуговує присвоєння кваліфікації:* Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Рецензент:

(*науковий ступінь, вчене звання*) (*підпис*) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Шендерчук В.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Апаратура радіозвязку, радіомовлення та телебачення
(назва)
на тему: «Метод дослідження енергетичних параметрів систем супутникового зв'язку та методи їх покращення».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ Катерина НЕСТЕРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Шендерчук Владислав Віталійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Шендерчука Владислава Віталійовича на оцінку «**добре**» та присвоїти йому кваліфікацію Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник роботи Назарій БЛАЖЕННИЙ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 2024 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Шендерчук В.В. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою МВТ Наталія РУДЕНКО
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОСИЛАНЬ 9
ВСТУП 10
1 ЗАГАЛЬНІ АСПЕКТИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 11
1.1 Основи супутникового зв'язку 11
1.2 Характеристики передачі та обробки сигналів у супутникових система 20
1.3 Принципи організації багатостанційного доступу 23
1.4 Формулювання завдання для дослідження енергетичних параметрів супутникових систем зв'язку та методів їх оптимізації 28
2 АНАЛІЗ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ 29
2.1 Розрахунок енергетичних параметрів супутникових трас 29
2.2. Умови поширення радіохвиль у космічному середовищі 36
2.3 Оцінка впливу магнітного поля Землі на енергетичні показники супутникових систем 39
3 РОЗРАХУНОК ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ 52
3.1 Методологія розрахунку параметрів супутникових систем 52
3.2 Розрахунок параметрів спрямованості антен наземних станцій 53
3.3 Аналіз геометричних та електродинамічних характеристик антен 55
3.4 Енергетичні розрахунки супутникового каналу зв'язку 56
3.5 Методи покращення енергетичної ефективності супутникових систем (мультиплексування) 59
3.6 Розрахунки космічного зв'зку 64
ВИСНОВКИ 82
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 83

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОСИЛАНЬ

- ШСЗ – штучний супутник землі
- СОТ – світова організація торгівлі
- ФКЗ – федеральна комісія зв’язку
- ПЧ – проміжна частота
- ВПП – високопотужний підсилювач
- НРШ – Низький рівень шуму
- ССШ – співідношення сишналу/шуму
- АО – астрономічна одиниця
- УФ – ультрафіолет
- РО – рухомий об’єкт

ВСТУП

Сучасні тенденції у сфері ІТ докорінно змінюють підходи до співпраці та управління. Зростаючий попит на телекомунікації вимагає безперервного доступу до даних у будь-який час і в будь-якому місці. Однак наземні лінії зв’язку не завжди можуть забезпечити такий рівень доступності. Для їх функціонування потрібна велика кількість наземних ретрансляторів, а забезпечення зв’язку через моря, океани чи у важкодоступних місцях (наприклад, пустелях, горах або лісах) стає практично неможливим. У таких умовах системи супутникового зв’язку є єдиним ефективним рішенням для забезпечення комунікації між віддаленими людьми, об’єктами чи регіонами. Крім того, вони незамінні там, де необхідна надійна та безперебійна високошвидкісна передача даних.

Система супутникового зв’язку включає два ключові компоненти:

- Наземний сегмент, що складається з фіксованого або мобільного обладнання для передачі, прийому та допоміжних функцій.
- Космічний сегмент, основним елементом якого є сам супутник.

Типовий процес передачі через супутник полягає у надсиланні висхідного сигналу з наземної станції до супутника. Супутник приймає сигнал, посилює його та повторно передає на Землю, де сигнал приймається та підсилюється наземними станціями та терміналами. До наземних приймачів супутникового зв’язку належать обладнання для домашнього прийому, мобільні приймачі для літаків, супутникові телефони та портативні пристрої.

Основними споживачами супутникових послуг є корпорації з розгалуженою мережею філій, державні підприємства у нафтогазовій промисловості, компанії авіаційної та залізничної логістики, збройні сили, поліція, медичні заклади та приватні клієнти.

У цій роботі буде детально розглянуто систему передачі інформації через супутниковий зв'язок, а також методи вдосконалення його енергетичних характеристик.

1 ЗАГАЛЬНІ АСПЕКТИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ

1.1 Основи супутникового зв’язку

1.1.1 Що таке супутник зв'язку?

Супутник зв’язку забезпечує можливість обміну інформацією між двома або більше користувачами, які мають відповідне обладнання. Завдяки йому відпадає необхідність у прокладанні кабелів, оскільки для передачі даних використовуються різні діапазони електромагнітного спектру, зокрема мікрохвилі (з довжиною хвилі від 1 метра до 1 міліметра).

Однією з ключових особливостей супутника зв’язку є здатність передавати кілька сигналів одночасно. Це досягається завдяки використанню одного або кількох транспондерів — спеціальних підсистем супутника, які відповідають за прийом, підсилення та повторну передачу сигналу. При цьому транспондер також виконує функцію фільтрації та забезпечує синхронізацію сигналів.

1.1.2 Як працює супутниковий зв'язок

Різні частини або підсистеми супутника відповідають за різні аспекти, які роблять зв'язок можливим.

Тут ми також вводимо два терміни, які часто використовуються в цій галузі: висхідна і низхідна.

Вихідна лінія зв'язку — це канал передачі сигналу від наземної станції до супутника, а нисхідна лінія зв'язку — від супутника до земної станції. Для передачі сигналів використовуються модульовані несучі хвилі, які представляють собою мікрохвилі певної частоти, здатні долати атмосферу Землі, де хвилі інших частот часто зазнають спотворень або блокування. Мікрохвилі обрані завдяки їх властивості ефективно проходити через атмосферні шари, забезпечуючи стабільну передачу даних на великі відстані. Електромагнітні хвилі, що рухаються зі

швидкістю світла, є основним механізмом зв'язку, адже вони дозволяють швидко передавати інформацію навіть у складних умовах. Для передачі складної інформації, як-от аудіо або відео, використовується процес модуляції, який змінює параметри несучої хвилі, такі як амплітуда, частота або фаза, відповідно до сигналу, що передається. Ця технологія дозволяє "накладати" дані на несучу хвилю, перетворюючи її в інформаційний канал. Крім того, модуляція забезпечує адаптацію хвилі до вимог передачі, що дозволяє зменшити втрати сигналу та підвищити якість зв'язку. У складних системах зв'язку це також дозволяє одночасно передавати кілька типів даних, таких як текст, аудіо і відео, з мінімальними затримками. Більше інформації про процес модуляції можна знайти у профільній книзі , як і детальніший опис принципів роботи супутників.[1]

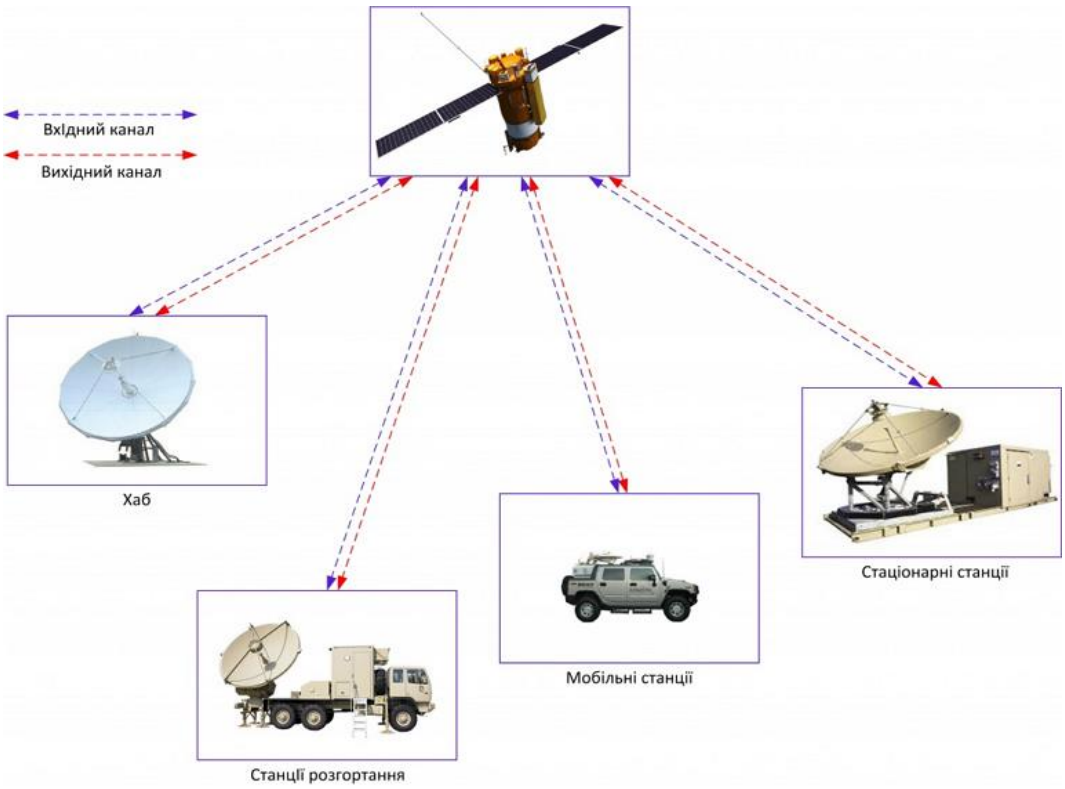


Рис. 1.1 Схема роботи вихідного та вхідного каналів супутникового зв’язку

На рис. 1.2 зображено супутникову систему з пасивним ретранслятором, яка працює за принципом передачі сигналів між наземними станціями через супутник без активної бортової апаратури. Така система має обмежену пропускну здатність і використовує низькоорбітальні супутники для передачі повідомлень із

затримкою.

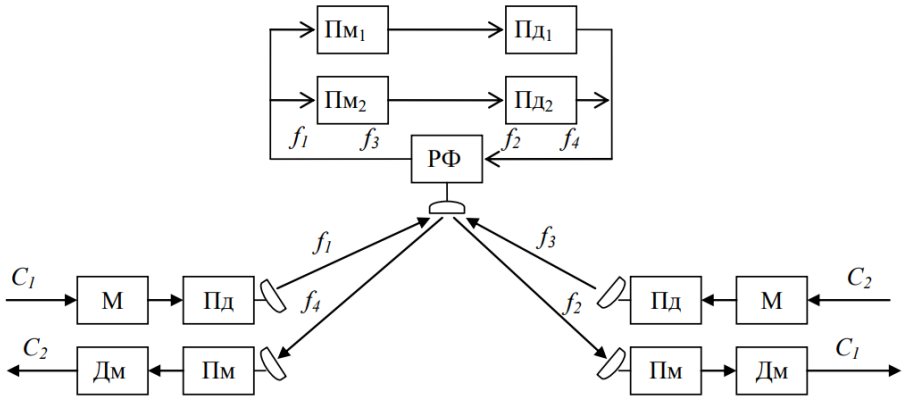


Рис. 1.2 Структурна схема організації каналів зв’язку з використанням активного супутника

Дм — демодулятор; М —модулятор; Пд — передавач; Пм — приймач; РФ— режекторний фільтр

1.1.3 Частоти

Для супутникового зв’язку застосовуються різні частоти, які вибираються залежно від конкретних потреб і умов експлуатації. Вибір частотного діапазону залежить від таких факторів, як погодні умови, тип сигналу, дальність передачі, розмір антен і необхідна якість зв’язку. Найбільш поширеними є наступні діапазони:

L-діапазон (1-2 ГГц) відзначається низькою частотою і великою довжиною хвилі, що дозволяє ефективно передавати сигнал навіть у несприятливих погодних умовах, таких як дощ чи туман. Для його прийому потрібні відносно невеликі антени, що робить цей діапазон зручним для мобільних і портативних пристроїв. Він використовується переважно для навігаційних систем GNSS (глобальні навігаційні супутникові системи) і передач метеорологічних супутників, хоча в деяких регіонах застосовується для супутникового мовлення.

Діапазон C (4-8 ГГц) був першим, виділеним для комерційних телекомунікацій через супутники, і залишається популярним завдяки своїй

надійності. Він забезпечує стабільний сигнал навіть у складних погодних умовах, що робить його незамінним у супутниковому телебаченні. Крім того, він активно використовується в системах FSS (фіксована супутникова служба) і BSS (трансляційна супутникова служба), які забезпечують передачу даних і мовлення.

Ku-діапазон (12-18 ГГц) є одним із найпопулярніших у супутниковому зв’язку завдяки своїй високій частоті, яка забезпечує якісну передачу аудіо- та відеосигналів. Цей діапазон широко застосовується для внутрішніх каналів зв’язку в FSS і BSS системах, а також для інтернет-з’єднання, особливо в районах, де наземна інфраструктура обмежена.

Ka-діапазон (17-31 ГГц) є сучасним і високоефективним рішенням для супутникового зв’язку. Завдяки високій швидкості передачі даних і здатності забезпечувати зв’язок із меншими антенами, він використовується для високоякісного широкосмугового Інтернету, телекомунікацій і дистанційного зв’язку. Подвійна пропускна здатність порівняно з Ku-діапазоном робить його ідеальним для роботи з високими обсягами даних і забезпечення зв’язку у високій роздільній здатності.[2]

Таким чином, частотні діапазони відіграють ключову роль у забезпеченні надійного супутникового зв’язку для різних застосувань, від навігації та телебачення до широкосмугового Інтернету.

1.1.4 Види супутникового зв'язку

Супутниковий зв'язок поділяється на кілька категорій залежно від послуг, які він надає. Серед них основними є фіксована супутникова служба, мобільна супутникова служба та супутникове мовлення.

Фіксована супутникова служба (ФСС) визначається Міжнародним союзом електрозв’язку (ITU) як «служба радіозв’язку між земними станціями в заданих позиціях, що використовує один або кілька супутників». ФСС застосовується для передачі телефонних дзвінків, телевізійного мовлення та інших комунікацій. Характерною особливістю цієї служби є використання малопотужних сигналів, які

потребують порівняно великих прийомних антен для забезпечення стабільного зв’язку.

Мобільна супутникова служба (МСЗ), за визначенням ITU, охоплює «службу радіозв’язку між мобільними наземними станціями, космічними станціями або між мобільними наземними станціями через одну або кілька космічних станцій». Ця категорія включає передачу голосових дзвінків і даних для користувачів, які перебувають у русі, наприклад, на борту автомобілів, суден чи літаків.

Служби супутникового мовлення (ССМ) визначаються ITU як «служба радіозв’язку, сигнали якої передаються або ретранслюються супутниками для прямого прийому широкою аудиторією». Такі служби орієнтовані на надання сигналів безпосередньо для кінцевих споживачів, наприклад, для домашніх телевізійних систем або радіоприймачів.

Кожен із цих видів супутникового зв'язку має своє специфічне застосування, яке залежить від потреб кінцевих користувачів і технічних характеристик системи.

1.1.5 Використання супутникового зв'язку

Супутниковий зв’язок знаходить застосування в багатьох сферах, включаючи телекомунікації, мовлення та військові потреби.

Телекомунікації. Супутники відіграють ключову роль у передачі телефонних дзвінків, текстових повідомлень, даних, відео, зображень та забезпеченні доступу до Інтернету. Вони є основним елементом сучасних телекомунікаційних мереж. Історія масового використання супутникового зв’язку почалася з передачі АМ-радіо у 20-х роках минулого століття. Сьогодні супутники забезпечують передачу даних між континентами та регіонами без необхідності використання наземної інфраструктури.

Військові. У військовій сфері супутники використовуються для розвідки, навігації, шифрованого зв’язку та спостереження. Завдяки високій надійності вони забезпечують критично важливий зв’язок у важкодоступних або стратегічно важливих місцях.[3]

Супутники розміщуються на трьох основних типах орбіт, залежно від їх функцій:

Геостаціонарна орбіта (ГСО). Розташовані на висоті близько 36 000 км супутники залишаються нерухомими відносно певної ділянки земної поверхні. Вони забезпечують стабільне покриття великої території, що робить їх ідеальними для мовлення та тривалого зв’язку. Більшість сучасних супутників зв’язку працюють на цій орбіті.

Низька орбіта Землі (НОЗ). Супутники на висоті 300-2000 км забезпечують мінімальну затримку сигналу завдяки близькості до Землі. Однак вони мають обмежене покриття, тому для безперервного зв’язку потрібна група супутників. Ця орбіта популярна для спостереження Землі та Інтернет-сервісів, таких як Starlink.

Середня орбіта Землі (СОЗ). Висота супутників на цій орбіті складає близько 20 000 км. Вона використовується переважно для навігаційних систем, таких як GPS, Galileo, ГЛОНАСС і BeiDou. Останнім часом супутники на СОЗ також починають використовуватися для зв’язку, що відкриває нові можливості в цій сфері.

Кожен тип орбіти має свої переваги й обмеження, які визначаються специфікою їх використання.

1.1.6 Приклади супутників зв'язку в космосі

Ось кілька важливих супутників зв’язку, які здійснили значні досягнення у сфері супутникових технологій.

Starlink — це амбітне супутникове сузір'я, створене компанією SpaceX, яке має на меті забезпечити високошвидкісний Інтернет у будь-якій точці світу. Мережа супутників Starlink буде складатися з тисяч одиниць, що працюватимуть у Ku- та Ka-діапазонах, забезпечуючи швидкий доступ до Інтернету навіть у найвіддаленіших регіонах планети. Цей проект обіцяє значно покращити якість зв'язку в місцях, де традиційні методи підключення є складними або недоступними.[4]

Міціус — квантовий комунікаційний супутник, який був запущений Китаєм у 2016 році. Він використовує технології квантової заплутаності для забезпечення надзвичайно безпечного обміну даними. За допомогою пари квантових заплутаних фотонів супутник здатний створювати зашифровані повідомлення, де для їх декодування необхідно використовувати другу частину пари. Така технологія робить передачу даних надзвичайно безпечною, оскільки перехоплення сигналу робить його неможливим для дешифрування, що захищає інформацію від крадіжки або шпигунства.[5]

Artemis — супутник, розроблений Європейським космічним агентством (ЄКА), який використовує лазерні канали для високошвидкісного зв’язку між супутниками та з наземними станціями. Це дозволяє досягти швидкості передачі даних до 50 Мбіт/с з низьким рівнем помилок. Artemis використовує інноваційну технологію, яка дозволяє йому отримувати сигнали в Ku-діапазоні та передавати їх у L-діапазоні, що підвищує ефективність і точність супутникових комунікацій. Цей супутник є одним з кроків на шляху до розвитку лазерного супутникового зв’язку.[6]

Iridium-NEXT — це новітнє сузір'я супутників, розташоване на низькій орбіті Землі (LEO), яке забезпечує постійне глобальне покриття для зв'язку 24/7. Це сузір'я супутників не лише дозволяє здійснювати телефонні дзвінки через супутникові телефони, але й оснащене додатковими сенсорами для спостереження за станом атмосфери та іншими критичними параметрами на Землі. Завдяки цьому Iridium-NEXT демонструє багатофункціональність та здатність виконувати кілька ролей одночасно, що робить його важливим інструментом для навігаційних та спостережних місій.[7]

1.1.7 Історія супутників зв'язку

Перші супутники зв’язку значно відрізнялися від тих, що існують сьогодні. «Супутник-1», який був запущений у 1957 році, став першим супутником із

радіопередачею. Це була сфера з чотирма довгими антенами, що прикріплювались до її корпусу. Супутник працював на батареях, без сонячних панелей, і після 22 днів обертання навколо Землі батареї розрядилися, і супутник припинив функціонування.

Першим супутником, що передавав голосові сигнали, був SCORE (Signal Communication by Orbiting Relay Equipment), який транслював записане повідомлення президента Ейзенхауера. У 1950-х і 60-х роках інженери компанії AT&T зробили важливі кроки у розвитку комерційних супутників зв'язку, що проклали шлях до сучасних супутникових систем. Джон Пірс і Гарольд Розен були основними розробниками технологій для визначення необхідної потужності сигналу для стабільного супутникового зв'язку. Потім NASA розробило супутники Echo 1 та Echo 2 — це були алюмінієві кулі, що відображали сигнали без активної передачі.

Першим справжнім функціональним супутником зв'язку став Telstar 1, розроблений командою Пірса. Цей супутник забезпечував двосторонній зв'язок і був першим, що передавав пряме телебачення між Європою та Північною Америкою. Крім того, саме Telstar 1 став першим супутником, через який був здійснений телефонний дзвінок від Фредеріка Каппеля, президента AT&T, до президента США Ліндона Джонсона.

Syncom 1 став першою спробою розмістити супутник на геостаціонарній орбіті (GEO), але він був втрачений незабаром після запуску. Однак Syncom 2 став першим супутником на геосинхронній орбіті, а в 1964 році Syncom 3 досяг геостаціонарної орбіти. Syncom 3 став першим супутником, який транслював Олімпійські ігри 1964 року з Токіо до США, ставши першим випадком, коли супутник використали для прямої трансляції спортивної події.
У тому ж році організація Intelsat запустила Intelsat 1, перший комерційний супутник, що забезпечував регулярні телекомунікаційні послуги та мовлення між Північною Америкою і Європою. Подальші запускі супутників Intelsat у 1969 році дозволили забезпечити глобальне покриття супутниковими мережами. Ця мережа стала основою для трансляції посадки першої людини на Місяць, яку побачили

більше 600 мільйонів людей по всьому світу.[8]

Радянський Союз створив супутникову мережу «Молнія», що забезпечувала зв’язок по всій території країни, і саме через цю мережу вперше в історії в прямому ефірі був транслюваний парад на честь 50-річчя Радянського Союзу.

Канада стала першою країною після двох наддержав, що запустила супутник зв’язку — Anik 1, який був виведений на орбіту 9 листопада 1972 року. Індонезія слідувала її прикладу, запустивши свій супутник Palapa 1 у 1976 році. Згодом багато інших країн почали запускати свої супутники, що призвело до створення глобальної супутникової мережі комерційного зв’язку, яку ми маємо сьогодні.

1.1.8 Регулюючі організації для супутників зв'язку

У такому великому секторі, як телекомунікації, існування регуляторних органів є абсолютно необхідним. Ось деякі з них.

Міжнародний союз електрозв’язку (ITU), який є спеціалізованою агенцією ООН, відповідає за виділення частотних діапазонів та супутникових орбіт, щоб мінімізувати можливі перешкоди. Основною метою цієї організації є стандартизація глобальних телекомунікаційних технологій.

Федеральна комісія зв'язку (FCC) регулює всі аспекти радіо-, телевізійного, дротового, супутникового та кабельного зв’язку в межах США. Як державна установа, що підпорядковується Конгресу, вона забезпечує виконання законів та стандартів у сфері комунікацій у Сполучених Штатах.

Світова організація торгівлі (WTO) також має важливу роль у цьому процесі, особливо в рамках міжнародних переговорів щодо використання телекомунікаційних послуг. Її діяльність сприяє тому, щоб світовий ринок залишався відкритим і конкурентним, без несправедливих переваг для національних компаній.

