

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“ МЕТОДИКА ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи РТДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Антонов І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Заїка В.Ф.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Лаврінець К.Г.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Лаврінець К.Г.

(прізвище та ініціали)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних систем

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
«Мобільних та відеоінформаційних систем»
Н.В. Руденко

« » _____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Антонову Іллі Володимировичу

1. Тема роботи: “Методика покращення енергетичних параметрів систем супутникового зв’язку”,
керівник роботи Заїка Віктор Федорович, завідувач кафедри,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 11.10.2021 № 170

2. Строк подання студентом роботи _____ 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Енергетичні системи супутникового
2. 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. Графічна частина роботи представлена на 9 слайдах презентації.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	11.10	виконано
2.	Дослідження видів супутникових систем зв'язку.	15.10	виконано
3.	Розбір, дослідження та опис характеристик супутникових систем зв'язку.	05.11	виконано
4.	Аналіз та дослідження методів підвищення сигналу на трасі ШС-Земля.	01.12	виконано
5.	Висновки, вступ, реферат	02.12	виконано
6.	Розробка презентації	05.12	виконано

Студент

(підпис)

Антонов І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Заїка В.Ф.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 83 стор., 28 рис., 15 джерел.

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.

Методи дослідження – аналітичний, теорії теоретичної радіотехніки, технології побудови супутникових систем зв'язку.

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто супутникові системи зв'язку, їх види, будову, особливості та характеристики. Наведено структуру навігаційних повідомлень, аналіз методів підвищення точності місцезоташування за допомогою фільтрації навігаційних даних.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОСИЛАНЬ	6
ВСТУП.....	7
1 СУПУТНИКОВІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ	8
1.1 Поняття про супутниковий зв'язок	8
1.2 Особливості передачі та обробки сигналів у супутникових системах зв'язку.	15
1.3 Реалізація багатостанційного доступу	17
1.4 Постановка завдання на дослідження загальних залежностей розрахунку енергетичних параметрів системи супутникового зв'язку та обґрунтування методів їх покращання.	22
2 ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ТА ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СУПУТНИКОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КУРСЮЮЧИХ В КОСМОСІ ШСЗ	24
2.1 Розрахунок енергетичних характеристик супутникових радіо трас.	24
2.2. Умови розповсюдження радіохвиль у космічному просторі.	31
2.3 Визначення впливу магнітного поля землі на енергетичні параметри систем супутникового зв'язку.	34
3 РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ СУПУТНИКОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ...	49
3.1 Особливості розрахунку супутникових систем передачі інформації.....	49
3.2 Розрахунок параметрів наведення антен земних станцій супутникових систем зв'язку.....	50
3.3 Аналіз геометричних та електродинамічних параметрів антен систем супутникового зв'язку.	52
3.4 Енергетичний розрахунок супутникового каналу зв'язку.	54
3.5 Методи покращання енергетичних параметрів систем супутникового зв'язку та обґрунтування їх. Мультиплексування.....	56
3.6 РОЗРАХУНКИ КОСМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ	60
3.7 Супутникове шифрування	77
Служба супутникового шифрування (ССШ).....	77
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 – співвідношення сишналу/шуму
- АО – астрономічна одиниця
- УФ – ультрафіолет
- РО – рухомий об'єкт

ВСТУП

Світові ІТ-тенденції змінюють традиційні схеми співпраці та управління. Зростає попит на телекомунікації, де ви повинні бути підключені та мати доступ до даних у будь-який час і в будь-якому місці.

Наземні лінії зв'язку технологічно не можуть забезпечити такий доступ. Для цього потрібна велика кількість наземних ретрансляторів, а зв'язок через море та океан або у важкодоступних місцях (пустеля, гори, ліси) в принципі неможливий. Тому системи супутникового зв'язку часто є єдиним можливим рішенням у забезпеченні зв'язку між віддаленими людьми, об'єктами та регіонами. Також системи супутникового зв'язку використовуються там, де високошвидкісна передача даних вимагає надійності та відмовостійкості.

Супутниковий зв'язок складається з двох основних компонентів: наземний сегмент, який складається з фіксованої або мобільної передачі, прийому та допоміжного обладнання, і космічний сегмент, який насамперед є самим супутником. Типовий супутниковий зв'язок передбачає передачу або висхідний сигнал від земної станції до супутника. Потім супутник приймає і посилює сигнал і повторно передає його назад на Землю, де він приймається і підсилюється земними станціями і терміналами. Супутникові приймачі на землі включають супутникове обладнання прямо до дому, обладнання для мобільного прийому в літаках, супутникові телефони та портативні пристрої.

Основними користувачами супутникових послуг є корпорації з великою кількістю філій, державні промислові підприємства газової та нафтової галузей, авіаційної та залізничної логістики, війська, поліція, медицина, приватні клієнти.

У даній роботі буде розглянуто систему передачі інформації та методи вдосконалення енергетичних параметрів систем супутникового зв'язку.

1 СУПУТНИКОВІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Поняття про супутниковий зв'язок

1.1.1 Що таке супутник зв'язку?

Супутник зв'язку дозволяє двом або більше користувачам з відповідним обладнанням доставляти або обмінюватися інформацією різними способами. Він також обходить потребу в кабелях і використовує різні довжини хвилі електромагнітного спектру в мікрохвильовому діапазоні (від 1 метра до 1 міліметра) для передачі інформації.

Важливо зазначити, що супутник зв'язку може передавати кілька сигналів одночасно, використовуючи той самий або окремий транспондер для кожної лінії зв'язку. Відповідач є підсистемою супутника зв'язку, відповідального за транс для синхронного сигналу, в той же час діючи як авторизований обміркувати.

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 – відноситься до сигналу, що передається від наземної (земної) станції на супутник.

Нисхідна лінія зв'язку – це сигнал, що передається від супутника до наземної станції.