1.2 Характеристики передачі та обробки сигналів у супутникових системах

Основною особливістю супутникових систем зв'язку (ССЗ) є обов'язкове запізнення сигналів, яке безпосередньо залежить від відстані до супутника. Визначений час затримки можна розрахувати за формулою [9]:

$$t_З = \frac{L}{C} = \frac{2H}{C}, \tag{1.1}$$

де L – протяжність лінії НС—ШСЗ—НС; Н – висота орбіти.

Якщо висота орбіти складає 36 000 км, то tз буде рівне 250 мс, що є відчутним для абонентів. Часто також можна спостерігати інше явище – ехосигнал, коли абонент чує те, що він говорить із відповідною затримкою. Ехосигнали виникають під час переходу з чотирипровідної на двопровідну систему через неідеальні диференціальні системи. Час виникнення ехосигналів пов’язаний із відстанню, яку проходить сигнал:

$$t_{exo} = \frac{2L}{C} \approx \frac{4H}{C}. \tag{1.2}$$

Якщо H=36 000 км t_{exo}≈500 мс. У таких випадках необхідно забезпечити заглушення ехосигналів до 60 дБ за допомогою ехозагороджувачів, що включають підсилювачі, які обмежують сигнал у певних ситуаціях (рис. 1.3). Основний елемент такої схеми — підсилювач, який вимикається при виникненні мовних сигналів. Однак ця схема має недолік: під час пауз, коли тракт передачі відкривається, може відбутися випадкове перебивання розмови. Для вирішення цього використовують розпізнавальний пристрій, що визначає мовний сигнал і коригує коефіцієнт підсилення в передачі (рис. 1.3, б).

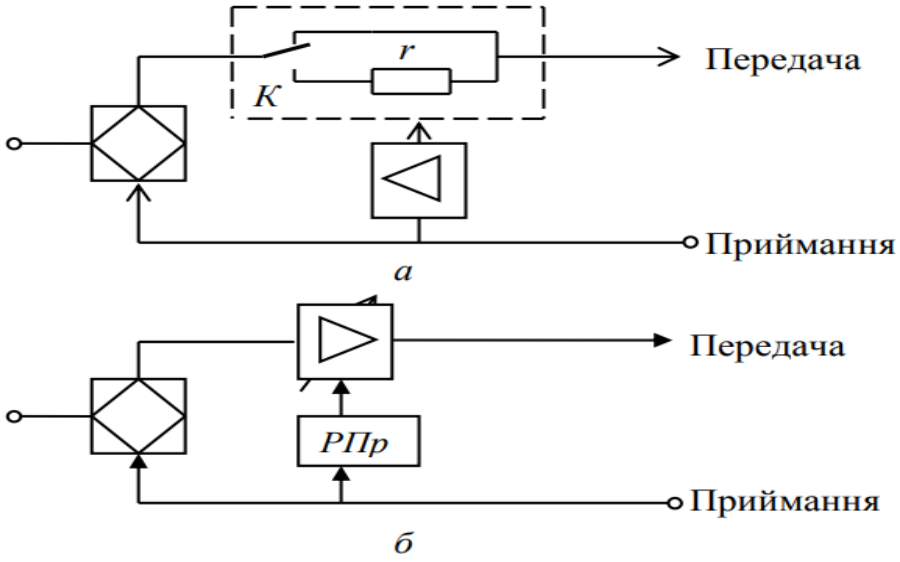


Рис. 1.3 Функціональні схеми ехозагороджувачів:

а — комутаційного типу; *б* — на основі пристрою розпізнавання

У разі використання ретрансляторів супутників, що рухаються за звичайними орбітами (не геостаціонарними), завжди доводиться враховувати ефект Доплера. Відомо, що переміщення джерела сигналу з частотою f відносно приймача системи зі швидкістю $V_r<<C$ викликає доплерівський зсув $\Delta f_{доп}=\pm f\frac{Vr}{C}$(«+» − відповідає зменшенню відстані; «−» − збільшенню відстані). Для супутникових систем ефект Доплера слід враховувати як мінімум для двох значень частот: f_1 – частота ділянки траси «вгору»; f_2 – частота ділянки траси «вниз». Тоді загальний зсув частоти:

$$\Delta f_{доп}=\pm f_1\frac{Vr1}{C}\pm f_2\frac{Vr2}{C}. \quad (1.3)$$

Таким чином, під час передачі модульованого сигналу частота кожної спектральної складової змінюється в$[1+(V_r/C)]$ разів, тобто складові з більш високими частотами будуть зазнавати більшого зсуву, а складові з відносно низькими частотами – меншого. Це обумовлює певну деформацію спектра.

Для контролю проходження сигналів зв’язку через ретранслятор (рис.1.2) на НС достатньо встановити РФ, що розділяє сигнали частот f_4 та f_2, і допоміжний приймач Пр, налагоджений на f_2 (для НС *а*, — рис. 1.1, для НС *б* — частота, яку контролює - f_4). Використання приймачів контролю дозволяє на НС вимірювати

рівні сигналів, які надходять до бортового приймача.

ССЗ не можна уявити без допоміжних комплексів та допоміжного обладнання, до яких належать такі системи:

- запусків ШСЗ;
- прогнозування і корекції руху ШСЗ;
- телеметрії та керування;
- автоматичного пошуку і наведення;
- єдиного часу.

Діапазони робочих частот супутникових систем визначаються міжнародними організаціями, зокрема Міжнародним союзом електрозв’язку (ITU), з урахуванням різних факторів, таких як рівень шуму, що виникає від астрономічних об'єктів (Сонце, Місяць, Галактика та інші), а також необхідність сумісної роботи супутникових систем з іншими радіослужбами, які використовують схожі частоти. Це дозволяє уникнути перешкод і забезпечити ефективну роботу всіх систем у загальному радіочастотному просторі. Одним із важливих кроків у цьому процесі стало затвердження Міжнародним союзом електрозв’язку на Всесвітній адміністративній радіоконференції, що відбулася в 1974 році, розподілу смуг радіочастот, які можуть використовувати супутникові системи для зв'язку.

Зазначені смуги частот, що є критично важливими для супутникових комунікацій, одночасно використовуються іншими радіослужбами, що потребує впровадження специфічних обмежень. До таких обмежень належать максимальна потужність сигналу, максимальне підсилення антен, а також регламентація часу випромінювання сигналу. Всі ці заходи спрямовані на запобігання виникненню перешкод між супутниковими системами та іншими користувачами радіочастотного спектра. Такі правила та обмеження, визначені міжнародними організаціями, забезпечують стабільність і безперебійну роботу супутникових систем зв'язку по всьому світу.[10]

1.3 Принципи організації багатостанційного доступу

Побудова корпоративної супутникової мережі зв’язку умовно поділяється на два основних етапи: створення центральної наземної станції та встановлення малих наземних станцій VSAT. Створення центральної станції включає повний спектр робіт, серед яких передпроектне обстеження, проектування та будівництво всіх необхідних систем. Це включає в себе антенно-радіочастотне та телекомунікаційне обладнання, забезпечення електроживлення, управління кліматом, систему пожежогасіння, охоронну сигналізацію, відеоспостереження та віддалене управління. Мережа може мати різні топології, залежно від вимог замовника: зіркоподібну, повнозв’язкову, з окремими точками зв’язку або комбінацію цих варіантів.

Супутникове з'єднання здійснюється через шлях поширення сигналу в прямій видимості від наземної станції до супутника (висхідна лінія зв'язку) і назад до земної станції (низхідна лінія зв'язку). Супутник зазвичай знаходиться на геостаціонарній орбіті на висоті близько 22 300 миль, що дозволяє йому залишатися на одному місці з точки зору спостереження з Землі. Він працює як ретранслятор, приймаючи та пересилаючи сигнали між різними земними станціями. Наземна станція включає антену, будівлі та електроніку для передачі, прийому, мультиплексування і демультиплексування сигналів. Частотний спектр, який використовується для супутникового зв'язку, подібний до того, що застосовується в мікрохвильових наземних радіосистемах. Антени на земних станціях мають вузький спрямований промінь, а супутникові антени створюють ширший сигнал, що дозволяє покривати велику площу Землі та забезпечувати одночасний зв'язок з кількома віддаленими станціями.[11]

Супутники здатні працювати як ретранслятори для множини земних станцій, що називається множинним доступом (МА). Для цього використовуються три основні методи: FDMA (множинний доступ з частотним поділом каналів), TDMA (множинний доступ з тимчасовим поділом каналів) і CDMA (множинний доступ з кодовим поділом каналів). У методі FDMA кожна станція отримує свою смугу

частот у межах виділеної ширини смуги. У TDMA кожній земній станції надається доступ до всієї смуги передачі на певний короткий проміжок часу, що є варіантом тимчасового поділу каналів. CDMA ж використовує псевдовипадкові коди та працює як у часовій, так і в частотній областях, що забезпечує ефективний захист від перешкод і переважно застосовується в військових супутникових системах зв'язку.[12]

Використання супутників змінило топології зв'язку та вплинуло на ціноутворення. Вони дозволяють передавати відео, голос і дані практично з будь-якої точки Землі, незалежно від того, чи є ця точка віддаленою або мобільною, як у випадку з кораблями. Супутникові системи забезпечують багатоканальність, велику пропускну здатність та високу швидкість передачі даних. Вартість супутникового зв'язку залежить від відстані між відправною точкою і пунктом призначення. Для більшості передач достатньо лише одного супутникового ретранслятора, що робить супутникову передачу переважною порівняно з наземними системами, такими як мікрохвильові або коаксіальні кабелі. Наземні системи вимагають використання кількох повторювачів для покриття великих відстаней, і кожен повторювач може створювати додаткові спотворення та шуми в сигналі.

Проте на великій відстані між Землею та супутником може виникнути проблема згасання і затримки передачі сигналу. Згасання можна зменшити, використовуючи високі посилення, вузькі промені і великі кути для земних антен, що дозволяє зменшити вплив атмосфери. Проблеми з загасанням під час дощу, особливо на високих частотах, можуть бути частково усунені за рахунок просторового рознесення, коли дві віддалені наземні станції не зазнають однакових погодних умов. Затримка сигналу, що проходить через супутник, складає близько 0,5 секунди, що значно більше, ніж у наземних системах, і пов’язана з великою відстанню між Землею та супутником (мінімум 44 600 миль). Це може негативно впливати на якість голосового зв'язку, але набагато сильніше відчувається при передачі даних, якщо протоколи не враховують особливості супутникового середовища. Для зменшення цієї затримки вже розгортаються супутникові системи

на низьких орбітах (від 250 до 1000 миль), які мають меншу затримку, хоча й вимагають більшої кількості супутників для забезпечення покриття, а також мають коротший термін служби порівняно з геостаціонарними супутниками.[13]

1.3.1 Види каналів зв’язку

Система супутникового зв’язку з багатостанційним доступом (БСД) складається з кількох наземних станцій (НС), які знаходяться в зоні взаємодії між собою. Канали зв’язку між різними НС забезпечуються через спільний супутниковий ретранслятор. Для забезпечення комутації зв’язку на борту супутникової станції повинна бути встановлена відповідна апаратура, зокрема антена, спрямована на певну точку на Землі. Канали зв’язку, що створюються через супутник для НС в системах з БСД, можна поділити на два типи:

- постійні (закріплені), які призначені для зв’язку між визначеними НС;
- непостійні (незакріплені), які створюються тимчасово в залежності від потреб користувачів.

Постійні канали дозволяють підтримувати зв’язок у будь-який час. Щоб використовувати непостійні канали, потрібно:

- перевірити наявність вільного каналу (наприклад, почути відповідь АТС при піднятті трубки);
- набрати номер абонента;
- переконатися в наявності вільного каналу для з’єднання з абонентом.

Система з постійними каналами зазвичай потребує більшої кількості таких каналів, ніж система з непостійними. Однак система з непостійними каналами може бути більш ефективною, хоча вона має такі недоліки:

- додатковий час на встановлення з’єднання;
- можлива відмова в з’єднання.

Функціонування системи з БСД можна організувати за певним алгоритмом. Кожна НС може передавати групове повідомлення через супутник, яке буде доступне для інших НС. Після проходження через бортовий ретранслятор (БР), всі

НС отримують сигнал. Після демодуляції кожна НС виділяє частину повідомлення, що призначена саме для неї. Це може здійснюватися за адресою, вказаною на початку повідомлення, або за домовленістю (визначене місце для передачі конкретних каналів). Відповідно, передавальна апаратура в таких системах є більш складною, ніж приймальна.

Існує три основні способи організації БСД:

- БСД з частотним поділом (БСДЧР);
- БСД з часовим поділом (БСДчР);
- БСД з кодовим поділом (БСДКР).

При заданому рівні перехідних шумів у ТФК збільшення кількості каналів (несучих), які одночасно підсилюються у супутниковій системі з БСД, вимагає зменшення кількості переданих повідомлень на кожній несучій частоті.[14]

1.3.2 Організація режимів багатостанційного доступу

У випадку БСДЧР для кожного ствола, тобто НС, виділено визначену несучу частоту (f_1, f_2 ... f_n). Захисний частотний інтервал між парою несучих частот вибирають таким чином, щоб усунути можливість взаємного перекриття спектрів у разі модуляції. Вважають, що найбільш просто БСДЧР реалізувати в тому випадку, коли на НС має місце частотна модуляція (ЧМ) коливань багатоканальним повідомленням із частотним розділенням ТФК (скорочено ЧМ БСДЧР). У такій системі на вхід БР надходить складний сигнал, який являє собою n модульованих за частотою гармонічних сигналів. БР – нелінійний пристрій, тому:

1) виникають перешкоди;

2) заглушаються сигнали НС із низьким рівнем;

3) наявні перехідні перешкоди між стволами і зниження вихідної потужності БР, оскільки амплітудні характеристики (АХ) каскадів, спільних для всіх стволів, — нелінійні.

Названі явища обумовлюють такі параметри системи: ефективну девіацію частоти — 125 кГц; пропускну здатність — 24·12=288 ТФК.

У режимі БСДчР робота НС відбувається по черзі, всі НС можуть працювати на одній несучій частоті, але зі спільною системою синхронізації. Протягом інтервалів τ, які називають кадрами станцій (рис. 1.4), кожна НС випромінює, при цьому захисний інтервал між кадрами дорівнює $\tau_з$. Система синхронізації реалізується за пілот-сигналом і повинна враховувати різні відстані між ШСЗ і НС. Інформаційна частина кадру становить 85—90 % від повної довжини.[15]

1.3.3 Системи з обробкою сигналів у бортовому ретрансляторі

Обробка сигналів на борту дозволяє здійснювати такі операції:

1) перегрупування каналів (об'єднання каналів, що призначені для конкретної НС). Це може бути реалізовано:

- одночасною передачею сигналів усім НС на різних частотах через одну антену;
- одночасною передачею сигналів усім НС на різних частотах через кілька антен або одну багатопроменеву антену;
- через одну антену, що змінює орієнтацію в просторі, із використанням запам'ятовуючих пристроїв;

2) встановлення регенераторів у бортовому ретрансляторі (БР), які дозволяють усувати накопичення шумів та спотворень у лінійному тракті сигналу;

3) адаптація виду модуляції відповідно до енергетичних можливостей ланки;

4) коригування методів розділення каналів для БСДЧР та БСДчР.

Розглянемо апаратуру приймання і передачі на 12 стволів системи «Intelsat IV» (рис. 1.4). Сигнал надходить від приймальних антен А1, А2 через комутатори до приймачів Пм1—Пм4, з яких два є робочими, а два — резервними. Сигнали, прийняті в смузі 500 мГц, транспонуються з діапазону 6 ГГц на 4 ГГц. РНС та РПС складаються з шести смугових фільтрів із шириною пропускання 36 МГц, де центральні частоти фільтрів рознесені на 40 МГц. Таким чином, між сусідніми стволами утворюється захисний інтервал в 4 МГц. Після цього використовуються

основні та резервні підсилювачі на електронних лампах з біжучою хвилею (ЛБХ). Далі встановлюються локальні й глобальні антени для кожного ствола. Головна вимога до бортової апаратури — висока надійність і мінімальні розміри, маса та споживана енергія. [16]

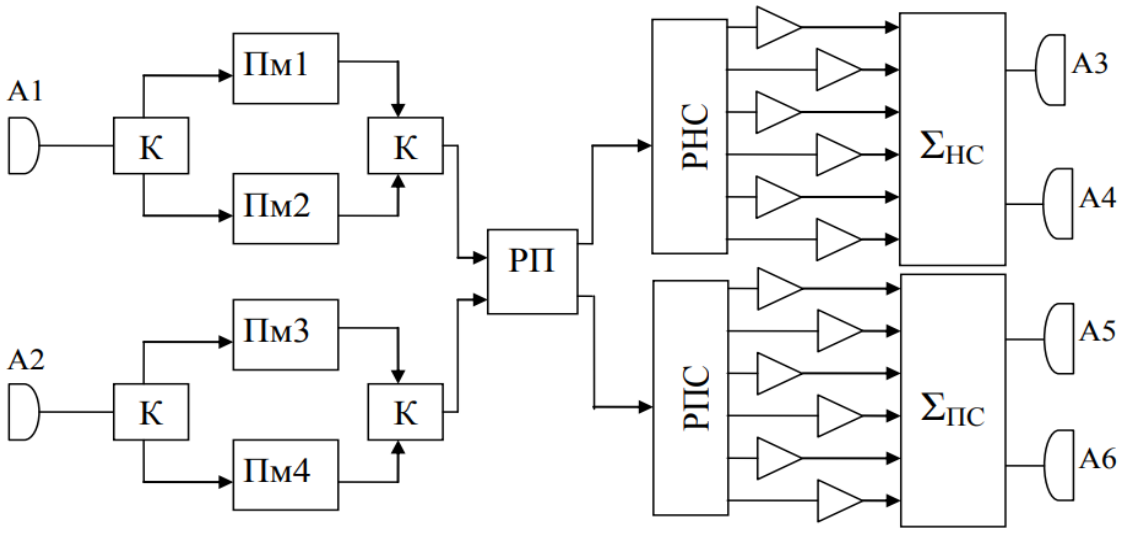


Рис. 1.4 Структурна схема бортової приймально-передавальної апаратури супутника системи «Intelsat IV»: РП – розв’язувальний пристрій; РПС – роздільник парних стволів; РНС – роздільник непарних стволів; К – комутатор.

1.4 Формулювання завдання для дослідження енергетичних параметрів супутникових систем зв’язку та методів їх оптимізації

Покращення супутникової системи цифрового телебачення можна досягти шляхом вирішення таких завдань:

- визначити особливості розповсюдження радіохвиль у космічному просторі;
- провести енергетичний розрахунок каналу зв’язку для забезпечення ефективного супутникового зв’язку;
- виявити завади в супутниковому каналі та розробити методи їх зменшення;
- проаналізувати енергетичні характеристики параметрів системи супутникового телебачення і обґрунтувати способи їх покращення.

2 АНАЛІЗ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Розрахунок енергетичних параметрів супутникових трас

Земні станції, які складають наземний сегмент систем космічного та супутникового зв'язку, потребують різного обладнання залежно від таких факторів: (A) функції станції, (B) типу обслуговування, (C) використовуваних частотних діапазонів, (D) характеристик передавача, (E) приймача та (F) антени.

Можна виділити три основні категорії: (1) станції, що передають і приймають сигнали, (2) станції, що лише приймають, і (3) станції, що тільки передають. Перші зазвичай використовуються в системах двостороннього зв'язку. Станції тільки для прийому застосовуються в системах CATV у США та в системах DBS по всьому світу. Станції, що лише передають сигнали, можуть бути частиною систем збору даних і фідерних каналів DBS. Послуги включають фіксований зв'язок, мобільний зв'язок, телемовлення та інші. Використання частотного спектра регулюється міжнародними угодами, що визначають фактичне використання смуги пропускання відповідно до потреб для різних типів послуг, трафіку та модуляції.[17]

У системах супутникового зв'язку потужність передавача земної станції може варіюватися від кількох ват (генерованих SSPA) до десятків кіловат (генерованих клістронами або ЛБВ). У мережі глибокого космосу використовуються передавачі потужністю до 400 кВт. Приймачі мають широкий діапазон чутливості та пропускної здатності, з шумовою температурою від кількох десятків кельвінів (для підсилювачів із кріогенним охолодженням) до сотень кельвінів для неохолоджуваних підсилювачів. Спрощена блок-схема типового розташування земної станції для передачі та прийому сигналів наведена на рис. 2.1.

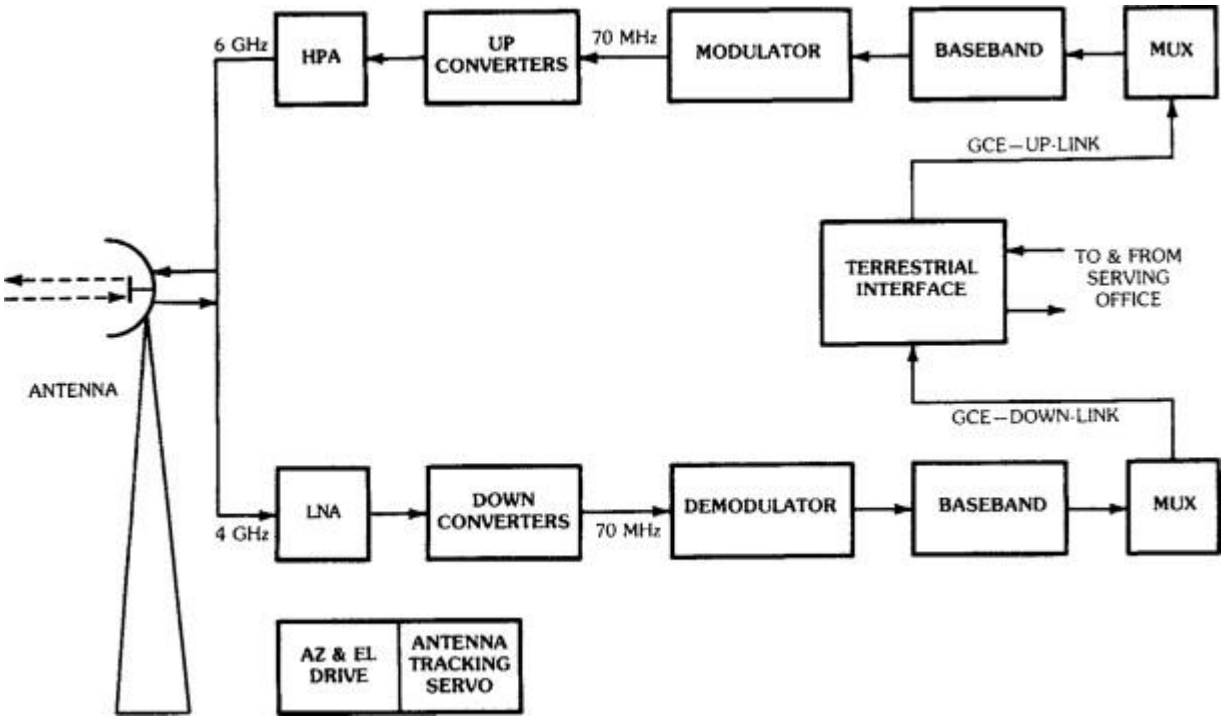


Рис. 2.1 Блок-схема земної станції

Станція складається з шести основних підсистем[18]:

А. Підсистема живлення

Б. Наземний інтерфейс

В. Ланцюг передачі

Г. Приймальний ланцюг

Д. Антенна підсистема

Е. Підсистема управління

Шляхи та функції сигналів визначаються згідно з вимогами системи. Зазвичай значення проміжної частоти (ПЧ) в ланцюгах прийому та передачі є однаковим і складає 70 МГц. Сигнали, що передаються по висхідній лінії зв’язку, можуть подаватися через хвилеводи до потужних підсилювачів, що розташовані безпосередньо після живлення, або у вигляді ПЧ через коаксіальні кабелі до перетворювачів з підвищенням і високопотужних підсилювачів, які встановлюються на цьому етапі. Також можливе розташування всього обладнання на основі антени, з розширенням вхідних та вихідних каналів через хвилеводи променів. Виходи високопотужного підсилювача (ВПП) комбінуються за

допомогою смугових фільтрів, циркулярів або гібридних пристроїв. У ланцюзі прийому слабкі сигнали від супутника приймаються через той самий канал, що і вихід передавача. Оскільки ці сигнали відрізняються за потужністю на кілька порядків, їх розділяють за допомогою ортогональних поляризацій та диплексорів, що забезпечує ефективний поділ в частотній області. Для з'єднання ортогонально поляризованих сигналів використовуються ортомодні перетворювачі, а для перетворення лінійної поляризації в кругову і навпаки – поляризатори. Після початкового підсилення в підсилювачі з низьким рівнем шуму (НРШ), прийняті сигнали перетворюються в ПЧ та демодулюються до основної смуги.

Антена є однією з найважливіших частин земної станції, оскільки її характеристики впливають на eirp, якість прийому (G/T) та рівень перешкод. Розмір антени може варіюватися: від діаметра 0,5 метра або менше, що використовуються для прийому DBS-TV в приватних домогосподарствах, до значно більших антен, таких як параболи діаметром до 32 метрів, які застосовуються в системах високої потужності, і ще більших антен (до 64 метрів), що використовуються в мережах глибокого космосу. Окрім параболічних відбивачів, широко використовуються й інші типи антен, такі як рупори, тороподібні відбивачі, ягі, спіралі та фазовані решітки.[19]

З точки зору загальних відносин,

$$G=(4\pi/\lambda^2 A_{eff}=(4\pi/\lambda^2)\cdot\eta\cdot Ageom \quad (2.1)$$

де

$$\eta=A_{eff}/A_{geom} \quad (2.2)$$

це ефективність антени. У випадку параболічних відбивачів,

$$G=\pi^2(D/\lambda)^2\cdot\eta \quad (2.3)$$

На практиці значення D/λ в діапазоні приблизно від 20 до 700 є звичайними для супутникових систем зв'язку, а значення до 2000 зустрічаються в системах глибокого космосу. При ефективності в діапазоні від 0,5 до 0,8 було досягнуто посилення від 30 до 75 дБі (дБ вище ізотропного) з відповідними ширинами променя половини потужності від кількох градусів до кількох сотих градуса. Дуже високі значення коефіцієнта підсилення мають на увазі електрично та механічно

великі антени і, відповідно, великі й дорогі конструкції, оскільки вартість приблизно пропорційна площі апертури .

Використовувалися різні форми кріплення з обмеженою або повною керованістю, як того вимагають специфічні характеристики системи. Типи кріплення антени можуть бути 2-осевими (*x, y* або азимут, висота), 3-осевими (*x, y, y ′* або азимут, висота і поперечне піднесення) або 4-осевими для морських застосувань.

Рефлекторні антени можна класифікувати за кількістю відбиваючих поверхонь та/або типом розташування живлення. Загальний коефіцієнт корисної дії антени, η, в екв. 80 можна розділити на чотири частини:

$$\eta=\eta^1\times\eta^2\times\eta^3\times\eta^4 \tag{2.4}$$

де

η_1 = коефіцієнт освітленості

η_2 = коефіцієнт поширення

η_3 = коефіцієнт блокування

η_4 = коефіцієнт допусків поверхні

Зменшення коефіцієнта посилення головного лепестка часто означає збільшення енергії бічних лепестків і, отже, призводить до підвищення температури шуму та зниження здатності погашення перешкод. Термін η_4 обумовлений відходом поверхні відбивача від ідеальної. Припускаючи випадково розподілені похибки профілю по поверхні, ефективність зменшується в η' раз

$$\eta'=e^{-(4\pi\in/\lambda)2} \tag{2.5}$$

де $\in$ – середньоквадратичний допуск поверхні. Оскільки втрати посилення в децибелах є

$$\eta'|_{dB}=685.8(\in/\lambda)^2 \tag{2.6}$$

якщо максимальна допустима втрата посилення встановлена на рівні 1 dB, середньоквадратичне допуск поверхні, $\in$, має підтримуватися на рівні λ/25 або менше. Відношення $D/\in$ являє собою міру якості параболічної антени . Для вищезгаданих значень відношення $D/\in$ відповідний діапазон відношення $D/\in$

становить від 500 до 25 000. У електрично більших антенах, призначених для радіоастрономії , вищі значення $D/\in$ були досягнуті за допомогою захисних засобів. проти навколишнього середовища. У системах супутникового зв'язку, крім ранніх конструкцій великих рупорних антен із захистом обтікача від негоди, зазвичай використовуються відкриті антени. Єдиним пристроєм захисту від негоди є електронагрівачі для танення снігу та льоду.[20]

Інші три типи втрат — блокування, перелив та освітленість — є найбільш важливими для складених оптичних систем, таких як популярна конфігурація Кассегрена, що включає гіперболічний субрефлектор та параболічний основний відбивач. Оскільки освітленість діафрагми та випромінювання далекого поля взаємопов’язані через перетворення Фур’є, рівномірне освітлення призводить до характерної діаграми випромінювання типу sin x / x, з коефіцієнтом освітленості, рівним одиниці, але при цьому виникає високий рівень бічних пелюсток. Якщо освітленість зменшити, коефіцієнт освітленості знижується нижче одиниці, проте можна досягти кращого контролю за бічними пелюстками. Хоча складені оптичні системи, як конфігурації Кассегрена та Грегоріана, забезпечують точне фокусування, вони не дають оптимальної ефективності освітлення діафрагми. Покращити ефективність діафрагми можна за допомогою правильної форми субрефлектора та відбивача, що дозволяє видалити енергію з центральної частини, яка блокувалася субрефлектором, і перенаправити її для досягнення більш рівномірного освітлення на решті діафрагми. Така корекція може підвищити посилення рефлекторної антени більш ніж на 1 дБ. Це є найбільш ефективним для антен з розмірами $D/\lambda > 100$.[21]

Зростання кількості супутникових систем на геостаціонарній орбіті вимагає ретельного контролю за бічними пелюстками антени для забезпечення мінімальних взаємних перешкод і зменшення орбітальних відстаней (з 5° до 4°, 3° і навіть до 2°).

Огинаючу бічних пелюсток більшості електрично великих антен Кассегрена можна апроксимувати виразом виду:

$$G_{dBi}=A-B\log\theta \qquad (2.7)$$

де *A* і *B* – константи, а θ – кут за межами оглядової зони. У 1965 році CCIR (нині ITU-R) прийняв це правило:

$$G_{dBi}=\{32-25журналθ101\circ\leq\theta\leq48\circ\theta>48\circ \quad (2.8)$$

Антени системи INTELSAT були стандартизовані відповідно до вимог CCIR. До 1977 року бічні пелюстки в межах 1° від прямого огляду не повинні були перевищувати рівень -29 дБ, але після 1977 року вступило в дію нове правило, яке обмежує перевищення піків бічних пелюсток огинаючою лінії, яка не повинна бути більше ніж на 10 відсотків. Це нововведення змінило значення константи A з 32 на 29 у відповідному виразі.

Для задоволення більш строгих вимог до бічних пелюсток все частіше антени земних станцій будуються в зміщеній конфігурації. Якщо структуру живлення розмістити нижче оптичної лінії видимості відбивача, апертура рефлектора не буде заблокована, що дозволяє досягти набагато нижчих бічних пелюсток.

Основним параметром, що характеризує ефективність системи, є співвідношення G / T, яке зазвичай виражається в дБ/К. Після вибору порту вимірювання важливо враховувати всі внески в шумову температуру системи. Конструкція живлення антени є важливою з точки зору як підсилення, так і контролю бічних пелюсток, а також поляризації.

Розмір переливу та освітлення для субрефлектора і головного відбивача залежить від конструкції системи живлення. Значний прогрес досягнуто у переході від пірамідальних до конічних ріжків різних типів, таких як одномодовий (TE 11), багатомодовий (TE 11 + TM 11) та гібридний режим (EH 11). В останньому випадку використання гофрованих ріжків з канавками λ/4 дозволило збільшити пропускну здатність, покращити симетрію діаграми випромінювання, зменшити бічні пелюстки та досягти кращих характеристик позаосьової поляризації, що є важливим у системах з подвійною поляризацією. В таких системах ізоляція між двома ортогональними поляризованими співчастотними каналами повинна бути якомога вищою. Практика в системах, що використовують лінійну або кругову ортогональну поляризацію, показала, що ізоляція на рівні 30 дБ є стандартною

метою проектування. Для досягнення цих вимог необхідні складні ортомодні переходи та каскадні поляризатори.

Ізоляція сигналу безпосередньо залежить від точності поляризації джерела сигналу та антенної системи. Оскільки дощ може деполяризувати сигнал на шляху його проходження, для корекції деполяризації успішно впроваджено автоматичні засоби на частоті 6/4 ГГц. [22]

При необхідності для постійного коригування напрямку антени в бік супутника використовуються моноімпульсні системи відстеження. Для забезпечення стабільної роботи передбачено додаткове джерело живлення та резервне обладнання для зв'язку.

Більшість описаних вище земних станцій використовуються як шлюзи для систем супутникового зв'язку ТфОП. У 1980-х роках відбулися значні зміни у сфері супутникового зв'язку, зокрема збільшення кількості безпілотних станцій, що розташовуються на території користувачів. Ці станції мають низькі значення G / T, використовуються тільки для прийому сигналів і мають малу електричну потужність, або є комбінацією цих характеристик. Як вже згадувалося, VSAT звичайно встановлюються в приміщеннях користувачів, безпілотні й мають компактні розміри. Аналогічно поширюються і USAT. Кількість таких земних станцій на території користувачів швидко зростає, разом з обсягом трафіку, що ними передається. Домашні станції DBS-TV, які також розташовані на території користувача і використовуються лише для прийому, мають малу електричну потужність. Мобільні термінали, що використовуються на літаках, наземних транспортних засобах і невеликих кораблях, є мобільними, мають низький G / T (< −10 дБ/К), і часто страждають від багатопроменевості, при цьому їх електрична потужність також досить мала. З'являються й телефонні термінали, які є ще меншими за розміром і електричною потужністю.

Багато що зробило це можливим, так це наявність високонадійних недорогих LSIC, VLSIC і DSP, а також досягнення в області модуляції, кодування та протоколів для модулів основної смуги частот, а також твердотільних мікрофонів, а також нещодавно MMIC помірної вартості та висока надійність

на мікрохвильових частотах . У поєднанні з вищими eirps, доступними для супутників, які використовувалися в 1980-х і 1990-х роках, послуги з використанням заземляючих терміналів, подібних до описаних вище, значно розширилися, і розширення зростатиме принаймні такою ж швидкістю в першому десятилітті 21-го століття.

2.2. Умови поширення радіохвиль у космічному середовищі

Розповсюдження радіохвиль у просторі — це процес перенесення енергії електромагнітних хвиль в радіочастотному діапазоні. Відстань, на якій можливий радіозв'язок, визначається рядом факторів: обраною частотою, потужністю передавача, чутливістю приймача, характеристиками антен та умовами поширення радіохвиль. Радіохвилі займають частину спектру електромагнітних хвиль з довжинами від 100 км до 1 мм, що відповідає частотам від 3 кГц до 300 ГГц. Як і світлові хвилі, на радіохвилі впливають явища відбиття, заломлення, дифракції, поглинання, поляризації та розсіювання.[23]

Поширення радіохвиль також залежить від щоденних змін вмісту водяної пари в тропосфері та іонізації в верхніх шарах атмосфери, що змінюється залежно від положення Сонця. Знання впливу різних чинників на поширення радіохвиль має багато практичних застосувань, від вибору частот для міжнародного короткохвильового телерадіомовлення до проектування надійних мобільних телефонних систем, радіонавігації та роботи радіолокаційних систем.

Радіохвилі на різних частотах поширюються з різними характеристиками. Довжина хвилі дуже низьких частот значно перевищує відстань між поверхнею Землі та D-шаром іоносфери (60—90 км), що дозволяє електромагнітним хвилям поширюватися в цьому регіоні, як у хвилеводі. Взаємодія радіохвиль з іонізованими шарами атмосфери ускладнює прогнозування і аналіз їх поширення. Іоносферне поширення радіохвиль значною мірою залежить від космічної погоди. У вільному просторі (вакуумі) всі електромагнітні хвилі — радіо, світлові, рентгенівські та інші — підкоряються закону обернених квадратів, згідно з яким

щільність потоку енергії хвилі обернено пропорційна квадрату відстані від джерела:

$$\rho_0 \sim \frac{1}{r^2} \tag{2.9}$$

В однорідному середовищі радіохвилі поширюються прямолінійно зі сталою для даного середовища швидкістю — так зване вільне поширення. Близьким до вільного є поширення радіохвиль в космічному просторі. Швидкість розповсюдження радіохвиль у вакуумі приблизно дорівнює швидкості світла і становить 299 792 458 м/с.[24]

Лазерний зв’язок між супутниками, а також між супутником передачі та наземною станцією в діапазоні кількох сотень Гбіт/с є необхідним для забезпечення глобального доступу до Інтернету. Для досягнення високих швидкостей передачі даних лазерний канал вимагатиме точних систем наведення і широкосмугових оптичних приймачів на землі, а також лазерного маяка та двостороннього каналу передачі даних. Мікросупутникові платформи можуть бути використані для організації лазерного зв’язку між низькоорбітальними супутниками і Землею. Така система забезпечить передачу даних на високій швидкості з точним наведенням. Проте атмосферна турбулентність та обмеження наведення зменшують можливість доступу кожного супутника до наземної станції, що потребує великої кількості супутників на низьких орбітах. Для забезпечення безперервного зв’язку можна застосувати сузір’я Уокера у вигляді «перлин», де кожен супутник зможе мати доступ до двох найближчих супутників (попереду та позаду). Це дозволяє зменшити кількість супутників і необхідні орбітальні площини.

Атмосферні явища, зокрема турбулентність, впливають на якість з’єднання та ймовірність втрати сигналу до рівня, достатнього для надійного зв’язку. Одним з ключових параметрів є максимальний кут, під яким трансивер може націлюватися на приймач для передачі даних. Якість зв'язку зберігається, поки не досягається максимальний кут. Кут дорівнює нулю, коли супутник проходить безпосередньо над наземною станцією. Зі збільшенням кута зростає

довжина шляху і вплив турбулентності, що погіршує ефективність зв’язку. Якщо зенітний кут не перевищує 30°, то це забезпечує стабільну якість зв'язку, необхідну для високоякісного з’єднання. У випадку, коли зона зв'язку заблокована хмарами або сильно постраждала від туману чи дощу, необхідно забезпечити додаткову передачу для кількох терміналів в різних точках. За результатами аналізу, для забезпечення безперервного зв’язку пропонується сузір’я з 27 супутників на низьких орбітах. Використання мобільних наземних станцій дозволяє зменшити кількість супутників і знизити витрати, при цьому покращуючи якість і кількість нових застосувань. Таким чином, очевидно, що ринок супутників зміщується в бік менших (мікро- та наносупутників), меншої маси та високопродуктивних платформ, застосовних до FSO зв’язку, можливих у всьому світі. Вплив ринку телекомунікацій полягав у забезпеченні безпрецедентного всесвітнього покриття за допомогою сузір'їв з менш ніж 1000 супутниками.

Нещодавно було повідомлено про концепцію лазерної системи зв’язку для малих супутників, яка представляє систему C3PO з передовою концепцією лазерного зв’язку висхідного/нисхідного зв’язку з космічними об’єктами, що описує деякі ключові технології. Повідомляється, що проект проектує систему зв'язку, яка використовує наземний лазер для освітлення супутника та модульований ретрорефлектор, щоб повернути промінь світла, модульований даними, на землю. Таким чином, система не вимагає використання лазера на супутнику і добре підходить для малих супутників, щоб забезпечити високу швидкість передачі даних у діапазоні Гбіт/с для дуже малої бортової маси. Для системи C3PO кожна наземна станція оснащена компонентами, що використовуються як для висхідних, так і для низхідних каналів, системою стеження для виявлення та наведення супутника, а також наземним лазером для низхідного зв’язку з модульованим форматом для висхідного зв’язку. Модульований ретрорефлектор інтегрований у космічний термінал, а зв’язок висхідної лінії зв’язку буде використовувати вбудований оптичний приймач на супутнику, який отримує модульований сигнал із землі. Ця технологія дозволяє значно зменшити потребу в енергії на супутнику, оскільки вся оптика і лазерна

передача здійснюються на земній станції, що робить систему економічною та ефективною для використання в малих супутникових платформах. Крім того, це забезпечує більшу стабільність і точність зв’язку в умовах різних атмосферних впливів, таких як турбулентність або погані погодні умови. [25]

2.3 Оцінка впливу магнітного поля Землі на енергетичні показники супутникових систем

Супутниковий зв'язок традиційно вважається надійним і стійким до впливу навколишнього середовища. Однак це сприйняття не зовсім точне, оскільки на супутниковий зв’язок можуть впливати різні фактори навколишнього середовища, у якому він функціонує. Вплив космічного середовища на супутниковий зв'язок можна поділити на три основні категорії:

1. вплив на космічний елемент (супутник);
2. вплив на наземний елемент (земну станцію);
3. вплив на сигнали, що поширюються через нижню та верхню атмосферу Землі.

Вплив на супутник значною мірою залежить від його орбіти. Геосинхронні супутники, що знаходяться на найвищих орбітах, більш чутливі до спалахів високоякісних частинок, які рідко випромінюються Сонцем. Ці частинки можуть викликати кілька проблем, таких як:

1. порушення пам’яті супутникових комп’ютерів;
2. діелектричний заряд на компонентах;
3. радіаційне пошкодження елементів супутника.

Це може призвести до серйозних збоїв в роботі супутника, зниження якості послуг або, в найгіршому випадку, до втрати супутника. Супутники, що знаходяться на низьких орбітах (НЗО), менш схильні до пошкоджень від космічних часток, за винятком полярних регіонів. Однак вони можуть зазнавати більш швидкого орбітального розпаду, що може призвести до скорочення тривалості їхнього функціонування під час підвищеної сонячної активності.

На чутливість наземної станції впливають джерела шуму, які знаходяться в промені приймальної антени. Це може бути шум від неба, а також сонячний шум, причому ефект залежить від частоти роботи системи. Сигнал, що проходить через атмосферу Землі, також зазнає впливу від її різних шарів. Зокрема, сигнал може змінюватися внаслідок проходження через іоносферу (верхню атмосферу) або тропосферу (нижню атмосферу), що включає такі явища, як поглинання сигналу, сцинтиляція, обертання Фарадея та декогеренція смуги пропускання. Ступінь цих ефектів також значною мірою залежить від частоти сигналу, а географічне розташування та шлях поширення сигналу можуть визначати, як сильно вони впливатимуть на якість зв’язку. У наступних розділах буде більш детально розглянуто кожен із цих ефектів.[26]

2.3.1 Ефекти супутника

Космос — це не таке безпечне середовище, яким його колись уявляли. Його простір перетинають дрібні частинки (метеороїди), а також потужний і змінний потік радіації. Радіаційне поле на орбіті Землі утворюється трьома основними джерелами: галактичною космічною радіацією, радіаційними поясами (поясами Ван Аллена), а також сонячним випромінюванням. Перші два джерела є випромінюванням частинок, в основному протонів та електронів, тоді як сонячне випромінювання включає як електромагнітне, так і дисперсне (атомне та субатомне) випромінювання.

Галактичне космічне випромінювання складається здебільшого з протонів з дуже високою енергією, що утворюють постійне джерело низькочастотного фону. Ці частинки не мають значного впливу на супутникові системи зв’язку, але вони можуть стати потенційною небезпекою для тривалих космічних місій з людьми, особливо під час польотів до інших планет. Іноді ці частинки можуть бути відповідальними за виникнення збоїв в пам'яті супутників.

Радіаційні пояси — це випромінювання частинок з низькою енергією, яке необхідно враховувати для супутників, що проводять багато часу на орбітах

середньої висоти. Пояси Ван Аллена фактично обумовлюють бімодальний розподіл супутників. Орбіти, що знаходяться нижче за приблизно 1500 км, розташовуються під радіаційними поясами, в той час як геосинхронні орбіти розташовані вище них. Супутники на напівсинхронних орбітах, наприклад, супутники GPS, повинні використовувати спеціально загартовані компоненти (зокрема в області комп’ютерної пам'яті), щоб забезпечити їх безперебійну роботу на довгі роки. На даний момент супутники типу "Молнія", які мають дуже еліптичні орбіти, є єдиними, що проводять тривалий час у поясах Ван Аллена. Проте навіть вони швидко проходять через небезпечні зони на своєму шляху від перигею (де вони не працюють) до апогею, де проводять більшу частину свого активного часу.

Сонячна радіація є надзвичайно змінною і може значно варіюватися в залежності від активності Сонця. Фонове сонячне іонізуюче випромінювання складається в основному з рентгенівських променів низького рівня та деякої кількості частинок, відомих як сонячний вітер. Однак, під час сонячних вибухових подій, таких як спалахи або корональні викиди маси, потік рентгенівських променів може різко збільшуватись, а енергія випромінювання стає вищою, тобто "твердішою". Електрони і протони можуть викидатися у величезних кількостях, а в окремих випадках деякі частинки можуть бути прискорені до дуже високих енергій, перевищуючи 1 ГеВ. Саме ці сонячні енергетичні частинки (СЕЧ) можуть серйозно впливати на космічні апарати.