Ці сигнали висхідної та низхідної лінії зв'язку складаються з чогось, що називається модульованими несучими. Носій — це мікрохвилі певної довжини, які використовуються для передачі даних назад на Землю. Чому мікрохвильові печі?

Найкращий спосіб надіслати повідомлення на великі відстані – це

використовувати електромагнітні хвилі, які рухаються з максимально швидкою швидкістю – швидкістю світла. Супутники зв'язку використовують мікрохвильовий діапазон світлового спектру для передачі даних, оскільки вони можуть легко проходити крізь атмосферу, яка в іншому випадку змінює або блокує цілком певні довжини хвиль.

Для складних повідомлень, таких як голос або відео, необхідно мати іншу хвилю, яка охоплює наше повідомлення, яка заважає несучій хвилі в передбачуваних шаблонах, дозволяючи нам змінювати її форму. Цей процес називається модуляцією. Для більш детального пояснення того, як працює модуляція, ви можете переглянути нашу статтю на цю тему. Якщо ви хочете піти трохи глибше та вивчити більше інформації, пов'язаної з роботою цих супутників, ви також можете ознайомитися з нашою статтею про роботу супутників.

1.1.3 Частоти

Для супутникового зв'язку використовуються різні частоти залежно від потреб. Зазвичай використовуються наступні діапазони:

L-діапазон (1-2 ГГц). Завдяки своїй низькій частоті та великій довжині хвилі цей діапазон підходить для передачі сигналу в погану погоду і вимагає помірно малих прийомних антен. Він призначений для мовлення супутників у деяких азійських країнах, але, як правило, він краще підходить для GNSS (Глобальна навігаційна супутникова система) і метеорологічних супутникових передач.

Діапазон С (4 – 8 ГГц). Цей діапазон був першим, виділеним для комерційних телекомунікацій через супутники. В основному він використовується в мережах супутникового телебачення, оскільки сигнал добре працює в погану погоду і рідко буває повністю ослабленим. Діапазон С використовується в низхідних лініях зв'язку FSS (фіксована супутникова служба) і BSS (трансляційна супутникова служба), які більш детально розглядаються нижче.

Ku-діапазон (12-18 ГГц). Цей діапазон широко використовується для супутникового зв'язку, особливо для внутрішніх низхідних каналів FSS і BSS. Висока частота в супроводі відповідного обладнання та налаштувань має

вирішальне значення для чіткого потокового аудіо та візуального потоку. Він також підходить для інтернет-серфінгу.

Ка-діапазон (17-31 ГГц). Завдяки подвійній пропускній здатності Ku-діапазону, цей діапазон підходить для супутникового зв'язку високої роздільної здатності. Вища швидкість передачі даних і менші антени роблять його ідеальним для широкопasmового Інтернету та віддаленого зв'язку.

1.1.4 Види супутникового зв'язку

Залежно від наданої послуги існують різні категорії супутникового зв'язку, включаючи послуги фіксованого супутника, мобільного супутника та супутникове мовлення.

Фіксована супутникова служба (ФСС). Визначається ІТУ (Міжнародним союзом електрозв'язку) як «служба радіозв'язку між земними станціями в заданих позиціях, коли використовується один або кілька супутників». Використовується для телефонних дзвінків і телевізійного мовлення, ця послуга характеризується малопотужними сигналами, які вона передає, і відносно великими антенами, необхідними для його прийому.

Служби мобільного супутника (СМЗ). Відповідно до ІТУ, вони включають «службу радіозв'язку між мобільними земними станціями, між космічними станціями або між мобільними земними станціями за допомогою однієї або кількох космічних станцій». Іншими словами, ця категорія включає двосторонній голосовий зв'язок і передачу даних, у тому числі для людей, які пересуваються.

Служби супутникового мовлення (ССМ). Знову посилаючись на ІТУ, вони включають «службу радіозв'язку, в якій сигнали, що передаються або повторно передаються космічними станціями, призначені для прямого прийому широкою громадськістю».

1.1.5 Використання супутникового зв'язку

Як ми вже згадували раніше, супутниковий зв'язок використовується в

кількох секторах, включаючи телекомунікації, мовлення та військові.

Телекомунікації. Цей широкий термін включає телефонні дзвінки, дані, тексти, зображення, передачу відео та Інтернет. Сучасні телекомунікаційні системи організовані та найкраще описані в контексті мереж.

Супутники зв'язку використовуються для передачі інформації для масового використання. Першим таким додатком було радіо АМ у 20-х роках. До цього часу зв'язок передавався одним пристроєм і отримувався іншим.

Військові. Супутники зв'язку використовуються у військових програмах, таких як збір розвідувальних даних, навігація та секретний зв'язок.

Супутникові орбіти зв'язку

Супутники зв'язку розміщуються на різних орбітах залежно від їх цільового використання. Тут ми розрізняємо 3 типи орбіт:

ГСО (геостаціонарна орбіта) є найпростішою для роботи з трьох. Це тому, що супутник буде просто перебувати над вибраною зоною (відомою як «зона покриття») і безперервно передавати або отримувати дані. Супутники на цій орбіті забезпечують постійний зв'язок і зазвичай розташовані на висоті близько 36 000 км. Тут розташовано більшість супутників зв'язку.

НОЗ (низька орбіта Землі) — це той, який фокусується на швидкості передачі. Мала висота мінімізує затримку через відстань, пройдену сигналом. Однак, оскільки супутник обертається дуже близько до планети, це означає, що він матиме покриття однієї області протягом дуже короткого часу (10-20 хвилин). Для забезпечення безперервної служби використовується група супутників. Такі супутники зазвичай обертаються на висоті 300-2000 км над екватором.