СЕЧ можуть завдати прямого радіаційного пошкодження компонентам космічних кораблів, зокрема великим батареям сонячних панелей. У деяких випадках ефективність сонячних батарей знижувалася більше ніж на 30% під час однієї великої сонячної події, що значно скорочує термін служби супутника, іноді навіть на кілька років, що призводить до серйозних фінансових втрат для оператора космічного апарата. Навіть менші електрони з низькою енергією можуть спричиняти пошкодження, і в одному випадку це призвело до повної втрати канадського геосупутника Anik. Іншим ефектом від сонячних частинок є зарядка супутника. Якщо у космічному апараті є поверхні з малим радіусом кривизни, а

також ізольовані один від одного елементи, це може призвести до виникнення диференціального поверхневого заряду. Це, в свою чергу, може спричинити діелектричний заряд на платах космічного корабля, що при накопиченні до критичного рівня може викликати раптовий розряд і пошкодження електронних компонентів. Окремі частинки можуть також призводити до накопичення заряду на внутрішніх елементах, зокрема в комірках пам’яті, що може спричиняти зміну бітів з нуля на одиницю або навпаки, що приводить до помилок в системних програмах або даних. Ці явища відомі як розлади однієї події або ефекти СЕЧ.

Для геосинхронних супутників особливо небезпечним може бути вплив сонячного вітру та міжпланетного магнітного поля, які можуть створити достатній тиск, щоб змістити межі магнітосфери Землі, зокрема магнітопаузу, на рівень, нижчий за орбіту супутників. Зазвичай магнітосфера, що є областю, де магнітне поле Землі контролює рух космічних частинок, захищає супутники від значної частини сонячного випромінювання. Якщо ж супутник виявляється поза межами магнітосфери, тобто в космосі, він зазнає значного підвищення рівня сонячної радіації, перебуваючи на сонячній стороні Землі. Крім того, старі супутники часто залежать від магнітного поля Землі для підтримки правильної орієнтації, і перехід через магнітопаузу може призвести до порушення цієї орієнтації.

Супутникова наземна станція виконує функції прийому сигналів від супутника, а також може передавати команди або комунікаційні матеріали на супутник. Для цього вона використовує антену, яка «ловить» супутниковий сигнал. Кожна антена має певну ширину променя, тобто кутовий діапазон, у якому вона здатна виявити сигнал. Цей діапазон залежить від розміру антени та її частоти роботи: чим більша антена, тим вужчий її промінь, а чим вища частота, тим також менша ширина променя.

Кожен прийнятий сигнал підлягає конкуренції з фоновим шумом, який може ускладнити його сприйняття. Щоб сигнал був придатний для використання, співвідношення сигнал/шум (ССШ) повинно бути достатнім. Для забезпечення нормального зв'язку потужність цікавого сигналу повинна бути як мінімум на 10 дБ (що в 10 разів більше) вищою за рівень фонового шуму.

Шум у системі має два основних джерела: внутрішній та зовнішній. Кожен приймач генерує певний внутрішній шум, який, хоч і можна мінімізувати через точне проектування, неможливо повністю усунути. Це обмежує можливості комунікацій. Зовнішній шум потрапляє через приймальну антену, коли інші джерела, окрім бажаного супутникового сигналу, потрапляють у зону антени. Одним з потужних джерел радіошуму є Сонце, температура якого коливається від 6000 до 2 мільйонів градусів. Сонячний радіошум переміщується по небі, і інколи потрапляє в промінь приймальної антени. Для геосупутників це часто трапляється навколо рівнодення (березень і вересень), коли видиме схилення Сонця збігається із схиленням геосупутника. У такі моменти супутниковий сигнал може «конкурувати» з сигналом сонячного шуму. Навіть за низької сонячної активності сонячний шум зазвичай в 20 децибел (у 100 разів потужніший) перевищує сигнал супутникового телебачення в діапазоні C (4 ГГц).[27]

Зв’язок через супутники завжди піддається періодичним «вимкненням на сонці», які описуються вище. Системи з маленькою шириною променя та високим співвідношенням сигнал/шум є більш стійкими до впливу сонячного шуму. У той час як системи з великою шириною променя і низьким SNR більше схильні до таких перешкод. Радіошум Сонця також зростає з частотою, тому системи в K-діапазоні часто страждають більше, ніж системи в C-діапазоні.

Навіть ті супутникові системи, які демонструють високу надійність в умовах низької сонячної активності, можуть зазнати суттєвих проблем під час потужних сонячних подій, коли радіошум на всіх частотах різко збільшується на кілька порядків.



Рис. 2.2 Вплив на сигнал, що поширюється

2.3.2 Іоносферні ефекти

Іоносфера – це область верхніх шарів атмосфери, яка розташована на висоті приблизно від 70 до 500 км. У цій зоні частина атомів втрачає зовнішні електрони під впливом екстремального ультрафіолетового (EUV) та рентгенівського випромінювання, яке надходить від Сонця. Тому іоносферу називають частково іонізованим середовищем. Іонізований газ, відомий також як плазма, є провідним, тому він взаємодіє з електромагнітними сигналами (радіохвилями), що проходять через нього. До певної частоти, яка називається частотою плазми (визначається електронною щільністю плазми), плазма відбиває радіохвилі. Ця властивість дозволяє поширювати високочастотні або короткохвильові сигнали на великі відстані. Для сигналів вище частоти плазми відбиття не відбувається, але сигнал заломлюється, проходячи через плазму. Чим більша частота сигналу, тим менший його вигин.[28]

Іоносфера не є однорідним шаром. Її щільність варіюється залежно від часу доби, висоти, географічної широти, пори року та активності Сонця. Вона містить нерівності у вигляді плям, згустків чи зон зниженої іонізації. Іоносфера також є дисперсійним середовищем, тобто сигнали різних частот проходять через неї з різною швидкістю. На нижніх висотах іоносфера частіше поглинає радіохвилі, ніж відбиває їх. Усі ці властивості впливають на поведінку електромагнітних сигналів.

Поглинання на низьких висотах і відбиття на великих висотах актуальні лише для частот нижче 30 МГц, тому це не становить значної загрози для супутникового зв’язку. Проте заломлення та дисперсія є важливими факторами для супутникових каналів. В однорідній іоносфері заломлення може впливати на радіолокаційні системи, які відстежують космічні об'єкти, оскільки воно зміщує уявне положення об’єкта від його реального місцезнаходження. Це схоже на явище, коли предмет під водою здається зміщеним через заломлення світла. Дисперсія може спричиняти затримку сигналу та диференціальну затримку у широкосмугових системах, що створює технічні проблеми. Ще одним важливим явищем є ефект Фарадея, який виникає, коли сигнал проходить через плазму в присутності магнітного поля.[29]

Якщо в іоносфері є нерівності, це призводить до явища сцинтиляції, яке розглядається у наступному розділі.

2.3.4 Сцинтиляція

Іоносферна сцинтиляція – це швидкі зміни інтенсивності сигналу, що проходить через іоносферу (наприклад, від супутника до наземної станції). Вона додає до сигналу компонент низькочастотного шуму, що впливає на його якість.

Це явище подібне до мерехтіння зірок у нічному небі, яке спричинене дрібномасштабними нерівностями іоносфери. Замість однорідного шару іонізації певні зони мають щільність іонізації вище або нижче середньої.

Найбільш яскраво сцинтиляція проявляється у двох основних регіонах: полярних областях (як північних, так і південних) і екваторіальних широтах. У полярних зонах нерівності іоносфери виникають через частинки, які проникають із магнітосфери в іоносферу, спричиняючи утворення аврори. Потоки цих частинок створюють нестабільності, як-от бульбашки та зони зниженої іонізації, де сцинтиляція проявляється найсильніше. Авроральні сцинтиляції можуть виникати в будь-який час доби, але переважно спостерігаються вночі, особливо під час геомагнітних бур і високої геомагнітної активності.[30]

В екваторіальних широтах після заходу сонця утворюються бульбашки іонізації на нижніх шарах іоносфери, які підіймаються вгору і формують вертикальні шлейфи. Ці шлейфи також можуть рухатися горизонтально. Найсильніші сцинтиляції виникають поблизу їхніх країв. Екваторіальні сцинтиляції є переважно нічним явищем: більшість шлейфів зникає до півночі, хоча окремі можуть зберігатися до ранніх ранкових годин. Інтенсивність сцинтиляцій у цих регіонах посилюється зі збільшенням сонячного ультрафіолетового (УФ) і рентгенівського випромінювання, що створює густішу і більш іонізовану іоносферу.

Екваторіальні сцинтиляції демонструють залежність від 11-річного сонячного циклу, оскільки їх інтенсивність зростає під час максимумів сонячної

активності. Крім того, вони мають 27-денну періодичність, пов’язану з обертанням Сонця, оскільки УФ-випромінювання розподілене нерівномірно по його поверхні.

Сцинтиляції впливають як на фазу, так і на інтенсивність трансіоносферного сигналу. Коливання інтенсивності, які іноді можуть бути достатньо великими, щоб викликати глибокі загасання сигналу, викликані не поглинанням сигналу в іоносферних нерівностях, а зміною фази різних частин хвильового фронту сигналу. Конструктивні та деструктивні перешкоди різних шляхів сигналу, які спостерігаються на землі, призводять до спостережуваних змін сили сигналу.

Для геосинхронних супутників найбільше значення мають саме екваторіальні сцинтиляції. Виявлено, що вони найбільші в межах 20 градусів на північ і південь від геомагнітного екватора, який близький до географічного екватора. Найбільше постраждає сигнал, який проходить через іоносферу на геомагнітній широті приблизно від 15 до 20 градусів. Геомагнітний екватор змінюється в залежності від довготи. У деяких частинах світу від Близького Сходу до Австралії геомагнітний екватор знаходиться на північ від географічного екватора. Над Америкою геомагнітний екватор знаходиться на південь відгеографічного екватора, як показано на наведених нижче картах світу.

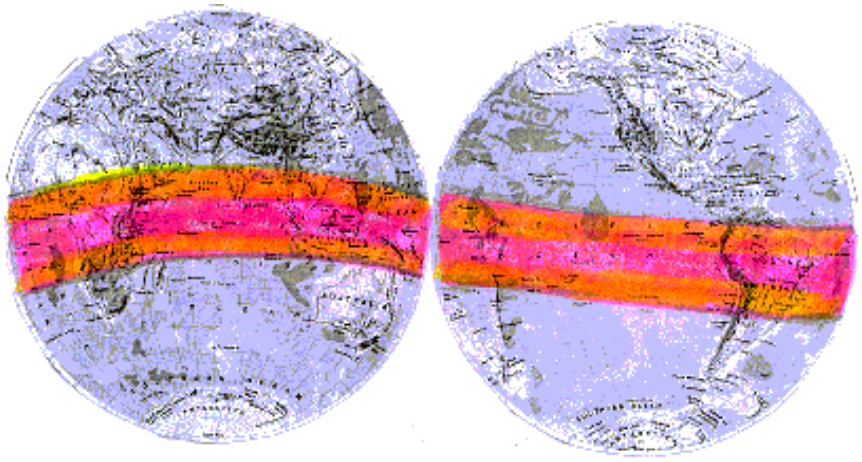


Рис. 2.3 Геомагнітний екватор

Затінені області показують приблизні області, на які зазвичай впливають середні та сильні сцинтиляції. Найбільш інтенсивно уражені регіони лежать до північних і південних країв затінених ділянок.

Щоб визначити, чи впливатиме іоносферна сцинтиляція на конкретний шлях сигналу, необхідно встановити геомагнітну широту точки проникнення в іоносферу (ТПІ) для трансіоносферного сигналу. У таблиці нижче наведено ТПІ для сигналів, отриманих у Дарвіні (Австралія) від ряду геосинхронних супутників.

Зверніть увагу, що багато з цих точок знаходяться на геомагнітній широті близько 20 градусів на південь. Через це вони будуть піддаватися впливу іоносферної сцинтиляції, яка посилюється зі зміщенням на схід і стає більш інтенсивною під час сонячного максимуму внаслідок зростання загальної електронної густини.

Ефекти сцинтиляції, якщо вони виникають, стають помітними одразу після заходу сонця в локальному часовому поясі. Інтенсивність цих явищ знижується після півночі та практично зникає до 3 години ночі за місцевим часом, коли сигнальне мерехтіння повністю припиняється.

```
> Geosynchronous Satellites - Ionospheric Penetration Points <

Observer Coordinates: Latitude (N+/S-) deg? -12.5
                      Longitude (E+/W-) deg? 131
                      Ionospheric penetration height (km)? 300
 SATELLITE   LOOK ANGLES (deg)    PENETRATION/GEOGRPH    PENETRATION/GEOMAGN
 Longitude   Elevation Azimuth    Latitude  Longitude    Latitude  Longitude
     60.0        10.0     274.3      -11.6      121.0      -22.0      193.2
     70.0        20.1     276.8      -11.7      124.8      -21.9      197.2
     80.0        30.5     279.9      -11.8      126.8      -21.9      199.4
     90.0        40.9     284.0      -11.8      128.1      -21.8      200.8
    100.0        51.4     289.8      -11.8      129.1      -21.8      201.7
    110.0        61.6     299.4      -11.8      129.8      -21.8      202.5
    120.0        70.5     318.1      -11.8      130.4      -21.7      203.1
    130.0        75.3     355.4      -11.8      130.9      -21.7      203.7
    140.0        72.0      36.2      -11.8      131.5      -21.6      204.3
    150.0        63.5      57.8      -11.8      132.1      -21.6      204.9
    160.0        53.5      68.7      -11.8      132.8      -21.5      205.6
    170.0        43.0      75.0      -11.8      133.7      -21.4      206.6
    180.0        32.5      79.3      -11.8      134.9      -21.3      207.8
   -170.0        22.2      82.6      -11.7      136.7      -21.1      209.7
   -160.0        12.0      85.3      -11.6      140.1      -20.7      213.2
   -150.0         2.1      87.6      -11.4      146.6      -19.7      220.0
```

Рис 2.4 Рахунки впливу сцинтиляції

Іоносферні сцинтиляції гірші на нижчих частотах, ніж на високих. Найбільше страждають УКХ-частоти, такі як 1частоти 240 МГц, які

використовуються у військових комунікаціях, тоді як L-діапазон страждає помірно, і лише найсильніші мерехтіння впливають на діапазон C і вище.

2.3.5 Обертання Фарадея

Коли радіосигнал із плоскою поляризацією проходить крізь плазму, таку як іоносфера, яка перебуває під впливом магнітного поля (наприклад, магнітного поля Землі), площина його поляризації змінюється. Ступінь цього обертання прямо пропорційна величині магнітного поля та загальній іонізації, через яку проходить сигнал, і обернено пропорційна квадрату частоти сигналу.

Таким чином, сигнали з низькими частотами зазнають значно сильнішого обертання, ніж високочастотні. Коли іоносфера стає більш іонізованою через збільшення сонячного ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання, обертання площини поляризації сигналу також посилюється. Сигнали, що проходять крізь іоносферу під низькими кутами до горизонту, зазнають сильнішого впливу, ніж ті, що рухаються поблизу зеніту, оскільки їхній шлях через іоносферу довший.[31]

На частотах УКХ під час високої сонячної активності площина поляризації може обертатися на багаторазові 360 градусів. На частотах С-діапазону (4 ГГц) обертання сигналу зазвичай обмежується кількома градусами.

Обертання площини поляризації створює дві ключові проблеми. Перша полягає в тому, що якщо наземна станція налаштована приймати сигнал із горизонтальною поляризацією, то поворот на 90 градусів може спричинити повну втрату сигналу. Друга проблема стосується супутникових систем, які використовують вертикально та горизонтально поляризовані сигнали однієї частоти для спектрального повторного використання. У цьому випадку навіть невеликий поворот площини поляризації може викликати перехресне з’єднання небажаного сигналу з антеною. Наприклад, обертання на 5 градусів може спричинити перехресні перешкоди, які знижують співвідношення сигналу до шуму бажаного каналу на 20 дБ.

На графіку нижче представлено типові коливання загального вмісту електронів в іоносфері протягом дня з високою сонячною активністю. Також показано обертання Фарадея в низхідному каналі супутникового телебачення С-діапазону та ортогональне співвідношення потужності, яке виникає. Шкала праворуч ілюструє рівень перехресних перешкод відносно основного сигналу, що сягає близько -20 дБ (або співвідношення 1 до 100).[32]

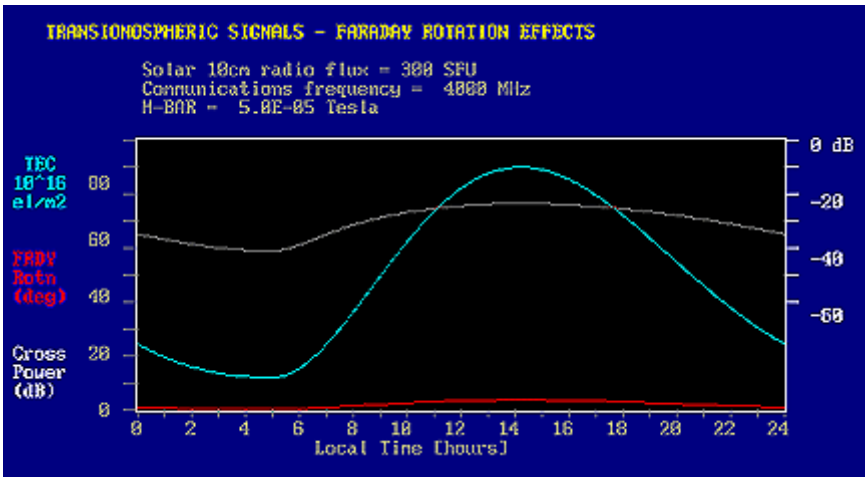


Рис. 2.5 Результат Фарадея

2.3.6 Тропосферне поглинання та інші ефекти

Не тільки верхні шари атмосфери можуть викликати проблеми з каналами супутникового зв'язку. Тропосферні погодні умови, «звичайна» погода, що виникає в нижніх 10 км атмосфери, також можуть спричинити втрати сигналів, що поширюються між супутниковими та наземними станціями.

Водяна пара особливо шкідлива для сигналів вище приблизно 2 ГГц, викликаючи поглинання сигналів, яке стає більшим із збільшенням частоти. Особливо вразливі сигнали K-діапазону (10-20 ГГц), а опади поблизу супутникових наземних станцій можуть спричинити повну втрату сигналу. Знову ж таки, сигнали з низькими висотами зазнають більшого впливу, ніж сигнали, що поширюються поблизу зеніту, тому що хвиля має пройти більш довгий шлях через атмосферу.

На частотах вище 20 ГГц ми починаємо стикатися з резонансним поглинанням на певних частотах. Зокрема, кисень поглинає електромагнітну енергію лише на певних чітко визначених частотах. Ці частоти точно відповідають енергіям, необхідним для підняття атомів Оксигену у вищі енергетичні стани. Супутникові лінії зв'язку розроблені таким чином, щоб уникнути цих добре відомих діапазонів частот.

2.3.7 Пом'якшення впливу космічної погоди

Існує низка стратегій, які допомагають зменшити вплив космічної погоди на системи супутникового зв’язку.

Перший крок у мінімізації ризиків повинен відбутися ще на етапі проектування супутника до його запуску. Конструкція супутника має враховувати можливість заряджання космічного апарата та запобігати розрядам, які можуть пошкодити електронні компоненти. Це досягається шляхом ретельного вибору матеріалів, оптимізації поверхневих контурів і забезпечення належного «ґрунтового» з’єднання для відведення заряджених частинок.

Коли супутник перебуває на орбіті, оператори можуть застосовувати різні тактики для зменшення ризиків. Наприклад, під час подій, пов’язаних із високою енергією заряджених частинок (переважно протонів, що виникають під час подій SEP), супутник можна переорієнтувати, щоб мінімізувати вплив цих частинок. Попередження про такі події можна отримати від спеціалізованих агентств космічної погоди. Крім того, у таких випадках супутникові оператори можуть вирішити тимчасово утриматися від завантаження команд для зменшення ризику помилок. Для підтримання орієнтації супутника, особливо на низькій навколоземній орбіті (LEO), контролер може виконувати «дамп імпульсу», щоб уникнути надмірного навантаження на реакційні колеса, особливо під час порушень.[33]

Для пом’якшення впливу ефекту відключення сонця (коли Сонце опиняється в полі зору між супутником і приймачем на Землі) доцільно використовувати

більше одного супутника в різних орбітальних позиціях. Це дозволяє перенаправляти трафік на інший супутник, який у певний момент не перебуває на одній лінії з Сонцем. Подібне «просторове різноманіття» також корисне для уникнення тропосферного поглинання, спричиненого локальними зонами з високими опадами, перенаправляючи зв'язок через регіони з більш сприятливими умовами.

Таким чином, комбіноване використання технічних рішень на етапі проєктування, оперативних заходів під час експлуатації супутників і просторового резервування дозволяє мінімізувати вплив космічної погоди на супутниковий зв'язок і забезпечити його стабільність.

Іоносферні сцинтиляції відбуваються в певний час доби, і можна спланувати рух таким чином, щоб пік попиту не відбувався у вечірні години, або використовувати альтернативне посилання в цей час.

Деполяризацію сигналу можна подолати, повернувши живлення антени, щоб компенсувати зміну обертання, викликану ефектом Фарадея. Автоматична адаптивна система може використовуватися або наземною станцією, або супутниковим контролером, який контролює ефект за допомогою передачі маяка з відповідного супутника.

Навіть якщо неможливо або неможливо вжити остаточних заходів для усунення проблеми, пов'язаної з космічною погодою, операторам супутників завжди важливо знати, чи була проблема спричинена впливом космічної погоди, чи через збій апаратного чи програмного забезпечення.

3 РОЗРАХУНОК ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Методологія розрахунку параметрів супутникових систем

Розглянемо деякі параметри при передачі сигналів супутникового зв'язку.

3.1.1 Запізнення сигналу

Велика довжина ліній зв'язку між ЗС і ретранслятором, що знаходяться на борту ШСЗ, призводить до затримки сигналів. Це залежить від того, що сигналом потрібен час, щоб пройти відстань між ЗС. Час визначається за формулою:

$$\tau \cong \frac{2H}{c} \tag{3.1}$$

де Н - відстань від супутника до поверхні Землі;

с = 3 · 108 м/с - швидкість світла.

Таким чином, при Н = 35786 км (випадок геостаціонарного супутника) величина запізнювання складе приблизно:

$$\tau \cong \frac{72000\ \text{км·с}}{3{\cdot}10^{8}\text{м}} \cong 250\ \text{мс} \tag{3.2}$$

3.1.2. Ехосигнали

Затримка сигналів викликає утворення відчутних для абонентів ехосигналів. Це проявляється в тому, що абонент чує свій власний голос із затримкою, яка відповідає подвоєному часу поширення сигналу між обома сторонами розмови. Таким чином:

$$t_{\text{эс}} = \frac{4H}{c} \tag{3.3}$$

Так для систем зв'язку, що використовують геостаціонарні супутники:

$$\tau \cong 2 \cdot 250 = 500\ \text{мс}. \tag{3.4}$$

3.1.3 Ефект Доплера

Це фізичне явище, яке проявляється у зміні частоти отриманих коливань під час взаємного руху передавача та приймача цих коливань. Ефект Доплера досягає свого максимуму, коли передавач переміщується відносно приймача вздовж лінії зв'язку[34]:

$$\Delta f = \frac{f_0 V}{c}, \tag{3.5}$$

де f_0 - частота несучого коливання; V - швидкість передавача.

Таким чином, при зближенні передавача і приймача частота радіоколибань зростає пропорційно V/c, при видаленні - зменшується за тим самим законом.[11]

3.2 Розрахунок параметрів спрямованості антен наземних станцій

Дані за параметрами наведення необхідні для орієнтації максимуму головної пелюстки ДС антени ЗС супутникових систем зв'язку на ШСЗ.

Це, в першу чергу, стосується:

– нових ЗС;

– ЗС, що переводяться на роботу через інший ШСЗ;

– ЗС, що тимчасово припиняв роботу у системі з різних причин.

Параметри наведення антени земної станції (ЗС) визначаються кутовими координатами, які вказують напрямок максимуму головної пелюстки діаграми спрямованості (ДС) на штучний супутник Землі (ШСЗ). Ці координати задаються азимутом $\alpha_{ШСЗ}$ і кутом місця $\beta_{ШСЗ}$. Приблизні значення азимуту та кута місця можуть бути обчислені за допомогою формул або отримані зі спеціальних таблиць. Варто зауважити, що точні значення цих параметрів для будь-якого моменту доби можуть бути визначені лише під час роботи системи наведення антени ЗС, використовуючи сигнали, які приймаються від ШСЗ.

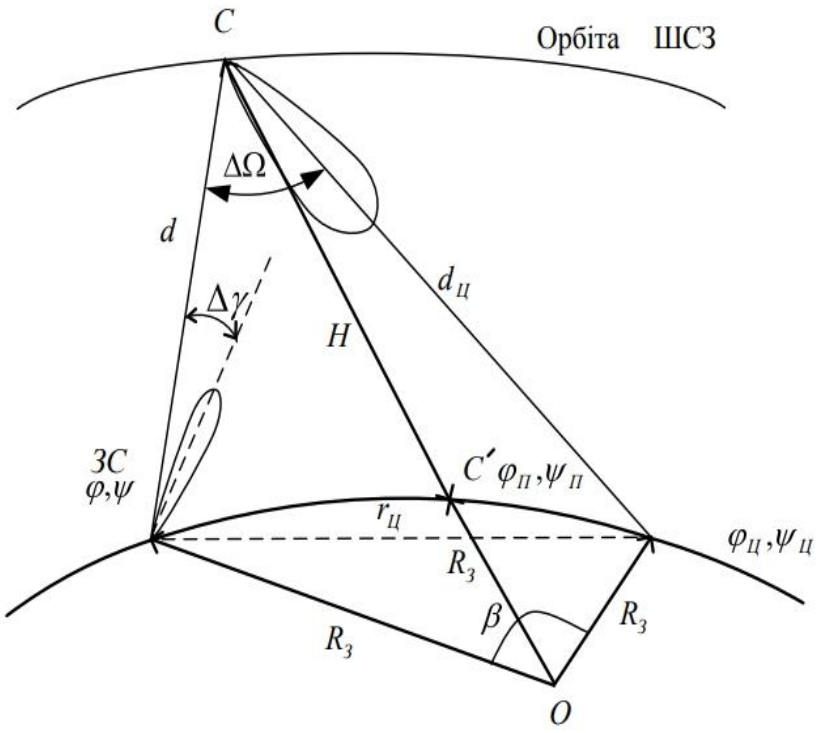


Рис 3.1 Наведення ШСЗ

Для розрахунку параметрів наведення для конкретної ЗС необхідно мати наступні дані:

– номінальне положення ШСЗ на орбіті;

– відхилення ШСЗ від номінального положення в перебігу доби;

– точні географічні координати ЗС;

– дані прив'язки антени до кутових координат: по азимуту і куту місця.

Прив'язка антени по азимуту може бути проведена або по Полярній зірці, або за компасом з урахуванням магнітного нахилу в місці розташування ЗС.

Розрахунок кута місця антени ЗС проводиться за формулою:

$$\beta_{ШСЗ} = \text{arctg}\left[\frac{cos(\lambda_R-\lambda_P)\left(\varphi_R-\frac{R_З}{R_З+H}\right)}{\sqrt{1-cos^2\lambda(\lambda_R-cos_P)(\varphi_R)^2}}\right], \quad (3.6)$$

де P_λ – географічна довгота координата підсупутникової точки;

λ_R ,ϕ_R – географічні довгота і широта місця розташування ЗС;

$R_З$ – радіус Землі ($R_З$ = 6 378,16 км);

H – висота геостаціонарної орбіти (H = 35 786 км). Формула для розрахунку

азимута антени ЗС має наступний вигляд:

$$\alpha_{\text{ШСЗ}} = 180^{\text{o}} - arctg\left[\frac{tg(\lambda_R - \lambda_P)}{sin(\varphi_R)}\right]. \quad (3.7)$$

Позитивний напрямок азимута визначається обертанням антени земної станції (ЗС) від напряму на північ у напрямку за годинниковою стрілкою. Щоб оцінити можливість прийому чи передачі радіосигналів до заданого штучного супутника Землі (ШСЗ), необхідно порівняти розраховані значення азимута і кута місця з допустимими межами. Для ШСЗ, що перебувають на геостаціонарній орбіті, вважається, що вони доступні для прийому сигналів з території України за умови, якщо кути знаходяться в таких межах: $\alpha_{\text{ШСЗ}} \approx 180^{\text{o}} \pm 70^{\text{o}}$ і $\beta_{\text{ШСЗ}} \leq 10^{\text{o}} < 36{,}5^{\text{o}}$.

3.3 Аналіз геометричних та електродинамічних характеристик антен

Антена є ключовим елементом радіоканалу будь-якої системи радіозв'язку. У системах супутникового зв'язку найчастіше використовуються параболічні антени та їх модифікації, зокрема однодзеркальні, дводзеркальні та офсетні варіанти. Для визначення основних електродинамічних параметрів, таких як діаграма спрямованості (ДС), коефіцієнт посилення (КП) і коефіцієнт використання поверхні (КВП), у практиці інженерних розрахунків широко застосовується апертурний метод. Цей метод передбачає уявлення параболічної антени як круглої синфазної апертури із заданим амплітудним розподілом збуджуючого поля, яке створюється опромінювачем.[35]

У ролі опромінювачів для параболічних антен зазвичай використовуються такі елементи, як відкриті кінці хвилеводів, рупорні опромінювачі тощо. Амплітудний розподіл поля в апертурі антени, створений цими видами опромінювачів, можна описати таким математичним виразом:

$$f(r) = |1 - (1 - \Delta r^2)|, \quad (3.8)$$

де Δ – амплітуда поля по краю випромінюючого розкриву; $-1 \leq r \leq 1$ – поточна нормована координата розкриву.

Вид цього розподілу визначає форму і параметри ДС антени при заданому

розмірі розкриву d_A/λ.

Формула для розрахунку діаграми спрямованості параболічної антени з урахуванням представленого амплітудного розподілу поля в апертурі матиме вигляд:

$$f\Theta = \left|\frac{\Delta J_1(u)}{u} + \frac{(1-\Delta)J_2(u)}{u^2}\right|, \quad (3.9)$$

де u = 0,5 kd_Asin θ; k = 2π/λ ; J_1(u), J_2(u) – функції Бесселя першого роду, першого і другого порядків відповідно.

Взаємозв'язок між шириною головної пелюстки ДС антени за рівнем половинної потужності – $2\Delta\theta_{0,5}$ град., відносним діаметром апертури параболічної антени – d_A/λ та КВП антени – η можна визначити за наступною формулою:

$$2\Delta\theta_{0,5}\ (\text{град}) \approx \frac{1}{\sqrt{\eta}} \cdot \frac{\lambda}{d_A} \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (3.10)$$

де λ – довжина хвилі електромагнітного коливання ($\lambda = c/f, c = 3 \cdot 10^8 \text{м}/c$).

Взаємозв'язок між КП антени G та геометричними параметрами апертури антени (відносною площею апертури – S_A/λ^2) з урахуванням КВП антени η можна визначити за наступною наближеною формулою:

$$G(\text{раз}) \approx \frac{4\pi S_A \eta}{\lambda^2};\ G(\text{дБі}) = 10\times\lg(G(\text{раз})), \quad (3.11)$$

де $S_A = \pi \cdot d^2{}_A/4$ -площа круглої апертури з діаметром d_A , або безпосередньо в логарифмічному вигляді за формулою:

$$G(\text{дБі}) = 20lg(d_A) + 20lg(f) + 10lg(\eta) + 20{,}4, \quad (3.12)$$

де діаметр параболічної антени d_A у метрах; частота високочастотного коливання f у ГГц.[13]

3.4 Енергетичні розрахунки супутникового каналу зв’язку

Супутникова система зв'язку включає дві основні ділянки: Земля-ШСЗ і ШСЗ-Земля. Її розрахунок подібний до розрахунків радіорелейних систем прямої видимості, що мають два сегменти. Проте супутникові системи потребують

врахування специфічних особливостей, пов'язаних із технічними відмінностями обладнання на кожній з ділянок, а також неоднакових енергетичних характеристик і рівнів шумів. Ці фактори суттєво впливають на точність і надійність розрахунків, що відрізняє супутникові системи від традиційних радіорелейних ліній.

Відношення сигнал/шум на вході приймача земної станції (РС/РШ)ВХ

Потужність сигналу на вході приймача P_c пов'язане з потужністю передавача співвідношенням:

$$P_c = P_{пер} \frac{G_{пер} G_{пр}}{\eta_{пер} \eta_{пр} V \cdot U}, \quad (3.13)$$

де:

- $G_{пер}$ й $G_{пр}$ - коефіцієнт підсилення антен;
- $\eta_{пер}$ $\eta_{пр}$ - втрати в антенно-фідерному тракті;
- $V=(4\pi r/\lambda)^2$ - втрати у вільному просторі на відстані R;
- U - додаткові втрати в реальному просторі.

Або можна записати:

$$\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вх} = P_{пер} \frac{G_{пер} G_{пр}}{\eta_{пер} \eta_{пр}} \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{1}{k K_\Sigma \Delta f_ш} \quad (3.14)$$

$$P_{ш\Sigma} = кT_\Sigma \Delta f_ш \quad (3.15)$$

Для всієї лінії з ШСЗ

$$\left(\frac{P_ш}{P_c}\right)_\Sigma = \left(\frac{P_ш}{P_c}\right)_{з-с} + \left(\frac{P_ш}{P_c}\right)_{с-з} \quad (3.16)$$

Для ділянки Земля-Супутник

$$\left(\frac{P_ш}{P_c}\right)_{з-с} = \frac{(4\pi)^2 R^2_{з-с} \eta_{перз} \eta_{прс} кT_{с\Sigma} \Delta f_{шс} U_{з-с}}{P_{перз} G_{перз} G_{прс} \lambda^2_{з-с}} \quad (3.17)$$

$$\left(\frac{P_ш}{P_c}\right)_{с-з} = \frac{(4\pi)^2 R^2_{с-з} \eta_{перс} \eta_{прз} кT_{з\Sigma} \Delta f_{шз} U_{с-з}}{P_{перс} G_{перс} G_{прз} \lambda^2_{с-з}} \quad (3.18)$$

Для системи зв'язку через ШСЗ можна приблизно вважати, що:

1. Rс-з=Rз-с=R.
2. $\eta_{перз}=\eta_{прз}=\eta_з$ й $\eta_{перс}=\eta_{прс}=\eta_с$.
3. $\Delta f_{шс}=\Delta f_{шз}$.
4. $U_{з-с}=U_{с-з}=1$.

Тому можна записати

$$\left(\frac{P_ш}{P_с}\right)_{\Sigma} = 16\pi^2 R^2 \eta_З \eta_с к \cdot \Delta f_{шз} \cdot \left(\frac{T_{с\Sigma}}{P_{перЗ} G_{перЗ} G_{прС} \lambda_{З-С}^2} + \frac{T_{З\Sigma}}{P_{перС} G_{прЗ} G_{прЗ} \lambda_{С-З}^2}\right) \quad (3.19)$$

Шумова температура земного приймача визначається

1. Потужністю власних шумів приймального пристрою й потужністю шумів антеннохвильоводного тракту.

2. Потужністю шумів антени, обумовлена впливом на неї теплового випромінювання Землі від атмосфери.

3. Потужністю шумів радіовипромінювання Сонця й інших космічних джерел.

$$T_{З\Sigma} = T_{пр} + T_{АФТ} + \left(\frac{T_{АТМОС} + T_{кос}}{\eta_З}\right) \quad (3.20)$$

де: $T_{пр}$ - визначається вхідними ланцюгами й типом малошумливий УНВЧ; $T_{АФТ}$ - визначається як

$$T_{АФТ} = T_0(1 - \eta_З) \quad (3.21)$$

де: T_0=290 К - абсолютна температура;

$T_{АТМ}$ - є функцією кута місця й частоти. Зменшення кута місця різко збільшують шуми атмосфери, тому β≥50;

$T_{космо}$ - визначається температурою яскравості джерела $T_я$.

Якщо кутові розміри джерела випромінювання $\Psi_п$ значно менше ширини діаграми спрямованості антени, α_0, тоді

$$T_{кос} = T_я \Psi_п / \alpha_0 \quad (3.22)$$

якщо $\alpha_0 \leq \Psi_п$, то $T_{космо} = T_я$.

$T_{космо}$ залежить від області неба, у яку спрямована антена й визначається по спеціальних картах. Найбільш інтенсивним джерелом шумів є Сонце.

Шумова температура бортового приймача ШСЗ

$$T_{С\Sigma} = T_з + T_{атм} + bT_{космо} + T(3.23)_{пр.бор} \quad (3.23)$$

де: $T_з$ - еквівалентна шумова температура;

b - коефіцієнт, що визначає, що космічні шуми приймаються тільки

бортовими пелюстками бортової антени;

$T_{пр.бор}$ - шумова температура вхідного пристрою бортового приймача.

Як правило $T_{C\Sigma}$ велико, однак збільшуючи енергетичні параметри земного устаткування можна вважати, що велике значення $T_{C\Sigma}$ несуттєвим.

3.5 Методи покращення енергетичної ефективності супутникових систем (мультиплексування)

3.5.1 Методи мультиплексування в супутниковому зв'язку

Мультиплексування – це технологія передачі даних, яка дозволяє об'єднувати інформацію з декількох джерел в один сигнал для передачі через спільне середовище. Це може стосуватися як аналогових, так і цифрових сигналів. Якщо об’єднуються аналогові сигнали, використовують аналоговий мультиплексор, а у випадку з цифровими сигналами — цифровий. Головна перевага мультиплексування полягає в тому, що воно дозволяє передавати велику кількість сигналів через одне середовище, зменшуючи витрати на передачу. Таким середовищем може бути коаксіальний кабель, мідний провідник або бездротовий канал, здатний одночасно обробляти кілька сигналів.

Хоча всі сигнали передаються через один канал, це не обов’язково відбувається одночасно. Загалом, мультиплексування — це методика, що об'єднує кілька сигналів у складений сигнал для передачі через єдиний канал. Важливо, щоб сигнали залишалися розділеними, щоб уникнути перешкод між ними. Це дозволяє легко виділити кожен сигнал на приймальній стороні, забезпечуючи точну і ефективну передачу.

Мультиплексування може здійснюватися у різних доменах, таких як час, фаза, довжина хвилі, частота тощо. Пристрої, які реалізують цю техніку, називаються мультиплексорами, а відповідні схеми — мультиплексуванням. Основними типами мультиплексування є аналогове та цифрове.

Мультиплексування з частотним поділом (FDM) є методикою, яка дозволяє об’єднувати кілька сигналів в один для передачі через загальний канал зв’язку. На стороні передавача здійснюється процес мультиплексування, тоді як на приймальній стороні відбувається демультиплексування — розподіл об'єднаного сигналу на окремі компоненти. У FDM загальна пропускна здатність каналу розділяється на кілька частотних діапазонів, які не перекриваються. Кожна з цих частотних смуг використовується для передачі окремого сигналу, що дозволяє уникнути їх взаємних перешкод.

У FDM усі користувачі одночасно використовують спільне середовище передачі, проте кожному з них виділяється окрема частота для передачі даних. Незважаючи на це, існує ризик виникнення перехресних розмов через одночасний доступ усіх користувачів до одного середовища.

Процеси мультиплексування та демультиплексування в технології WDM (мультиплексування з поділом за довжиною хвилі) часто порівнюють із заломленням світла крізь призму, де різні частоти світла розділяються, утворюючи спектр. Це забезпечує ефективний розподіл каналів зв’язку за рахунок використання різних довжин хвиль.

Мультиплексування з поділом довжини хвилі поділяється на два типи, однонаправлене WDM і двонаправлений WDM. В односпрямованому WDM дані надсилаються тільки з одного боку і отримуються з іншого боку. Мультиплексування довжини хвилі відбувається на стороні відправника, а демультиплексування довжин хвиль відбувається на стороні приймача. У двонаправленому WDM дані можуть надсилатися з обох сторін, що означає, що обидві сторони можуть виконувати мультиплексування та демультиплексування.

Переваги WDM (мультиплексування з поділом за довжиною хвилі):

1. Повнодуплексна передача. Одночасна передача та прийом даних для більшої ефективності.

2. Легкість переналаштування. Система легко адаптується до змін у конфігурації.

3. Надійність компонентів. Висока стабільність та пропускна здатність завдяки оптичним елементам.

4. Високий рівень безпеки. Забезпечує захист даних та швидкий доступ до нових каналів.

5. Економічність і масштабування. Низька вартість впровадження та розширення системи.

6. Одночасна передача сигналів. Можливість передавати кілька сигналів через одну оптичну лінію.

Недоліки WDM (мультиплексування з поділом за довжиною хвилі):

1. Проблеми з масштабованістю. Для кожного блоку оптичної мережі (ONU) потрібен окремий передавач. Це ускладнює додавання нових ONU, якщо передавачі не були підготовлені заздалегідь.

2. Вимоги до лазерів. Кожен ONU потребує лазера з конкретною довжиною хвилі, що додає складнощів у налаштуванні.

3. Зростання вартості. Додавання нових оптичних компонентів збільшує вартість системи.

4. Неефективність використання пропускної здатності. Не всі частотні діапазони можуть бути використані ефективно.

5. Складність налаштування довжин хвиль. Підтримка точних довжин хвиль вимагає високої точності.

6. Каскадна топологія. Використання каскадної топології ускладнює керування мережею.

Мультиплексування з частотним поділом (FDM) — це технологія, яка дозволяє використовувати доступну пропускну здатність каналу зв'язку для одночасної передачі кількох сигналів. Цей метод є основою аналогового мультиплексування, де один канал зв'язку ділиться на кілька частотних підканалів. Для забезпечення правильного функціонування загальна пропускна здатність каналу повинна перевищувати суму окремих пропускних здатностей кожного сигналу. Якщо канали розташовуються занадто близько один до одного, це може

призвести до перехресних перешкод або "розмов" між сигналами, що знижує якість зв'язку. Для запобігання таким перешкодам використовують механізм синхронізації каналів, при якому між ними вводиться захисна смуга. Ця смуга являє собою невикористовувані канали, що розташовані між активними частотними каналами, аби мінімізувати перехресні розмови і забезпечити більш стабільну передачу сигналів. У випадку, коли вхідний сигнал є цифровим, перед його подачею на модулятор необхідно здійснити перетворення в аналоговий формат, що забезпечує коректну передачу через аналоговий канал.

Переваги мультиплексування FDM**:**

1. Можливість одночасної передачі великої кількості сигналів (каналів) через один канал зв'язку.
2. Процес демодуляції в системах FDM є простим і не потребує складних налаштувань.
3. Для ефективної роботи FDM не потрібно складної синхронізації між передавачем і приймачем, що знижує вимоги до апаратури.
4. Завдяки повільному вузькосмуговому завмиранню вплив на сигнал обмежується лише одним каналом, що дозволяє зберегти стабільність інших каналів.

Недоліки мультиплексування FDM:

1. Для належної роботи каналу необхідна значна пропускна здатність, оскільки кожен канал потребує окремої частоти.
2. У системах FDM може виникати інтермодуляційне спотворення, що призводить до спотворення сигналів.
3. Для реалізації FDM необхідна велика кількість модуляторів і фільтрів, що збільшує вартість і складність системи.
4. FDM може зазнавати перехресних розмов між каналами, особливо коли частоти каналів розташовані занадто близько один до одного.
5. Усі канали системи FDM можуть бути вразливими до широкосмугового завмирання, що впливає на якість сигналу.

Застосування FDM

1. FDM використовується для радіомовлення FM та AM.
2. FDM використовується в телевізійному мовленні.
3. Стільниковий телефон першого покоління також використовує FDM.

FDM застосовується для передачі аналогових сигналів і не вимагає синхронізації між передавачем і приймачем. Цей метод дозволяє передавати велику кількість сигналів одночасно через один канал. Проте, він стикається з проблемами перехресних розмов і може спричиняти інтермодуляційне спотворення. FDM активно використовується в таких сферах, як амплітудна модуляція (AM), FM-мовлення, телефонні мережі загального користування та системи кабельного телебачення.

Волоконно-оптичний зв'язок вимагає використання спеціального типу мультиплексора, відомого як мультиплексор з поділом довжини хвилі (WDM). Це метод мультиплексування, який розроблений для високошвидкісних оптоволоконних ліній зв'язку. У цій технології пропускна здатність каналу повинна перевищувати сумарну пропускну здатність окремих каналів. Сигнали, які передаються, конвертуються у світлові хвилі, де кожна хвиля має свою унікальну довжину, і всі вони передаються одночасно через один волоконно-оптичний кабель. Система WDM розподіляє смугу пропускання оптичного волокна на декілька окремих неперекриваючихся каналів, кожен з яких має свою довжину хвилі. Всі сигнали з різними довжинами хвиль комбінуються та передаються по одному каналу, а демультиплексор на приймальному боці розділяє їх назад за відповідними довжинами хвиль. Цей підхід значно збільшує ефективність передачі даних, дозволяючи використовувати більшу потужність каналу.[36]

3.6 Розрахунки космічного зв’зку

При проектуванні систем космічного зв’язку необхідно враховувати кілька важливих параметрів, зокрема потужність передавача та розміри антен як на землі, так і в космосі. Це дозволяє забезпечити стабільний та ефективний зв'язок із прийнятним співвідношенням сигнал/шум або низьким рівнем бітових помилок. Однією з переваг космічного зв'язку є те, що він часто здійснюється по прямій видимості, без значних поглинань чи розсіювань через середовище. Завдяки цьому можна з високою точністю розрахувати та прогнозувати параметри зв’язку.

Основою будь-якої космічної комунікації є закон зворотних квадратів. Цей фізичний принцип вказує на те, що електромагнітне випромінювання поширюється в просторі таким чином, що його інтенсивність зменшується пропорційно зворотному квадрату відстані від джерела. Це математично виражається наступним чином:

$$I = k / r^2 \qquad (3.13)$$

де r – відстань від випромінювача, а k - константа пропорційності

Цей закон графічно проілюстровано нижче.