СОЗ (Середня орбіта Землі) — це середина між ними. Маючи висоту близько 20 000 км, супутники, розміщені на цій орбіті, традиційно використовувалися для навігації. На цій висоті обертається GNSS (Глобальна навігаційна супутникова система) і включає європейський Galileo, російський ГЛОНАСС, китайський BeiDou і GPS у США. Використання супутників зв'язку на цій орбіті лише нещодавно почало набирати популярність, і ще є можливості для розширення.

1.1.6 Приклади супутників зв'язку в космосі

Ось короткий список впливових супутників зв'язку, які досягли вражаючих подвигів.

Starlink — це супутникове сузір'я, створене SpaceX, яке має на меті забезпечити високошвидкісний Інтернет у всьому світі. Після завершення він міститиме тисячі супутників, які працюють у діапазонах Ku та Ka.

Квантові комунікаційні супутники, а саме той, запущений Китаєм у 2016 році під назвою Micius. Такий супутник використовував би пару подвійних заплутаних фотонів. Якщо один з них використовується для створення зашифрованого повідомлення, єдиним способом декодування такого повідомлення буде використання іншої парної частинки. Дані, надіслані такими засобами, не можуть бути скопійовані, вкрадені або шпиговані.

Artemis — супутник, створений ЄКА, який використовував лазерний канал як спосіб зв'язку. Artemis використовувався для зв'язку з іншими супутниками на орбіті, досягаючи швидкості передачі даних 50 Мбіт/с від одного такого супутника до наземної станції через себе з низьким рівнем помилок. Він міг приймати сигнали Ku-діапазону і передавати їх у L-діапазоні.

Iridium-NEXT — це сузір'я супутника, що обертається на орбіті LEO і забезпечує глобальне покриття 24/7. Цікава частина цих супутників полягає в тому, що окрім забезпечення зв'язку через супутникові телефони, вони оснащені корисним навантаженням, яке дозволяє їм також діяти як супутники спостереження, доводячи, що супутник може виконувати кілька ролей.

1.1.7 Історія супутників зв'язку

Перші супутники зв'язку дуже відрізнялися від сучасних. «Супутник-1», запущений у 1957 році, став першим супутником з радіопередачем. Супутник являв

собою сферу з чотирма довгими антенами, прикріпленими до неї. Він також використовував батареї і не був оснащений сонячними панелями. Він обертався навколо Землі 22 дні, поки ці батареї не розрядилися.

Першим супутником, який передавав голосові сигнали, був SCORE (Signal Communication by Orbiting Relay Equipment), який транлював попередньо записане повідомлення президента Ейзенхауера.

У 1950-х і 60-х роках інженери з AT&T досягли важливих успіхів, які привели до створення комерційних супутників зв'язку, які ми маємо сьогодні. Джон Пірс і Гарольд Розен були відповідальними за вирішальні досягнення, а також за розрахунок необхідної потужності сигналу для постійних зв'язків для супутників. Згодом NASA розробило супутники Echo 1 і Echo 2. Це були повітряні кулі з алюмінієвим покриттям, призначені для відображення сигналів без активної передачі інформації.

Першим справді функціональним супутником зв'язку був Telstar 1, розроблений Пірсом та його командою. Цей був здатний до двостороннього зв'язку. Це також був перший супутник, який передавав пряме телебачення між Європою та Північною Америкою. Їй також приписують перший телефонний дзвінок через супутник від тодішнього голови AT&T Фредеріка Каппеля до президента США Ліндона Джонсона.

Syncom 1 була першою спробою розмістити супутник в GEO, але незабаром після запуску він був втрачений. Syncom 2, однак, став першим супутником на геосинхронній орбіті, а за ним у 1964 році послідував Syncom 3, який першим досяг геостаціонарної орбіти. Syncom 3 використовувався для трансляції Олімпійських ігор 1964 року з Токіо до США, що стало першим випадком, коли супутник був використаний для прямої трансляції великої спортивної події.

Далі організація під назвою Intelsat, створена в тому ж році, запустила Intelsat 1, який був першим діючим комерційним супутником, який забезпечував регулярні телекомунікації та мовлення на Північну Америку та Європу. Додаткові запуски

Intelsat привели в 1969 році до того, що вперше в історії глобальне покриття забезпечувалося супутниковою мережею. Ця мережа була використана для трансляції першої людини посадки на Місяці 20 липня - го в тому ж році, більш ніж 600 мільйонів глядачів по всьому світу.

Радянський Союз наслідував супутникову мережу «Молнія», яка використовувалася для покриття всіх територій країни. За допомогою цієї мережі в прямому ефірі трансливався парад на честь 50 - річчя Радянського Союзу.

Після цих двох наддержав, Канада стала першою для запуску супутника зв'язку, званого Anik 1, на 9 - м листопада 1972 року Індонезія пішла його приклад з запуском Palapa 1 в 1976 році тут багато інших країн почали запускати свої супутники , що веде до супутникової мережі комерційного зв'язку, яку ми маємо сьогодні.

1.1.8 Регулюючі організації для супутників зв'язку

При такому великому ринку існування регуляторних органів цілком природно. Давайте розглянемо деякі з них.

Ми вже згадували про Міжнародний союз електрозв'язку (ITU), який є агенцією ООН, яка виділяє діапазони частот і супутникові орбіти, щоб уникнути шкідливих перешкод. Їхня головна місія – стандартизація телекомунікаційних технологій.

Федеральна комісія зв'язку (ФКЗ) регулює міждержавний радіо-, телевізійний, дротовий, супутниковий і кабельний зв'язок на всіх територіях США. Це державна установа, яка контролюється Конгресом, відповідальна за впровадження та дотримання законів і правил комунікації в Америці.

Світова організація торгівлі (СОТ) також відіграє певну роль у цьому секторі. Це допомагає в переговорах щодо використання телекомунікаційних послуг міжнародною спільнотою. Це в основному гарантує, що світовий ринок залишається конкурентним, не одержуючи несправедливих переваг національними

компаніями.[1]

1.2 Особливості передачі та обробки сигналів у супутникових системах зв'язку.