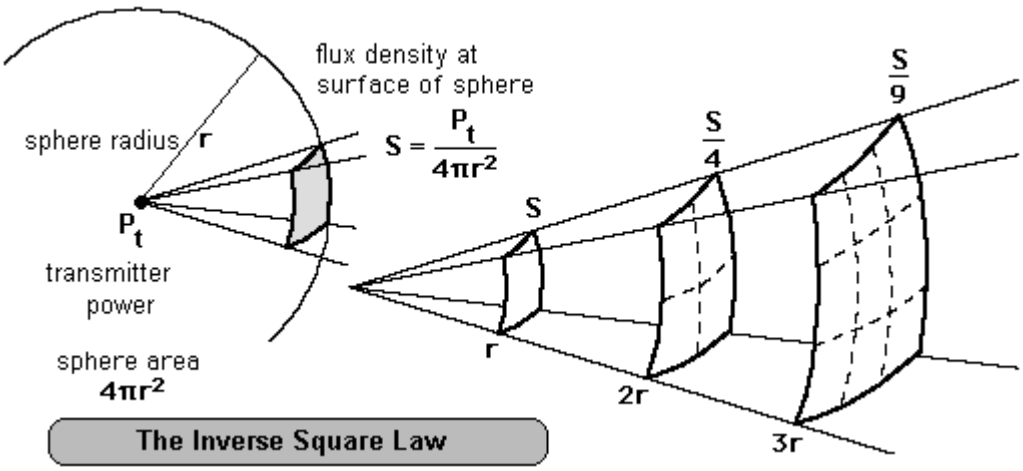


Рис. 3.2 Закон звортних квадратів

На відстані r промінь проходить через площу A. На відстані 2r промінь проходить через площу 4A, а на відстані 3r промінь проходить через площу

9А. Видно, що площа збільшується як квадрат відстані. Якщо не відбувається поглинання енергії пучка, однакова потужність повинна проходити через кожну область. На відстані 2r кожен квадрат площі отримує лише одну чверть загальної потужності променя, а на відстані 3r кожна одиниця площі отримує лише одну дев'яту загальної потужності променя. Таким чином, щільність потоку сигналу (тобто потужність на одиницю площі) пропорційна зворотному квадрату відстані.

Як визначити константу пропорційності? Уявімо, що ми маємо ізотропний випромінювач, який передає потужність P_t рівномірно в усіх напрямках. Тепер, якщо ми уявимо сферу, що оточує цей передавач і має його в центрі, то потужність, яка проходить через кожну точку поверхні цієї сфери, буде однаковою. Оскільки площа поверхні кулі радіусом r дорівнює $4\pi r^2$. , то вся передана потужність повинна рівномірно розподілятися по цій поверхні. Таким чином, щільність потоку сигналу на поверхні сфери буде:

$$S = P_t / (4 \pi r^2) \qquad (3.14)$$

Це також показано на малюнку нижче.

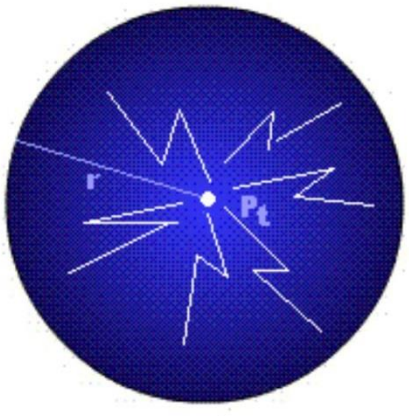


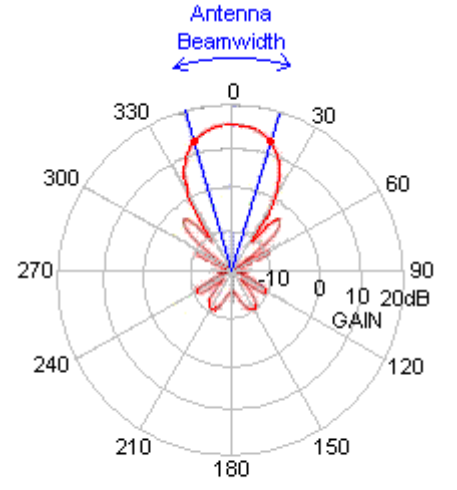
Рис. 3.3 Константа пропорційності

Вся енергія, що випромінюється ізотопний передавач потужність Pt в центрі а сфера радіуса r повинна пройти через поверхню кулі, яка має площу $4\pi r^2$.Таким чином щільність потоку при поверхня задається:

$$S=P_t/(4\pi r^2)\ Wm^{-2} \qquad (3.15)$$

Примітка. Якщо розглянути це питання більш детально, можна побачити, що закон обернених квадратів є наслідком тривимірної природи нашого Всесвіту. У двовимірному просторі, для прикладу, закон поширення енергії мав би вигляд, де потужність $S_{2D}=P_t/(2\pi r)$. , тобто енергія розподіляється пропорційно оберненому значенню відстані, а не оберненому квадрату відстані. В результаті цього потужність зменшувалася б повільніше, ніж у тривимірному просторі, оскільки розповсюдження сигналу в двовимірному випадку відбувалося б на меншій площі.

Більшість реальних передавальних систем не є ідеальними ізотропними випромінювачами. Замість цього вони зазвичай спрямовують сигнали в певні промені, що дозволяє сконцентрувати потужність уздовж осі антен. Це досягається за рахунок зменшення рівня сигналу в інших напрямках. Ширина таких променів може варіюватися в залежності від конструкції антени: якщо антена має низький коефіцієнт посилення, то промінь буде досить широким, а коли коефіцієнт посилення високий — промінь буде дуже вузьким і направленим. Тому фокусування сигналу дозволяє більш ефективно передавати потужність на великі відстані, зберігаючи енергію в потрібному напрямку.



POLAR DIAGRAM OF ANTENNA GAIN

Рис. 3.4 Коефіцієнт посилання антени

Неізотропні випромінювачі все ще підкоряються закону зворотних квадратів. Навіть лазерні промені, які мають надзвичайно вузькі промені, підкоряються закону зворотних квадратів. Досі не створено жодного пристрою, випромінювана енергія якого не розходиться з віддаленістю від випромінювача. Для неізотропного випромінювача з коефіцієнтом посилення антени G_t ми використовуємо «ефективну» потужність випромінювання (потужність у центрі променя), де:

$$P_{eff} = G_t P_t, \text{ отже} \quad (3.16)$$

$$S = G_t P_t / (4 \pi r^2) \quad (3.17)$$

На приймальному боці системи знаходиться антена, яка захоплює частину потужності, що передається. Ключовим параметром, що визначає ефективність приймальної антени, є її ефективна площа. Для параболічної антени, як видно на схемі, ефективною площею є частка «e» фізичного поперечного перерізу, який антена представляє для вхідного сигналу. Цю частку «e» називають ефективністю антени. Для інших типів антен ефективну площу можна обчислити за іншими формулами, залежно від конструкції антени.

Одиницями вимірювання щільності потоку є ват на квадратний метр (Вт/м²), а площі вимірюються в квадратних метрах. Потужність, яку збирає антена, визначається як добуток щільності потоку і ефективної площі збору антени, що дозволяє оцінити кількість енергії, яку антена може прийняти з навколишнього простору:

$$P_r = SA_e \quad (3.18)$$

Підставляючи S і A_e, знаходимо, що:

$$P_r = e D^2 P_{eff} / (16 r^2) \quad (3.19)$$

У будь-якій системі прийому сигналу потужність цього сигналу повинна бути порівняна з потужністю шуму. Шум може бути викликаний зовнішніми джерелами, але також він неминуче генерується в самому приймачі в результаті електронних процесів, пов'язаних з активними елементами, такими як транзистори, що використовуються для посилення сигналу. Навіть пасивні елементи, наприклад

резистори, здатні створювати шум, і цей шум безпосередньо залежить від температури резистора. Тому часто використовують поняття "шумова температура приймача", що визначається як температура ідеального (безшумного) резистора, підключеного до ідеального приймача, який генерує ту ж саму шумову потужність, що й реальний приймач.

Ця потужність шуму задається математично за формулою:

$$P_n = k\,BT, \text{ де} \qquad (3.20)$$

k–константа (звана постійною Больцмана),

B–смуга пропускання приймача (в Гц), а

T – еквівалентна шумова температура приймаючої системи.

У одиницях CI k має значення 1,38 x 10^{-23} .

Для отримання додаткової інформації про шум зв'язку зверніться до статті ASA про шум. Щоб сигнал можна було виявити, він повинен перевищувати деяке число "n" помноженого на шум. Тобто:

$$P_r > n\,P_n \qquad (3.21)$$

Значення $n = P_r / P_n$ зазвичай називають відношенням сигнал/шум або SNR (хоча альтернативним визначенням ССШ є ССШ = $(P_r + P_n) / P_n$). Ми скористаємося першим визначенням. ССШ часто виражається в децибелах. Таким чином, n=2 означає ССШ =3dB, n=10 означає ССШ =10dB, а n=100 означає ССШ =20dB.

Для забезпечення розбірливості голосового зв'язку коефіцієнт сигнал/шум (ССШ) повинен перевищувати 3 дБ. Загалом, значення 10 дБ є мінімально необхідним для досягнення задовільної якості зв'язку, а для "безшумного" зв'язку необхідний коефіцієнт 20 дБ (n=100). Для телевізійного зображення, яке має бути вільним від шуму, може знадобитися ще вищий рівень ССШ. Однак для деяких видів модуляції, зокрема модуляції з розширеним спектром, сигнал все одно можна декодувати при значеннях n менше 1, що відповідає негативним значенням ССШ в децибелах.

ССШ обчислюється з виразу:

$$n = P_r / P_n = e\,D^2\,G_t\,P_t / (16\,r^2\,k\,BT) \qquad (3.22)$$

Якщо площу збирання антени потрібно розрахувати, це можна зробити за допомогою так званої теореми взаємності. Це стверджує, що коефіцієнт посилення G приймальної антени ідентичний коефіцієнту посилення тієї ж антени, яка використовується для передачі сигналу. Це посилення передачі можна виміряти на «діапазоні антени», порівнявши з всенаправленою антеною (або антеною з відомим підсиленням). Ефективна площа збирання антени розраховується з:

$$A_e = \lambda^2 G / (4\pi) \tag{3.23}$$

або

$$e D^2 = \lambda^2 G / \pi^2 \tag{3.24}$$

Тепер ми маємо достатньо інформації для розрахунку параметрів зв’язку для широкого кола ситуацій космічного зв’язку.

Примітка: інженери часто використовують «логарифмічні» варіанти цих формул, щоб мати можливість додавати та віднімати значення, а не множити або ділити їх. Сьогодні, з використанням комп'ютерних технологій, ця потреба відпала. У багатьох інженерних підручниках, що стосуються зв'язку, також зустрічається вираз для втрат у "вільному просторі" в децибелах, що залежить від частоти. Однак це є неправильним, оскільки ми вже показали, що втрати у вільному просторі безпосередньо визначаються геометрією простору і не залежать від довжини хвилі чи частоти. Причиною плутанини серед інженерів є те, що вони використовують неправильний параметр для приймальної антени. Замість площі збору вони беруть підсилення, і таким чином вводять залежність підсилення від довжини хвилі, яку помилково приписують до втрат у вільному просторі. Ці рівняння працюють, але створюють хибне уявлення про фізичну ситуацію.

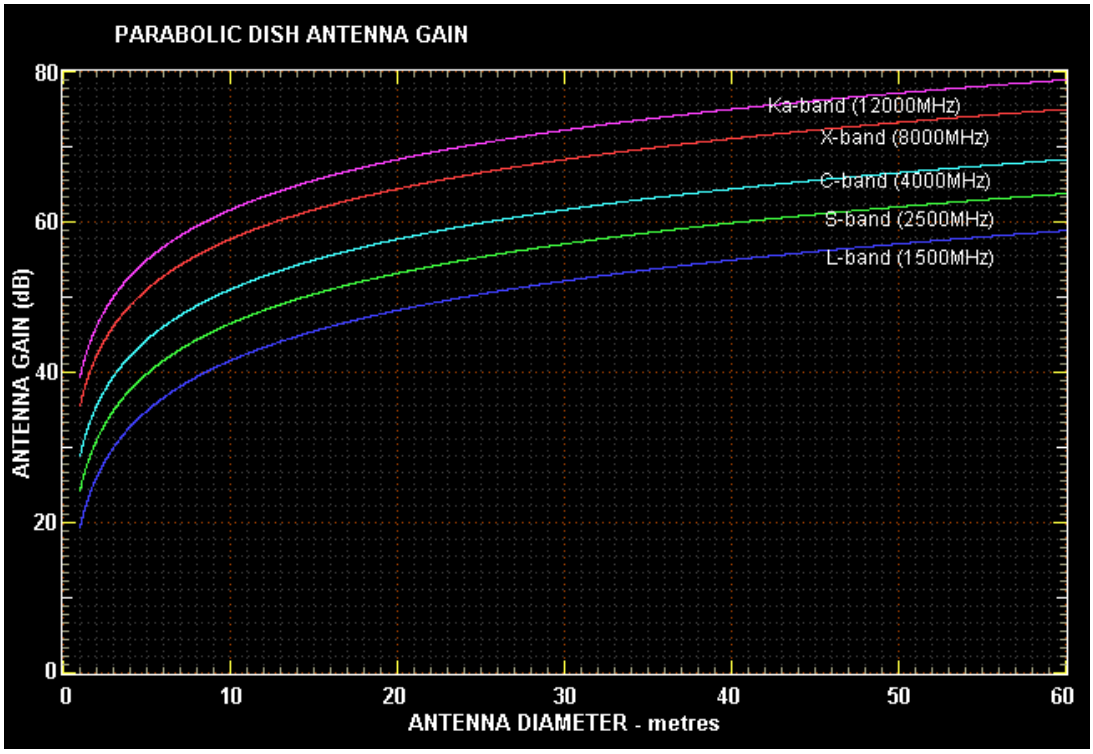


Рис. 3.5 Залежність ширини проміня від діаметра антени

Для деяких з наступних розрахунків нам потрібно враховувати ширину променя антени. Для антени з ефективною лінійною апертурою 'a' ширина променя половини потужності визначається виразом:

$$\theta = \lambda / a \qquad (3.25)$$

де

θ - ширина променя в радіанах;

λ – робоча довжина хвилі в метрах;

a - апертура в метрах

Зверніть увагу, що λ(m) = 300 / частота (МГц)

Для параболічної антени a = D (діаметр антени). Для інших типів антен ми можемо обчислити ефективний діаметр за допомогою рівняння підсилення.

Наступні два графіки показують ширину променя антени як функцію діаметра антени.

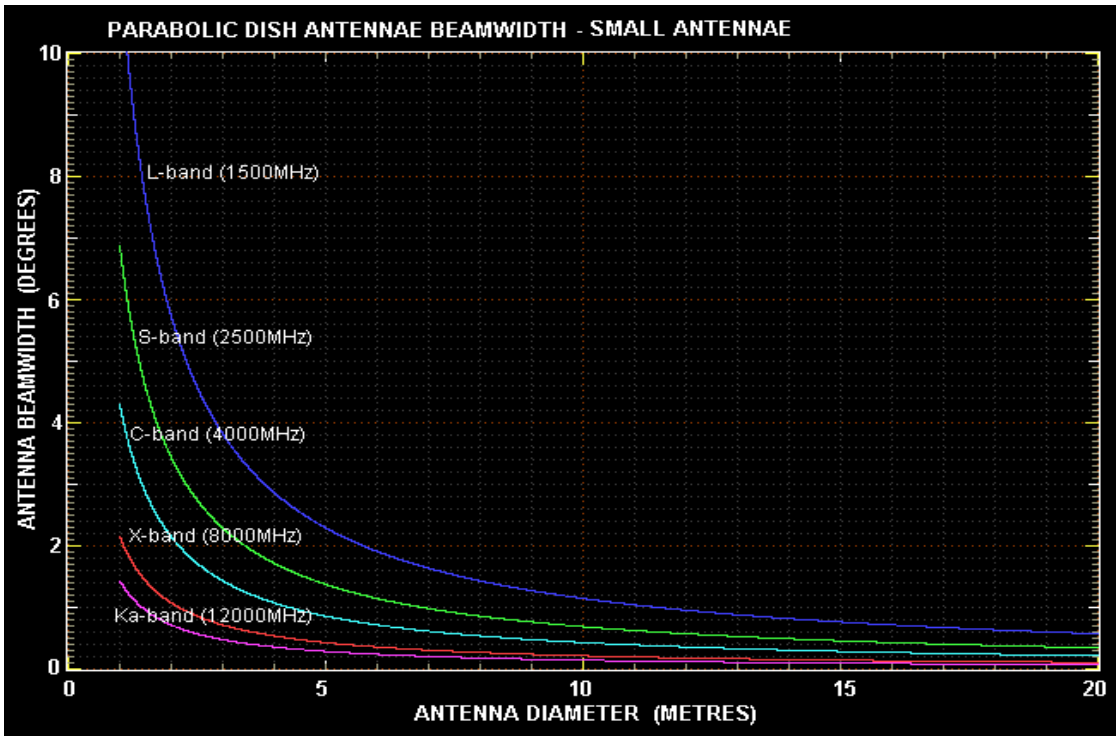


Рис. 3.6 Зміна діаметра антени

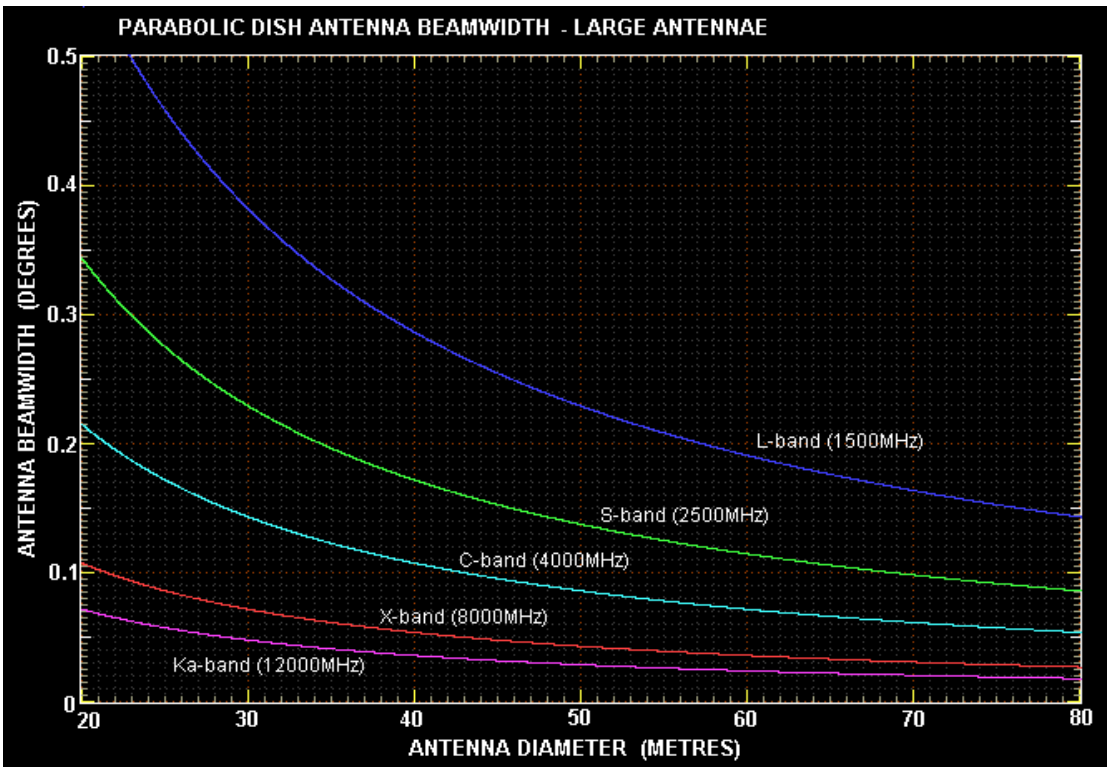


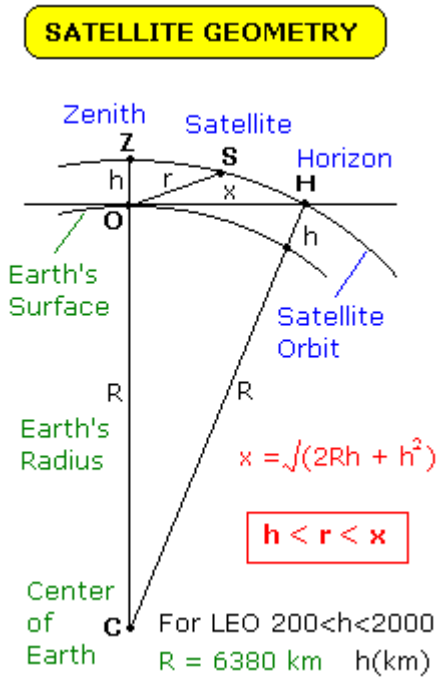
Рис. 3.7 Залежність ширини проміня від діаметра антени

У наступних розділах досліджуються потужності передачі та розміри антени, необхідні для надання заданого SNR на різних відстанях.

На Міжнародній космічній станції (МКС) реалізується радіоаматорський експеримент, який дозволяє школам та радіоаматорам спілкуватися з

астронавтами. МКС обертається навколо Землі на висоті приблизно 400 км, що знаходиться на нижньому кінці діапазону, відомого як низька орбіта Землі (НОЗ). На такій висоті атмосферний опір має значний вплив, і для підтримки стабільної орбіти МКС її необхідно періодично підвищувати, щоб уникнути повернення на Землю. Тому висота орбіти МКС може варіюватися в межах від 350 до 450 км.

Однією з проблем для зв'язку між Землею та НОЗ є швидкість руху супутника, через що відстань до нього змінюється значно — від мінімальної, коли супутник проходить прямо над головою, до максимальної, коли він знаходиться на горизонті, як показано на діаграмі нижче.



Satellite Altitude h (km)	Horizon Distance x (km)
200	1610
300	1980
400	2290
500	2570
600	2830
700	3070
800	3290
900	3510
1000	3710
1100	3900
1200	4090
1300	4280
1400	4450
1500	4620
2000	5430

Рис. 3.8 Вимір затримки сигналу

Таким чином, дальність до МКС може варіюватися від ~400 км для повітряного проходу до майже 2300 км, коли станція знаходиться на горизонті - або при AOS (отримання сигналу) або LOS (втрата сигналу). Оскільки отримана потужність змінюється як квадрат відстані, це призводить до зміни сили сигналу в 33 рази (15 дБ).

Швидка зміна орбіти МКС, коли вона проходить через небо комунікатора, може ускладнити використання недорогого зв'язку, якщо необхідна спрямована антена. Це пояснюється тим, що спрямована антена повинна постійно відстежувати

рух МКС по небосхилу. Однак завдяки використанню низької частоти (145,825 МГц), є можливість застосовувати ручні радіоприймачі з майже всеспрямованими антени типу штрих.

Таким чином, наша задача полягає в розрахунку сигнал-шумового відношення (SNR) для різних відстаней, на яких може відбуватися зв'язок. Ми розглянемо три варіанти потужностей передачі: 1 Вт, 3 Вт і 5 Вт, які є типовими для простих аматорських ручних трансиверів. Ці значення є ефективними випромінюваними потужностями, що можуть бути досягнуті, якщо потужність передачі зменшена вдвічі за рахунок коефіцієнта посилення антени. При цьому ми припускаємо, що між земним комунікатором і МКС є чітка лінія видимості. Результати цих обчислень представлені на графіку нижче:

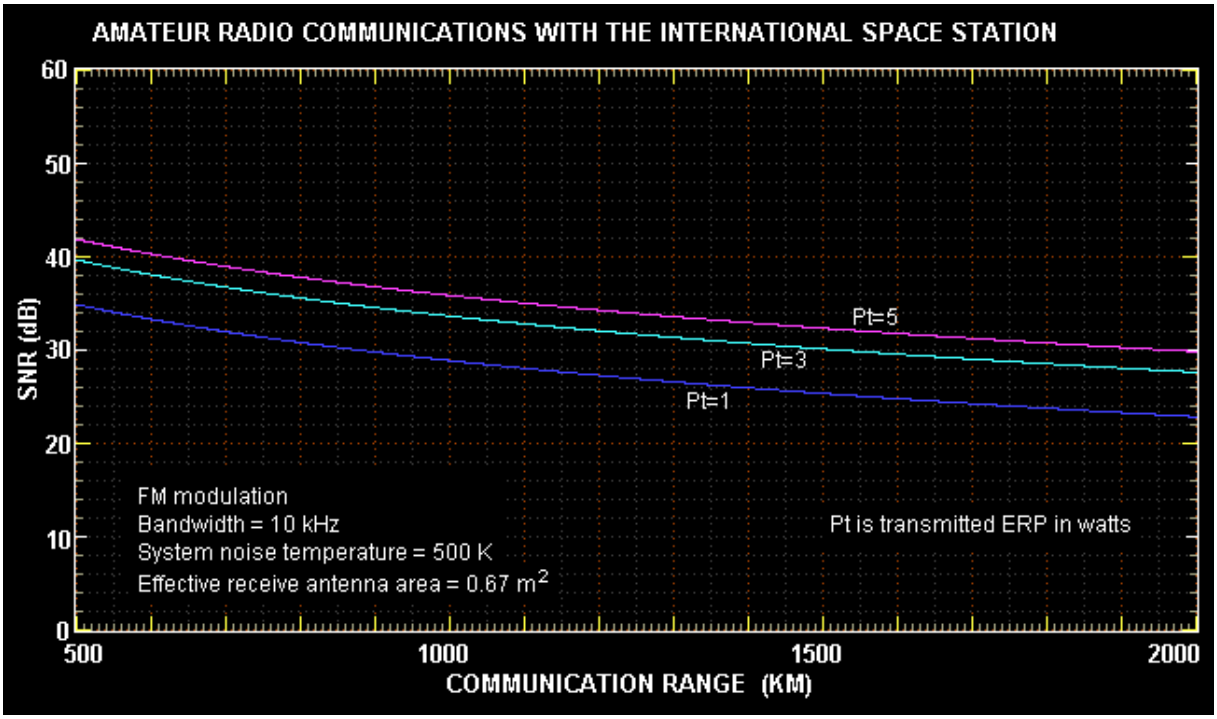


Рис. 3.9 Аматорський радіозв’язок з МКС

Як видно, це призводить до сильного сигналу на весь прохід МКС над наземною станцією. 20 дБ SNR з використанням вузькосмугової FM-модуляції достатньо для забезпечення безшумного зв’язку («повністю тихого»).

Більш типовий супутник на низькій орбіті може знаходитися на висоті близько 800 км. Як видно з наведених вище даних, така орбіта забезпечує діапазон

понад 3000 км під час проходу супутника через зону покриття наземної станції. Розглянемо приклад метеорологічного супутника, що рухається по полярній орбіті на висоті 800 км, який передає зображення з низькою роздільною здатністю на УКХ (137 МГц) та з високою роздільною здатністю на L-діапазоні (1700 МГц). Припустимо, що кожен з передавачів має ефективну потужність 5 Вт. Для приймання цього сигналу нам буде потрібно мати смугу пропускання 70 кГц та шумову температуру системи 300 К.

Для цієї задачі давайте розглянемо сигнал-шумове відношення (SNR) для трьох варіантів підсилення приймальних антен. Перший варіант – це підсилення на 3 дБ, яке зазвичай досягається за допомогою всеспрямованої антени без відстеження супутника. Другий варіант – підсилення на 13 дБ, що є типовим для 10-елементної антени Ягі. І, нарешті, третій варіант – це підсилення на 27 дБ, яке можна досягти за допомогою антени діаметром 1,5 м в L-діапазоні. Для досягнення подібного підсилення в УКХ-діапазоні знадобиться набагато більша антена або величезна кількість антен, що працюють разом.

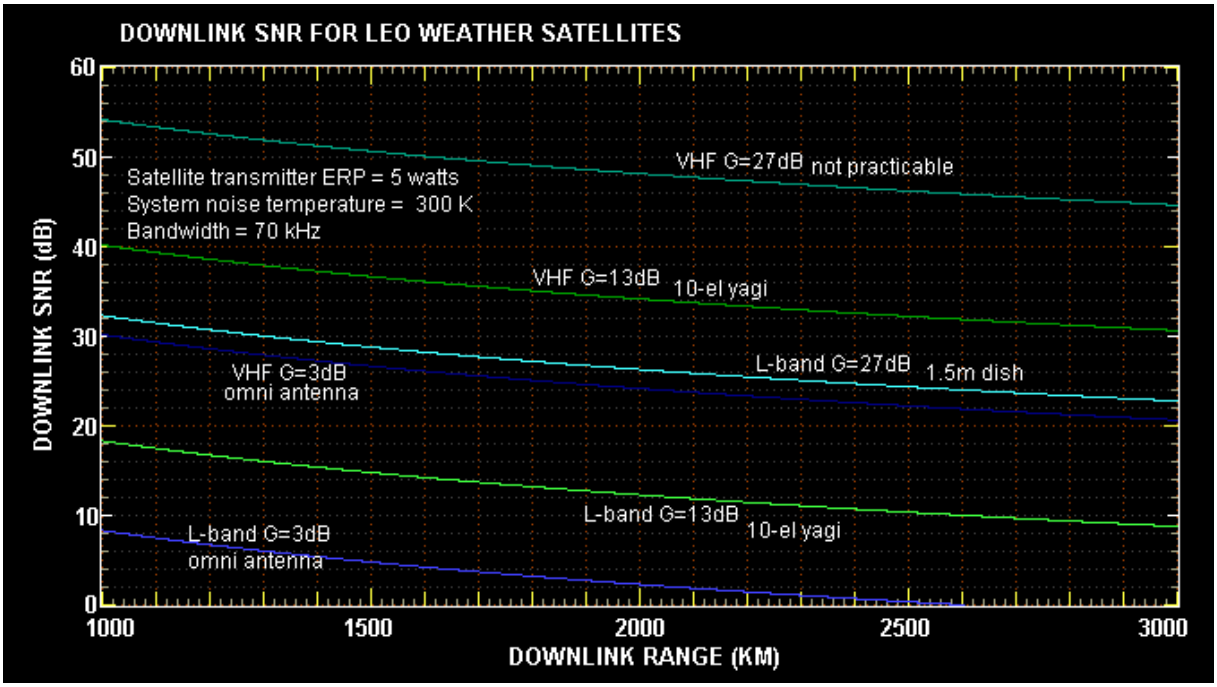


Рис. 3.10 ССШ на НОЗ

Ми одразу помічаємо, що антена без відстеження може працювати на частотах УКХ, але для L-діапазону це вже не підходить. Для отримання якісного

сигналу в L-діапазоні нам дійсно необхідно підсилення на 27 дБ, що забезпечується антеною діаметром 1,5 м. Це означає, що для роботи в L-діапазоні та вище потрібна антена з системою відстеження, що вимагає додаткового обладнання та пов'язаних з ним витрат.

На практиці ситуація в L-діапазоні ще складніша, ніж це виглядає на графіку вище, оскільки для передачі зображень з високою роздільною здатністю необхідна значно ширша смуга пропускання, ніж 70 кГц, що знижує SNR. Щоб компенсувати це, супутниковий передавач у L-діапазоні випромінює значно більшу потужність, ніж у УКХ-діапазоні. Окрім цього, допомагає те, що космічний шум, який встановлює рівень шуму нашої системи на УКХ, значно зменшується з ростом частоти, що дозволяє використовувати низьку системну шумову температуру в L-діапазоні.

Геосинхронні супутники обертаються на висоті 36 000 км, що є дуже великою відстанню. Це означає, що для зв'язку з геосупутником завжди потрібна спрямована антена. Однак така висота має певні переваги. По-перше, радіус орбіти супутника в 6,6 разів більший за радіус Землі, тому зміна діапазону сигналу, коли супутник рухається від зеніту до горизонту, становить лише близько 17%. Це дозволяє в наших розрахунках використовувати середню відстань в 38 000 км для визначення параметрів зв’язку. По-друге, геосинхронні супутники мають ту перевагу, що вони залишаються відносно на одному місці в небі протягом тривалого часу, тому не потрібно постійно їх відстежувати. Це дає змогу використовувати фіксовані антени, що робить можливим пряме мовлення для домашнього телевізійного прийому за низькою ціною, оскільки антена може бути закріплена в одному положенні.[37]

Пропускна здатність геосинхронних супутників може значно відрізнятися, залежно від типу передачі. Наприклад, для маяків пропускна здатність може бути дуже вузькою, тоді як для телевізійних передач вона може досягати 36 МГц. Потужність сигналу також варіюється і може бути від кількох ват до сотень ват.

Для кращого розуміння ми розглянемо, як змінюється співвідношення сигнал/шум (SNR) в залежності від потужності передачі (ERP) і пропускної

здатності, приймаючи при цьому низьку шумову температуру системи прийому, яка складає 50 К.

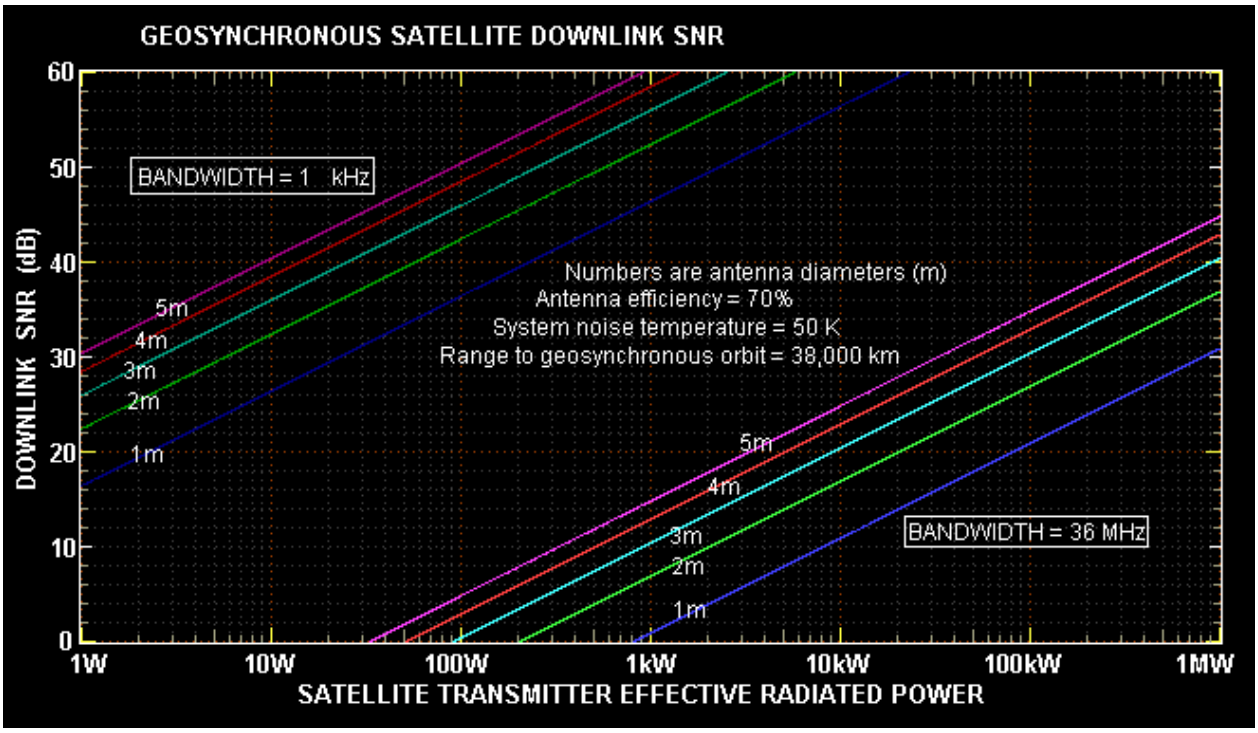


Рис. 3.11 Геосинхронний супутник НЛЗ

Зв'язок із Місяцем спрощується завдяки тому, що відстань між Землею і Місяцем залишається майже постійною, незалежно від його позиції на небі. Це означає, що сигнал, який передається з Місяця, можна легко обробляти з Землі. У наступному прикладі ми розглянемо, як визначити розмір наземної антени, яку потрібно використовувати для отримання даних від наукового пакета, залишеного на поверхні Місяця, разом із передавачем потужністю один ват і ненаправленою антеною.

Хоча Земля завжди виглядає з Місяця в одній і тій самій точці на небі, і антена з високим коефіцієнтом посилення, орієнтована на Землю, не потребує постійного відстеження, вона повинна бути налаштована в правильному напрямку для передачі сигналу. Це не становить особливих труднощів для високоточних «приземних» антен, але для більш простих конструкцій може виникнути проблема, оскільки розмір пакета, що передає сигнал, може бути обмежений, а вимоги до точності орієнтації антени зростають. Такий фактор може вплинути на

конструкцію і вагу простих апаратів, що ускладнить їх запуск і використання в практичних умовах.

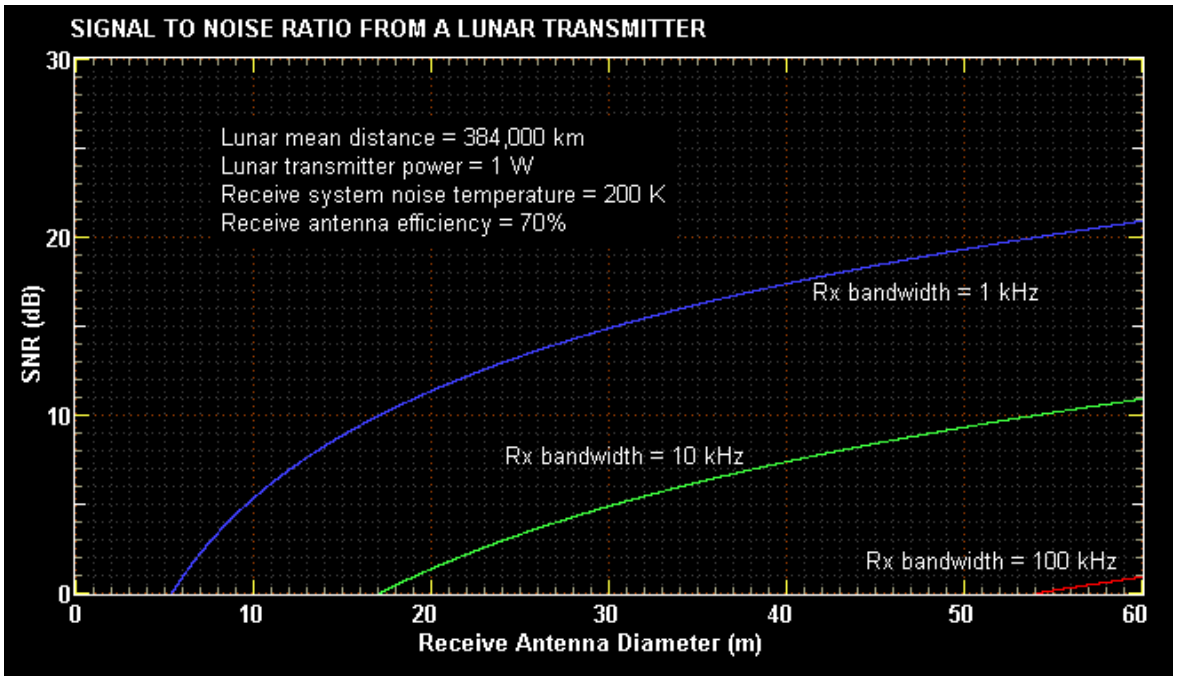


Рис. 3.12 ВСШ від місячного передавача

Ми бачимо, що навіть для низької швидкості передачі даних (пропускна здатність 1 кГц) нам потрібна принаймні 15-метрова антена, щоб отримати прийнятний SNR (10 дБ). Телебачення реального часу (з необхідною пропускною здатністю понад 100 кГц) просто неможливе в цій ситуації, навіть з дуже великою антеною.

Геліоцентрична орбіта — це орбіта, що рухається навколо Сонця. Кожен космічний зонд, який відправляється для дослідження інших планет, спочатку повинен бути виведений на геліоцентричну орбіту перенесення, а потім переведений на планетоценичну орбіту. Зв'язок з космічним кораблем на будь-якій геліоцентричній орбіті вимагає набагато більших відстаней, ніж на орбітах, що обертаються навколо Землі, що значно ускладнює комунікацію.

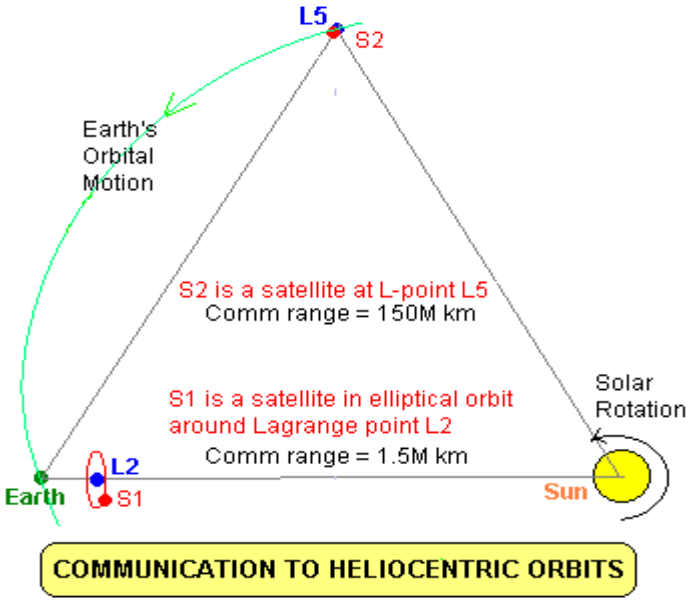


Рис. 3.13 Точки Лангража

Навколо будь-яких двох небесних систем, таких як Земля-Сонце, існують особливі точки, де гравітаційне поле двох тіл взаємно компенсується. Точки Лагранжа Землі мають велике значення для розташування супутників. Наприклад, точка L2 дозволяє спостерігати за Сонцем без перешкод, а також дає можливість здійснювати раннє виявлення сонячної космічної погоди, перш ніж вона досягне Землі (наприклад, поштовхи сонячного вітру та корональні викиди маси). Точка L5 корисна тим, що вона дозволяє спостерігати «позаду» Сонця, що дозволяє попереджати про великі активні області та сонячні плями ще до того, як вони потраплять в зону видимості Землі.

Зв'язок з L5 та з нього зазвичай не становить значних труднощів, за винятком великих відстаней. Однак отримання даних з точки L2 є серйозною проблемою. Якщо антена спрямована на L2, вона автоматично спрямована на Сонце, і дуже висока температура Сонця (яка може досягати мільйона Кельвінів на УКХ-частотах) створює великий шум в системі прийому. Це означає, що навіть якщо ваш підсилювач має низький рівень шуму 50 К, висока температура Сонця, що досягає 50 000 К, значно знижує ефективність прийому сигналу.

З цієї причини жоден супутник не може бути розміщений безпосередньо в точці L2. Натомість супутник розташовують на еліптичній орбіті з радіусом

близько 100 000 км навколо точки L2. Площина цієї орбіти перпендикулярна до лінії, що з'єднує Землю та Сонце. Це означає, що антена на Землі не потребує постійного спрямовування на Сонце. З геометричних розрахунків можна визначити, що супутник буде знаходитися на відстані приблизно 100 000/1 500 000 радіан від Сонця, що становить трохи менше ніж 4 градуси. Враховуючи це, антена повинна мати променеву ширину не більше ніж 1 градус, щоб уникнути потужного теплового випромінювання сонячної корони, яка розташована на значній відстані від видимої поверхні Сонця. З наведеної таблиці видно, що для роботи в S-діапазоні буде потрібно антена довжиною від 7 до 8 метрів, щоб досягти необхідної точності.

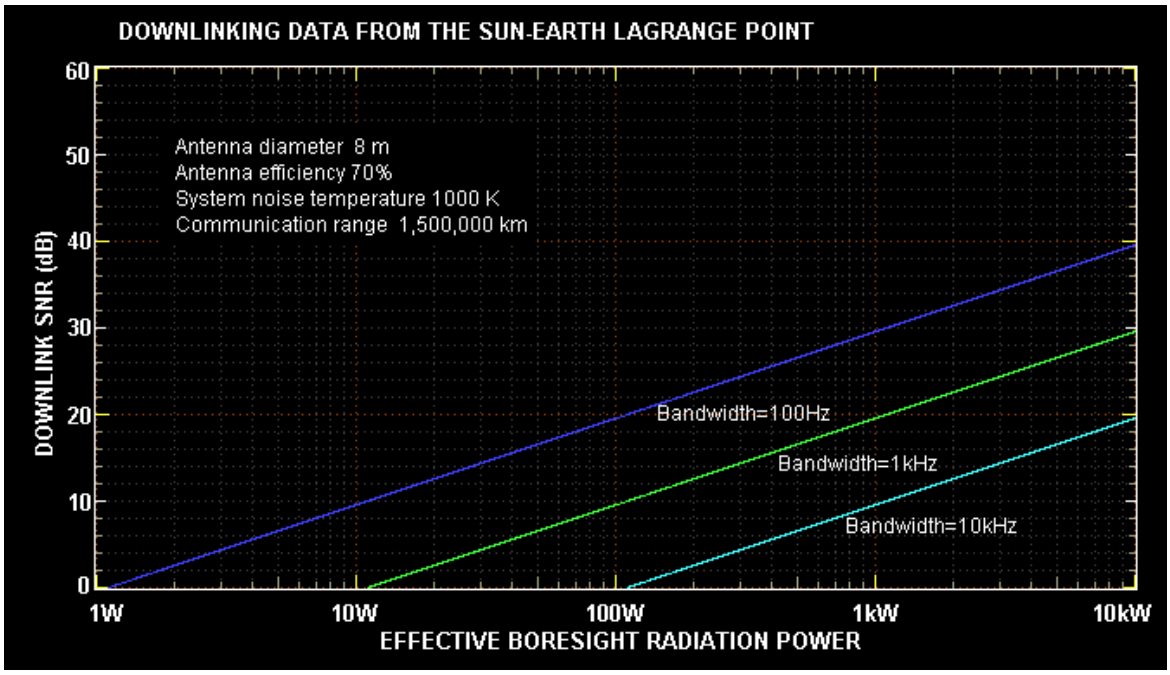


Рис. 3.14 Низхідні дані від точки Лангража Сонце-Земля

Для зв'язку на L5 та міжпланетних відстанях лише найбільші антени можуть забезпечити прийнятне співвідношення сигнал/шум. Оскільки фон неба досить холодний, можна використовувати підсилювачі з дуже низьким рівнем шуму, щоб забезпечити дуже низьку температуру шуму системи.