Головною особливістю супутникових систем зв'язку (ССЗ) можна вважати обов'язкове запізнення сигналів, причому час запізнення пов'язаний із сумарною відстанню до супутника [7]:

$$t_3 = \frac{L}{c} = \frac{2H}{c}, \quad (1.1)$$

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

Коли $H=36\ 000$ км, $t_3=250$ мс. Така затримка відчутна 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:

$$t_{exo} = \frac{2L}{c} \approx \frac{4H}{c}. \quad (1.2)$$

Якщо $H=36\ 000$ км $t_{exo} \approx 500$ мс. У таких випадках потрібно забезпечувати заглушення ехосигналу до 60 дБ за допомогою схем ехозагороджувачів (рис.1.3). Основний елемент схеми є підсилювач. Із появою на його виході мовних струмів спрацьовує ключ K і тракт передачі закривається – у нього вводять значне ослаблення (елемент r). Відповідно така схема має недолік: важко забезпечити режим зв'язку, коли можливе перебивання розмови одного абонента іншим (із застосуванням даної схеми це відбувається лише в паузах тривалістю > 100 мс, коли тракт передачі відкривається), крім того, має місце хибне спрацювання в разі збільшення рівня шумів у тракті приймання. У зв'язку з цим використовують розпізнавальний пристрій (РПр), принцип дії якого заснований на порівнянні спектральних складових мовного сигналу і флуктуаційних шумів. Виявлений мовний сигнал перетворюється на керувальну дію і змінює коефіцієнт підсилення в тракті передачі (рис. 1.3, б).

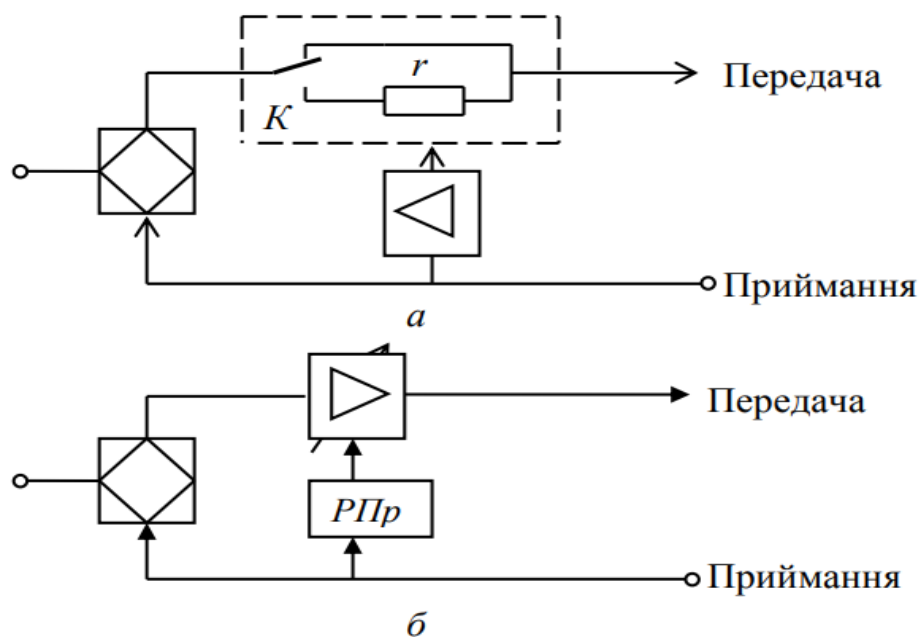


Рис. 1.3. Функціональні схеми ехозагороджувачів:

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

У разі використання ретрансляторів супутників, що рухаються за звичайними орбітами (не геостационарними), завжди доводиться враховувати ефект Доплера. Відомо, що переміщення джерела сигналу з частотою f відносно приймача системи зі швидкістю $V_r \ll C$ викликає доплерівський зсув $\Delta f_{\text{дон}} = \pm f \frac{V_r}{C}$ («+» — 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:

$$\Delta f_{\text{дон}} = \pm f_1 \frac{V_{r1}}{C} \pm f_2 \frac{V_{r2}}{C}. \quad (1.3)$$

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 *a*, — рис. 1.1, для НС *б* — частота,

яку

контролюють, – f_4). Використання приймачів контролю дозволяє на НС вимірювати рівні сигналів, які надходять до бортового приймача [6].

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 ССЗ, вибір яких визначений інтенсивністю шумів (Сонця, Місяця, Галактики тощо), можливістю сумісної роботи з іншими службами радіозв'язку, регламентують міжнародні організації. Так, Міжнародний союз електрозв'язку на Всесвітній адміністративній радіоконференції в 1974 р. встановив розподіл смуг радіочастот для ССЗ.

Зазначені смуги частот одночасно використовують і інші радіослужби. Щоб запобігти взаємним перешкодам, вводять спеціальні обмеження (за потужністю, підсиленням антен, часом випромінювання і т. д.).[7]

1.3 Реалізація багатостанційного доступу

Побудова корпоративної мережі супутникового зв'язку можна умовно розділити на два етапи - будівництво центральної наземної станції і встановлення малих наземних станцій (VSAT). Будівництво центральної наземної станції складається з повного комплексу робіт, що включає передпроектне обстеження, проектування і будівництво всіх систем - антенного посту, радіочастотного і телекомунікаційного устаткування, електроживлення, управління кліматом, пожежогасіння, охоронної сигналізації, відеоспостереження і віддаленого управління. Залежно від конкретних вимог замовника, мережа може мати різну

топологію - "зірка", "повнозв'язкова" мережа, окремі канали "точка-точка" або їх комбінацію.