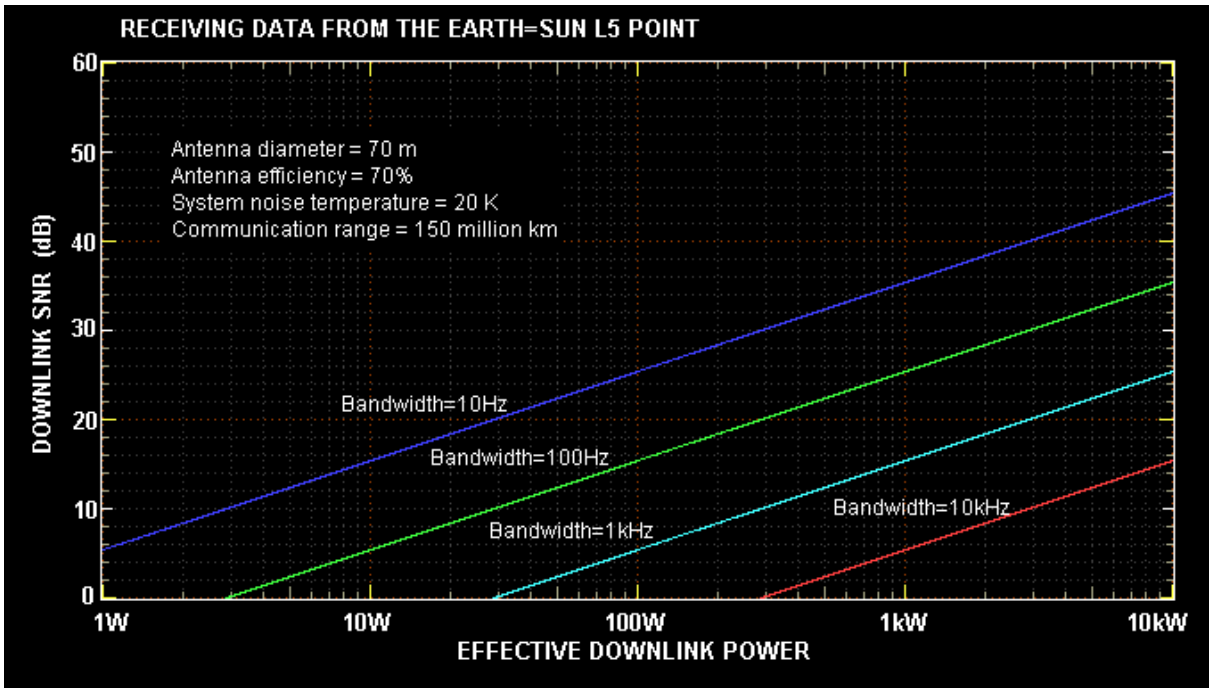


Рис. 3.15 Низхідні дані від точки Земля-Сонце L5

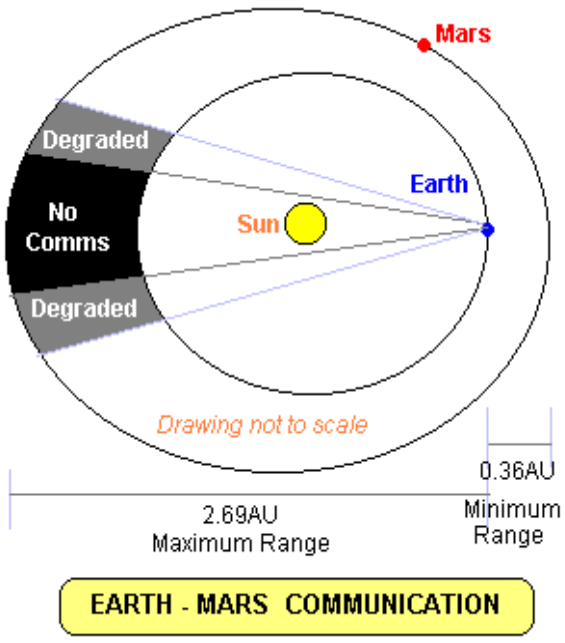


Рис. 3.16 Схема положення планет

Проблема зв'язку з планетами полягає в їх великій відстані від Землі, яка варіюється в залежності від орбітального руху планет навколо Сонця. Оскільки Земля і планети рухаються з різними швидкостями, їх відстань від Сонця змінюється, а отже і їх відстань одна від одної. Планети можуть наближатися до Сонця або віддалятися від нього, що робить зв'язок тимчасово неможливим.

Відстані між Землею та планетами вимірюються в астрономічних одиницях (АО), де 1 АО дорівнює приблизно 150 мільйонам км.

Земля рухається навколо Сонця в межах від 0,98 АО (на перигелії) до 1,02 АО (на афелії), а Марс має орбіту з перигелієм 1,38 АО і афелієм 1,67 АО. Оскільки орбіта Марса більш ексцентрична, ніж у Землі, мінімальна відстань між планетами становить 0,36 АО, а максимальна — 2,69 АО. Враховуючи ці зміни орбіт, зв'язок з планетами можливий лише в діапазоні від 0,5 до 2,5 АО, що є зміною в п'ять разів і призводить до зниження сигнал/шум на 14 дБ.

Що стосується зв'язку на точці L5, для забезпечення достатнього співвідношення сигнал/шум (SNR) для передачі цифрових даних з розумною швидкістю, будуть необхідні великі антени та підсилювачі з дуже низьким рівнем шуму. На висхідній лінії зв'язку, де космічний корабель має доступ до більшої потужності передавача, доступного з Землі, SNR завжди буде значно кращим, що дозволяє ефективно передавати дані на великі відстані.

ВИСНОВКИ

Виконана робота є ґрунтовним дослідженням, присвяченим ключовим аспектам супутникового зв’язку. У роботі визначено основні принципи побудови супутникових систем зв’язку, проаналізовано їхні енергетичні параметри та розглянуто методи вдосконалення цих параметрів. Важливим є висвітлення особливостей поширення радіохвиль у космічному просторі, зокрема впливу атмосфери та магнітного поля Землі.

У роботі досліджено різні частотні діапазони, які використовуються у супутниковому зв’язку, та показав, як вибір частоти впливає на стабільність та якість сигналу. Окрему увагу приділено принципам організації багатостанційного доступу, що включає частотний, часовий та кодовий поділи. Це дозволило розкрити потенціал ефективного використання супутникових каналів для передачі великого обсягу даних.

Методи покращення енергетичних параметрів включають вдосконалення конструкцій антен, зменшення втрат сигналу під час дощу, використання більш ефективних технологій модуляції та впровадження систем багатопроменевих антен. Запропоновані рішення спрямовані на оптимізацію енергоспоживання та збільшення пропускної здатності каналів.

Значним внеском є розрахунок енергетичних параметрів супутникових трас, що дозволяє забезпечити стабільний зв’язок навіть у складних умовах. У роботі також проаналізовано ефект Доплера та заходи його компенсації в системах з рухомими супутниками.

Загалом, робота відзначається високим рівнем аналізу та практичною значущістю, пропонуючи комплексні рішення для покращення енергетичних параметрів супутникових систем зв’язку. Висновки й рекомендації можуть бути використані для подальших наукових досліджень і вдосконалення сучасних супутникових технологій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ліпатов А.О., Могильченко М.О., Коломицев М.О. Основи супутникових телекомунікаційних систем: навчальний посібник. К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2004. 220 с.

2. Кеннет М. Петерсон. Супутниковий зв’язок. Енциклопедія фізичної науки та техніки. Третє видання. 2003.

3. Шолудько В.Г., Єсаулов М.Ю., Вакуленко О.В., Гурський Т.Г., Фомін М.М. Організація військового зв’язку: навчальний посібник. К.: ВІТІ, 2017. 280 с.

4. Starlink [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Starlink

5. Quantum Science Experiments with Micius Satellite / J. Yin et al. CLEO: Applications and Technology, San Jose, California. Washington, D.C., 2019. URL: https://doi.org/10.1364/cleo_at.2019.jtu3g.4

6. Angelopoulos V. The ARTEMIS Mission. The ARTEMIS Mission. New York, NY, 2010. P. 3–25. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9554-3_2

7. Astrain S. GROWTH OF THE INTELSAT SYSTEM. Communications Satellite Symposium. 1978. P. 1–8.

8. Gavaghan H. Syncom. Something New Under the Sun. New York, NY, 1998. P. 211–221.

9. АНТИПЕНКО, Р. В.; ПЕРШИН, М. О. Оптимізація радіолінії супутникового зв'язку. 2016

10. БеркманЛ. Н., Стеклов В. К., Кільчицький Є. В. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв’язку. Київ: Техніка, 2004. 576 с

11. Бойко Ю.М. Аналіз цифрових методів модуляції/демодуляції в системах зв’язку та передачі інформації /Ю.М. Бойко Ю.М., Н.М. Сворінь // Вісник Хмельницького національного університету. –2011. –№1. –С. 103-110.

12. Chen H.-H. Next generation CDMA technologies. Hoboken, NJ : John Wiley, 2007.

13. Pan H., Liew S. C. Information Update: TDMA or FDMA?. IEEE Wireless Communications Letters. 2020. Vol. 9, no. 6. P. 856–860.

14. Розробка та дослідження системи супутникового радіозв'язку стандарту Iridium [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uchika.in.ua/rozrobka-ta-doslidjennya-sistemi-suputnikovogo-radiozvyazkust.html?page=3. 15.04.2022.

15. Системи радіозв'язку : навч. посіб. / О. О. Зеленський, В. Ф. Солодовник, В. Д. Карлов, Є. О. Мількевич. – Харків: ХУПС, 2007. – 250 с

16. Iridium NEXT - eoPortal. Earth Observation Missions - eoPortal. URL: https://www.eoportal.org/satellite-missions/iridium-next#mission-capabilities

17. КирпачЛ. А., Власенко Г. М., Срібна І. М. Методи оцінювання критеріїв ефективності супутникових систем // Зв'язок. 2018. № 4.

18. Сучасні супутникові системи зв'язку [Електронний ресурс]. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50386/1/Suchasni_suputnykovi_systemy_zviazku.pdf

19. ФроловВ. Ф., Кирпач Л. А., Ільїн О. Ю. Використання узагальнених критеріїв при проектуванні супутникових систем // Зв'язок. 2018. № 1. С. 9–11.

20. Бойко, Ю.М. Розрахунок затухання на радіотрасі передачі інформації супутник метор-земля [Текст] / Ю. М. Бойко, В. В. Мішан // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – №2. – С. 94-99.

21. Шульга О., Сокіріна В. Вимірювання завадостійкості супутникових радіонавігаційних систем методом теорії ігор в умовах невизначних завад // Measuring And Computing Devices In Technological Processes. № 4. С. 142–148. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-20.

22. 15. Горбатий І.В. Системи дистанційного зондування Землі з космосу: монографія / І.В. Горбатий. –Львов: СПОЛОМ, 2011. –612 с.

23. Шишацький А. В., Башкиров О. М., Костина О. М. Розвиток інтегрованих систем зв’язку та передачі даних для потреб Збройних Сил. Науково-технічний журнал “Озброєння та військова техніка”. 2015. № 1(5). С. 35–40.

24. В. В. Абрамова, С. К. Абрамов, О. С. Рубель. Радіорелейні та супутникові системи зв’язку [Текст] : навч. посіб. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2018. – 116 с.

25. Міночкін Д. А. Теоретичні основи побудови ефективних систем супутникового зв"язку. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2015. Вип. № 49. С. 191–194.

26. Низькоорбітальні системи супутникового зв'язку [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://kunegin.com/ref1/sput/loworb.htm

27. Модель системи супутникового зв’язку та передачі даних спеціального призначення / В. Руденко та ін. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2024. Т. 49, № 1. С. 45–58.

28. Джеффрі Гайд, П’єр Л. Барджелліні. Довідкові дані для інженерів. Дев’яте видання. 2002.

29. Раджат Ачарья. Порушення тропосфери: вимірювання та пом’якшення. Поширення супутникового сигналу, погіршення та пом’якшення. 2017.

30. Кеннет М. Петерсон. Супутниковий зв’язок. Енциклопедія фізичної науки та техніки. Третє видання. 2003.

31. Арун К. Маджумдар. Основи оптичних комунікаційних систем у вільному просторі, оптичні канали, характеристики та технології мережі. 2019.

32. Уолтер Січіора, Майкл Адамс. Прийом сигналу. Сучасна технологія кабельного телебачення. Друге видання. 2004.

33. Проценко М. Б., Рожновська І. Ю. Розрахунок та аналіз супутникового каналу зв’язку. Одеська національна академія зв’язку.

34. Гнатушенко В. В., Дробахін О. О., Корчинський В. М. Системи супутникового та стільникового зв’язку [Текст]: навчальний посібник. Дніпро: РВВ ДНУ, 2012. 80 с

35. N. H. Crisp et al. Launch and deployment of distributed small satellite systems. − Acta Astronautica, vol. 114, pp. 65-78, 2015.

36. L. A. Belov et al., “Devices for Signal Generation and Processing,” in Handbook of RF, Microwave, and Millimeter-wave Components, Boston, MA and London, UK, Artech House, 2012, pp. 1-40

37. Satellite. The Communications Handbook. 2002. URL: https://doi.org/10.1201/9781420041163-61

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

магістерська кваліфікаційна робота на тему:

“МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ ТА МЕТОДИ ЇХ ПОКРАЩЕННЯ”

Виконав: студент гр. АРДМ-61
Шендерчук В.В.
Керівник: PhD, доцент Блаженний Н.В.

Київ 2024

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ

- **Об’єкт дослідження** - супутникові системи зв’язку.
- **Предмет дослідження** - енергетичні параметри супутникових систем зв’язку.
- **Мета роботи** - дослідження та аналіз методик підвищення енергетичних параметрів супутникових систем зв’язку.

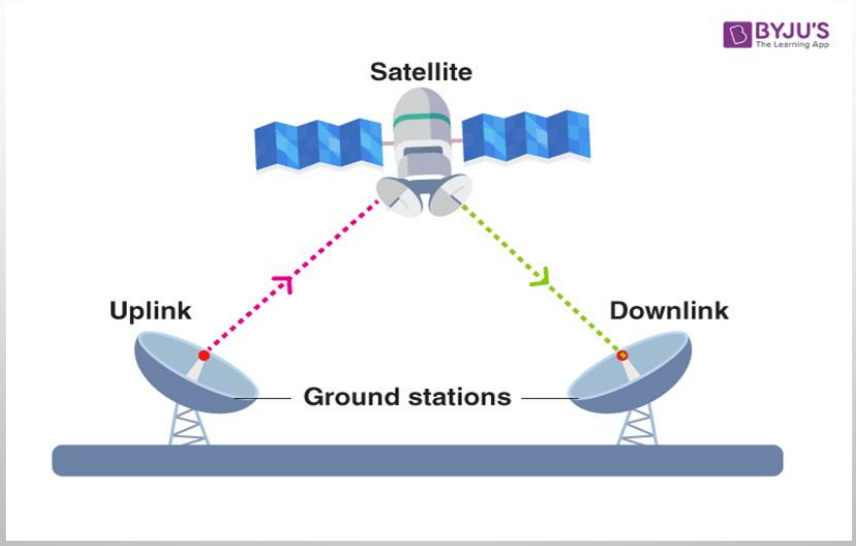
ЗАВДАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ :

- Супутникові систем зв’язку
- Дослідження умов та залежностей пропускної здатності супутникового каналу зв'язку для курсуючих в космосі ШСЗ
- Розрахунки та методи покращення супутникового зв’язку





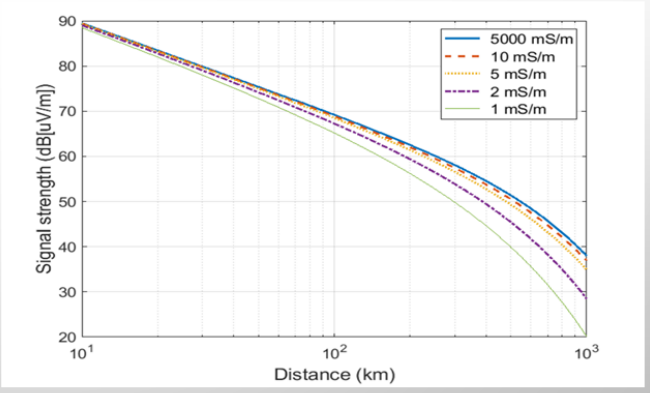
ОСНОВИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ



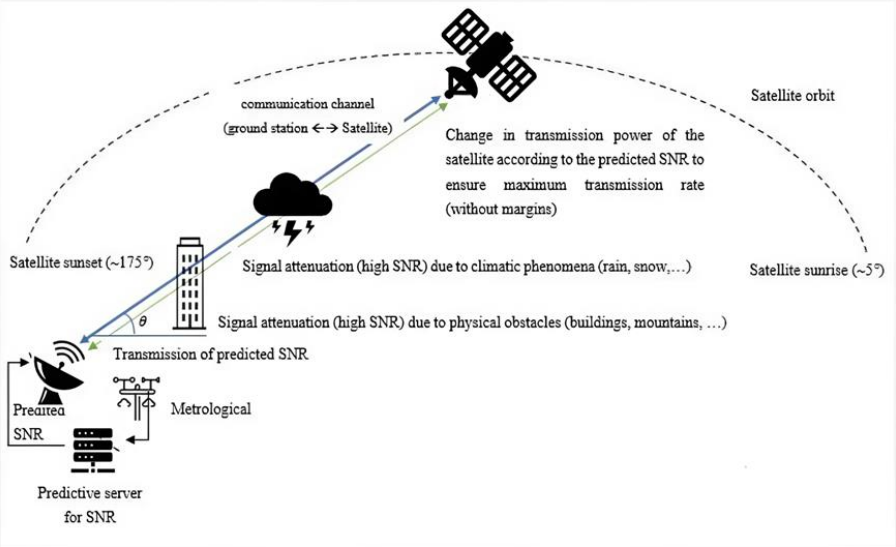
ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ СУПУТНИКОВИХ ТРАС

Основні енергетичні параметри:

- Потужність передавача.
- Коефіцієнт посилення антени (G/T).
- Шумова температура.
- Втрати сигналу (атмосферні впливи, поглинання).



ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА СИГНАЛ



МЕТОДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ КАНАЛІВ

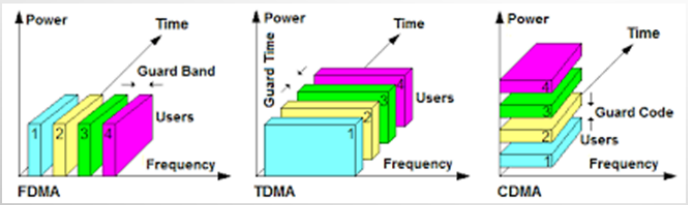
- Мультиплексування
- Покращення конструкції антен
- Різні методи модуляції

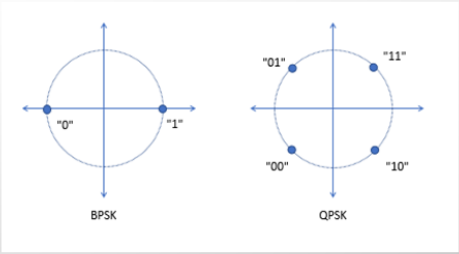


МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ ТА МОДУЛЯЦІЯ

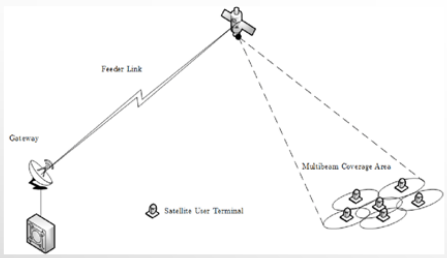
МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ: FDMA, TDMA, CDMA, SDM

МОДУЛЯЦІЯ: BPSK,QPSK,8PSK,16QAM, 64QAM





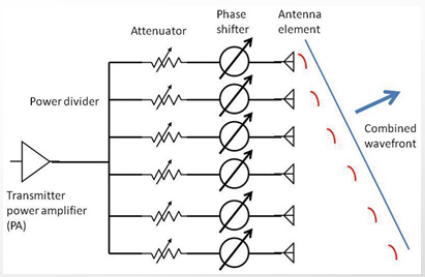
ПОКРАЩЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ АНТЕН



Багатопроменева антенна



Антена з високим коефіцієнтом посилення



Фазовані антенні решітки

ВИСНОВОК

РОБОТА Є ҐРУНТОВНИМ ДОСЛІДЖЕННЯМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ, ЯКЕ ОХОПЛЮЄ ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ, АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МЕТОДИ ЇХ ВДОСКОНАЛЕННЯ. ВИВЧЕНО ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У КОСМІЧНОМУ ПРОСТОРІ, ВПЛИВ АТМОСФЕРИ ТА МАГНІТНОГО ПОЛЯ, А ТАКОЖ РОЛЬ РІЗНИХ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ І СТАБІЛЬНІСТЬ СИГНАЛУ. ОСОБЛИВУ УВАГУ ПРИДІЛЕНО ПРИНЦИПАМ БАГАТОСТАНЦІЙНОГО ДОСТУПУ (ЧАСТОТНОГО, ЧАСОВОГО ТА КОДОВОГО ПОДІЛІВ) ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ.

МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВКЛЮЧАЮТЬ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ АНТЕН, ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МОДУЛЯЦІЇ, АДАПТИВНИЙ ПІДБІР ТИПУ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ БАГАТОПРОМЕНЕВИХ АНТЕН.

ЗАПРОПОНОВАНІ РІШЕННЯ СПРЯМОВАНІ НА ОПТИМІЗАЦІЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛІВ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ, ЩО РОБИТЬ ЦЮ РОБОТУ ВАЖЛИВИМ ВНЕСКОМ У РОЗВИТОК СУЧАСНИХ СУПУТНИКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.

Доповідь закінчив

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Владислав Шендерчук

Назва: Метод дослідження енергетичних параметрів систем супутникового зв’язку та методи їх покращення

Координатор: Назарій Блаженний

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:40.9

Коефіцієнт подібності 2:28.7

Тривога: 81

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*