Супутникова передача складається з шляху поширення у прямій видимості від наземної станції до супутника зв'язку (висхідна лінія зв'язку) і назад до земної станції (низна лінія зв'язку). Супутник зазвичай розміщується на геостаціонарній орбіті на висоті близько 22 300 миль над землею, тому він здається нерухомим з будь-якої точки, звідки він видно, і діє як ретранслятор у небі. Наземна станція включає антени, будівлі та електроніку, необхідні для передачі, прийому, мультиплексування і демультиплексування сигналів. Використовуваний частотний спектр аналогічний використовуваному для мікрохвильового наземного радіо. Антена наземної станції зазвичай сильно спрямована, а супутникова антена має велику ширину променя, щоб покривати більшу частину земної поверхні і мати можливість одночасно зв'язуватися з багатьма віддаленими один від одного земними станціями.

Здатність супутника діяти як ретранслятор для багатьох різних земних станцій називається множинним доступом (МА). В даний час для цього використовуються три основні методи: множинний доступ із частотним поділом каналів (FDMA), множинний доступ з тимчасовим поділом каналів (TDMA) та множинний доступ із кодовим поділом каналів (CDMA). У FDMA каналах між різними земними станціями призначаються різні смуги частот у межах допустимої ширини смуги. У TDMA вся смуга пропускання виділяється кожній земній станції на короткий час, як і при мультиплексуванні з тимчасовим поділом каналів. CDMA (також званий множинним доступом з розширеним спектром) використовує псевдовипадковий код і працює як у часовій, так і частотній областях. Він ефективний проти методів створення перешкод і використовується в основному у військовому супутниковому зв'язку.

Супутники вплинули на топології зв'язку і ціни. Їх можна використовувати для передачі програмного відео, голосу або сигналів даних практично в будь-якій точці Землі, незалежно від того, наскільки віддалено це місце, стаціонарно або мобільно, як корабель. Вони забезпечують багатоканальність, широку смугу

пропускання та високу швидкість передачі даних. Вартість передачі залежить від відстані між джерелом і пунктом призначення. Крім того, для більшості передач потрібен лише один супутниковий ретранслятор. Ця характеристика супутникової передачі може зробити її кращою за наземні системи, такі як мікрохвильові або коаксіальні кабелі., оскільки останні системи вимагають наявності декількох повторювачів у тандемі для покриття великих відстаней, а посилення сигналу кожним повторювачем має тенденцію до збільшення ефектів спотворення та шуму.

Через більшу відстань між землею та супутниковим ретранслятором згасання та затримки передачі можуть викликати проблеми. Згасання можна подолати, використовуючи високе посилення, вузькі промені та кути місця траси понад 20° для наземних антен. Велика висота шляху зменшує відстань, яку сигнали проходять через атмосферу, щоб зменшити згасання і завмирання. Однак загасання в дощі, як і раніше, може бути проблемою, особливо на більш високих несучих частотах, але його можна мінімізувати за допомогою просторового рознесення, оскільки дощ малоімовірний на двох віддалених один від одного наземних станціях. Загальна затримка передачі становить приблизно 0,5 с. що набагато вище, ніж для наземного середовища передачі, і пов'язане з набагато більшою відстанню, на яку має пройти сигнал (мінімум $2 \times 22\,300$ або $44\,600$ миль). Ця затримка може погіршити якість голосового зв'язку, але має найбільшу шкоду передачі даних, якщо протоколи зв'язку не розроблені з урахуванням характеристик цього середовища передачі. Супутники на низькій орбіті (від 250 до 1000 миль над землею) можуть подолати цю проблему затримки, і такі системи починають розгортатися, навіть незважаючи на те, що кількість необхідних супутників більша, а термін їхньої служби коротший, ніж у геостаціонарних супутників.

1.3.1 Види каналів зв'язку

Система зв'язку через ШСЗ із багатостанційним доступом (БСД) має у своєму складі декілька НС, що знаходяться в зоні взаємного зв'язку. Канали зв'язку однієї НС з іншими в будь-яких сполученнях будують через загальний

ретранслятор на ШСЗ. Для реалізації зв'язку на борту ШСЗ повинна бути передбачена апаратура комутації (підключена антена, спрямована у відповідну точку Землі). Канали зв'язку, які організують через ШСЗ між НС системи з БСД, можна поділити на дві групи:

- постійні (закріплені), які слугують для зв'язку між визначеними НС;
- непостійні (незакріплені), тимчасово створені залежно від потреб користувачів.

Канали першої групи дозволяють організувати зв'язок у будь-який момент часу. Для роботи каналів другої групи потрібно:

- отримати відомості про наявність вільного каналу (підняти трубку і почути відповідь АТС);
- набрати номер абонента;
- отримати відомості про наявність вільного каналу до потрібного абонента.

Система з постійними каналами, мабуть, повинна мати більшу їх кількість, ніж система з непостійними каналами. Але остання більш ефективна, хоча й має такі недоліки, як:

- додатковий час для встановлення зв'язку;
- можлива відмова у встановленні з'єднання.

Функціонування системи з БСД можна організувати за певним алгоритмом. За умовою формування багатонадресного групового повідомлення кожна НС випромінює один ствол із груповим повідомленням, призначеним для решти НС. Такі стволи після проходження через бортовий ретранслятор (БР) приймають усі НС. Після демодуляції з кожного ствола виділяють частини груп повідомлень, призначені тільки для певної НС. Це можливо або на основі адреси, переданої попереду повідомлення, або за домовленістю (визначене місце розміщення каналу (каналів) для відповідної НС). Цілком зрозуміло, що передавальна апаратура в такому випадку складніша за приймальну.

- Існує три основні можливості забезпечення БСД:

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

За умов заданого рівня перехідних шумів у ТФК зі збільшенням кількості стволів (несучих), що одночасно підсилюються у ССЗ з БСД, доводиться зменшувати кількість повідомлень, які передаються на одній несучій.

1.3.2 Організація режимів багатостанційного доступу

У випадку БСДЧР для кожного ствола, тобто НС, виділено визначену несучу частоту ($f_1, f_2 \dots f_n$). 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 — $24 \cdot 12 = 288$ 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 τ_3 . Система синхронізації реалізується за пілот-сигналом і повинна враховувати різні відстані між ШСЗ і НС. Інформаційна частина кадру становить 85—90 % від повної довжини.

1.3.3 Системи з обробкою сигналів у бортовому ретрансляторі

Обробка сигналів на борту дозволяє:

1) перегрупувати канали (можна об'єднати канали, призначені відповідній НС); випромінювання може бути організовано:

- одночасно всім НС на різних частотах через одну антену;
- одночасно всім НС на різних частотах через декілька антен або одну багатопроменеву антену;
- через одну антену, що змінює орієнтацію в просторі, за допомогою запам'ятовуючих пристроїв;

2) установити у БР регенератори, за допомогою яких усувають накопичення шумів та спотворень сигналів лінійного тракту;

3) змінювати види модуляції відповідно до енергетичного потенціалу ланки;

4) змінювати методи розділення каналів БСДЧР — БСДчР. Розглянемо приймально-передавальну апаратуру на 12 стволів системи «Intelsat IV» (рис. 1.4).

Від приймальних антен $A1$, $A2$ через комутатори сигнал надходить до приймачів Пм1—Пм4 (із них два робочі, два резервні). Сигнали, прийняті в смузі 500 мГц, транспонуються з діапазону 6 ГГц у діапазон 4 ГГц. РНС та РПС складаються з шести смугових фільтрів зі смугою пропускання 36 МГц, рознесення центральних частот фільтрів — 40 МГц. Таким чином, між сусідніми стволами утворюється захисний інтервал 4 МГц. Далі включено основні й резервні підсилювачі на електронних лампах з біжучою хвилею (ЛБХ). Після суматорів встановлено локальні й глобальні антени для відповідних стволів. Основна вимога до бортової апаратури — висока надійність і мінімальні маса, розміри й споживана енергія.[8]

1.4 Постановка завдання на дослідження загальних залежностей розрахунку енергетичних параметрів системи супутникового зв'язку та обґрунтування методів їх покращання.

Удосконалення супутникової системи цифрового телебачення з можна досягти вирішивши наступні завдання:

- визначити як розповсюджуються радіохвиль в космічному просторі;
- провести енергетичний розрахунок каналу зв'язку для забезпечення супутникового зв'язку;
- встановити завади в супутниковому каналі та опрацювати методи їх зменшення;
- проаналізувати енергетичні характеристик параметрів системи супутникового телебачення та обґрунтувати методи їх покращання.[9]

2 ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ТА ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СУПУТНИКОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КУРСУЮЧИХ В КОСМОСІ ШСЗ

2.1 Розрахунок енергетичних характеристик супутникових радіо трас.

На земних станціях, які утворюють наземний сегмент систем космічного та супутникового зв'язку, необхідне різноманітне обладнання залежно від: (А) функції станції, (В) типу обслуговування, (С) використовуваних діапазонів частот, (D) характеристики передавача, (Е) приймача та (F) антени.

Можна виділити три категорії: (1) станції, що передають і приймають, (2) тільки приймають і (3) тільки передають. Перший зустрічається в системах двостороннього зв'язку. Станції лише для прийому в даний час використовуються в системах CATV в Сполучених Штатах і у великій кількості в системах DBS по всьому світу. Земні станції, які лише передають, можна знайти в системах збору даних і фідерних каналах DBS. Види послуг включають фіксовану, мобільну, телемовну та інші. Використання спектру регулюється міжнародними розподілами з фактичною зайнятістю смуги пропускання відповідно до потреб для різних послуг, типу трафіку та модуляції.

У системах супутникового зв'язку потужність передавача земної станції коливається від кількох ват, які генеруються SSPA, до приблизно десяти кіловат, що генеруються клістродами або ЛБВ. У мережі глибокого космосу використовуються передавачі потужністю до 400 кВт. Приймачі охоплюють широкий діапазон чутливості та пропускної здатності з шумовою температурою від кількох десятків кельвінів, досягнутих за допомогою підсилювачів із криогенним охолодженням, до сотень кельвінів у неохолоджуваних підсилювачах. Сильно спрощена блок-схема типового розташування земної станції передачі та прийому показана на рис. 39. Станція має шість основних підсистем:

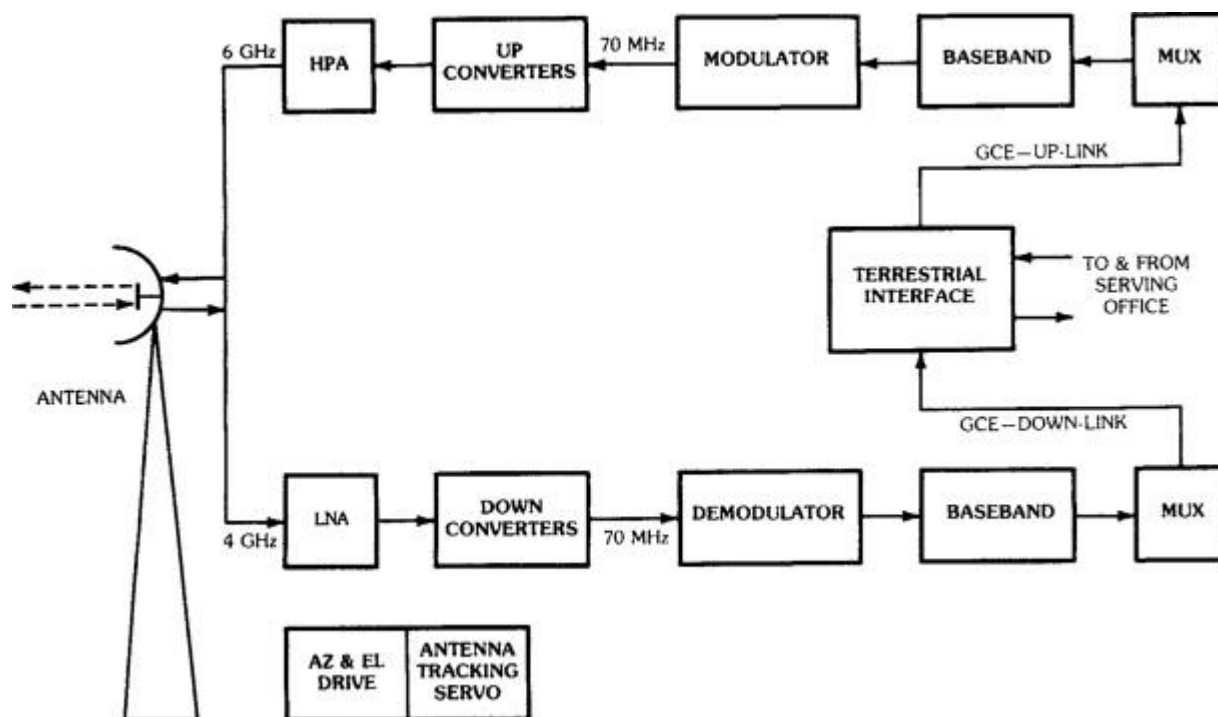


Рис. 2.1 . Блок-схема земної станції.

- А. Підсистема живлення
- Б. Наземний інтерфейс
- В. Ланцюг передачі
- Г. Приймальний ланцюг
- Д. Антенна підсистема
- Е. Підсистема управління

Шляхи та функції сигналів відповідають зазначеним. Значення проміжної частоти (ПЧ) у ланцюгах прийому та передачі зазвичай однакове, зазвичай використовується 70 МГц. Сигнали висхідної лінії зв'язку можуть передаватися за допомогою хвилеводів до потужних підсилювачів, розташованих відразу за живленням, або у формі ПЧ через коаксіальні кабелі до перетворювачів з підвищенням і високопотужних підсилювачів, розташованих там. Також можна розташувати все обладнання в основі антени та розширити вхідні та вихідні канали через хвилеводи променів. Виходи високопотужного підсилювача (ВПП) можна комбінувати через смугові фільтри, циркуляри або за допомогою гібридів. У ланцюжку прийому слабкі сигнали від супутника

приймаються тим же каналом, який несе вихід передавача. Ці два сигнали, які відрізняються за потужністю на кілька порядків, утримуються окремо за допомогою ортогональних поляризацій і диплексорів, що використовуються для посилення поділу в частотній області. Ортомодні перетворювачі та поляризатори використовуються, відповідно, для з'єднання ортогонально поляризованих сигналів в єдиний хвилевід і для перетворення лінійної поляризації в кругову і навпаки. Після попереднього підсилення в підсилювачі з низьким рівнем шуму (НРШ) прийняті сигнали перетворюються з пониженням у ПЧ і демодуються до основної смуги.

Антенна є дуже важливою частиною земної станції, оскільки вона впливає на e_{ipr} , показник якості прийому (G/T) і перешкоди. Розмір антени значно варіюється: від діаметра 0,5 метра або менше, що використовується для прийому DBS-TV тільки в приватних будинках, до набагато більших передавальних і приймальних антен (парабол діаметром до 32 метрів), що використовуються в системах високої потужності, і навіть більших антен. (діаметром до 64 метрів), що використовуються в мережі глибокого космосу. На додаток до параболічних відбивачів, які широко використовуються, використовувалися інші форми антен, такі як рупори, тороподібні відбивачі, ягі, спіралі та фазовані решітки.

З точки зору загальних відносин,

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

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:

$$\eta = \eta^1 \times \eta^2 \times \eta^3 \times \eta^4 \quad (2.4)$$

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 раз

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

де ϵ – середньоквадратичний допуск поверхні. Оскільки втрати посилення в децибелах ϵ

$$\eta'_{dB} = 685.8(\epsilon/\lambda)^2 \quad (2.6)$$

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

становить від 500 до 25 000. У електрично більших антенах, призначених для радіоастрономії, вищі значення D/ϵ 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.

Інші три втрати — блокування, перелив і освітленість — найбільш значущими є для складених оптичних систем, таких як широко використовувана конфігурація Кассегрена, яка характеризується гіперболічним субрефлектором і параболічним основним відбивачем. Оскільки освітленість діафрагми та випромінювання далекого поля пов'язані перетвореннями Фур'є, рівномірне освітлення призводить до типу діаграми випромінювання $\sin x/x$, коефіцієнта освітленості одиниці, але відносно високого рівня бічних пелюсток. При звуженні освітленості коефіцієнт освітленості падає нижче одиниці, але можна досягти кращого контролю бічних пелюсток. Хоча складені оптичні системи, такі як конфігурації Кассегрена та Грегоріана, забезпечують ідеальне фокусування, вони не забезпечують оптимальної ефективності освітлення діафрагм. Ефективність діафрагми можна підвищити шляхом відповідної форми субрефлектора та відбивача для видалення енергії з центральної області, заблокованої субрефлектором і подачею, і перерозподілу її для досягнення більш рівномірного освітлення по всій діафрагмі, що залишилася. Таке формування може підвищити посилення рефлекторної антени більш ніж на 1 дБ. Найбільш ефективний для антен з $D/\lambda > 100$.

Стиснення геостаціонарної орбіти в результаті розширення супутникових систем вимагає дуже суворого контролю бічних пелюсток антени, щоб задовольнити протилежні вимоги мінімальних взаємних перешкод і зменшення відстаней на орбіті (від 5° до 4° до 3° і навіть до 2°).

Огинаючи бічних пелюсток більшості електрично великих антен Кассегрена можна апроксимувати виразом виду

$$G_{dB_i} = A - B \log \theta \quad (2.7)$$

де A і B – константи, а θ – кут за межами оглядової зони. У 1965 році ССІР (нині ІТУ-Р) прийняв це правило

$$G_{dB_i} = \begin{cases} 32 - 25 \log \theta & 10^\circ \leq \theta \leq 48^\circ \\ 29 & \theta > 48^\circ \end{cases} \quad (2.8)$$

Антени системи *INTELSAT* були стандартизовані відповідно до правила ССІР. До 1977 року бічні пелюстки за 1° від прямого огляду не повинні були перевищувати рівень -29 дБ, але після 1977 року було введено нове правило, яке вимагає, щоб не більше ніж 10 відсотків піків бічних пелюсток перевищували огинаючу, як визначено вище. Остання рекомендація змінила б значення константи A з 32 на 29 у наведеному вище виразі.

Все частіше, щоб задовольнити більш жорсткі вимоги до бічних пелюсток, антени земних станцій будуються у зміщеній конфігурації. Якщо розмістити структуру живлення нижче оптичної лінії видимості відбивача, апертура рефлектора залишається незаблокованою, і можуть бути реалізовані набагато нижчі бічні пелюстки.

Параметром, що характеризує продуктивність системи, є співвідношення G/T , зазвичай виражається в дБ/К. Після вибору порту вимірювання необхідно врахувати всі внески в шумову температуру системи. Конструкція живлення антени має велике значення з точки зору як посилення, так і бічних пелюсток (а також поляризації).

Величина переливу та звуження освітлення як для субрефлектора, так і для головного відбивача залежить від конструкції системи живлення. Великий прогрес був досягнутий 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 згаданому випадку гофровані ріжки з канавками $\lambda/4$ дозволили збільшити пропускну здатність, покращити симетрію діаграми випромінювання, зменшити бічні пелюстки та досягти кращих характеристик позаосової поляризації, особливість особливого значення в системах з подвійною поляризацією. У цьому випадку ізоляція між двома ортогонально поляризованими співчастотними каналами повинна бути якомога

вищою. Досвід систем, що використовують лінійну або кругову ортогональну поляризацію, підтвердив, що ізоляція 30 дБ є репрезентативною метою проектування. Щоб задовольнити вищезгадані вимоги, необхідні складні ортомодні переходи та розташування каскадних поляризаторів.

Фактична ізоляція залежить від чистоти поляризації джерела сигналу та антенної системи. Оскільки дощ уздовж шляху сигналу деполаризує сигнал, автоматичні засоби корекції деполаризації були успішно запроваджені на частоті 6/4 ГГц.

У разі потреби використовуються моноімпульсні системи відстеження для постійної корекції спрямованості антени в напрямку супутника. Для забезпечення безперервності роботи передбачено допоміжне джерело живлення, а також резервне обладнання зв'язку.

Більша частина наведеного вище опису земних станцій стосується тих, що використовуються як шлюзи для ТфОП. У 1980-х роках відбулися помітні зміни у застосуванні супутникового зв'язку. Багато класів земних станцій безпілотні, розташовані на території користувача, мобільні та з низьким G/T , тільки прийом, електрично малий або комбінації цих якостей. Як згадувалося раніше, VSAT зазвичай знаходяться в приміщеннях користувача, безпілотні і відносно невеликі. Аналогічно розгорнуті USAT. Кількість земних станцій на території користувачів швидко зростає, як і обсяг трафіку, який вони здійснюють. Домашні станції DBS-TV розташовані на території користувача, лише для прийому, і електрично досить невеликі. Мобільні термінали для літаків, наземних мобільних і невеликих кораблів знаходяться на території користувача (транспортного засобу), мобільні та з низьким $G/T (< -10 \text{ дБ/К})$ (і, отже, часто страждають від багатопроменевості), і досить малі електрично. З'являються термінали для телефонів ще менші фізично та електрично.

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 ММІС 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 заземлюючих терміналів, подібних до описаних вище, значно розширилися, і розширення зростатиме принаймні такою ж швидкістю в першому десятилітті 21-го століття.[2]

2.2. Умови розповсюдження радіохвиль у космічному просторі.

Розповсюдженням радіохвиль у просторі називається явище перенесення енергії електромагнітних хвиль в діапазоні радіочастот. Відстань, на якій можливе здійснення радіозв'язку, залежить від ряду факторів: обраної частоти, потужності передавача, чутливості приймача, параметрів антен, умов розповсюдження радіохвиль. Радіохвилі займають частину спектру частот електромагнітних хвиль з довжинами від 100 км до 1 мм, яким відповідають частоти від 3 кГц до 300 ГГц. Подібно світловим хвилям, на радіохвилі впливають явища відбиття, заломлення, дифракції, поглинання, поляризації та розсіювання.

Поширення радіохвиль залежить від щоденних змін водяної пари в тропосфері та іонізації у верхніх шарах атмосфери у зв'язку із близькістю до Сонця. Розуміння впливу різних факторів на поширення радіохвиль має безліч практичних застосувань, від вибору частот для міжнародного короткохвильового телерадіомовлення, до проектування надійних мобільних телефонних систем, радіонавігації та експлуатації радіолокаційних систем.

Радіохвилі на різних частотах поширюються по-різному. Довжина хвилі дуже низьких частот набагато більша за відстані між земною поверхнею і D-шаром іоносфери (60—90 км), тому електромагнітні хвилі можуть поширюватися в цьому регіоні, як у хвилеводі. Взаємодія радіохвиль з іонізованих шарах атмосфери ускладнює прогнозування та аналіз поширення радіосигналу. Іоносферне поширення радіохвиль сильно залежить від космічної погоди. У вільному просторі, або вакуумі всі електромагнітні хвилі (радіо, світлові, рентгенівські тощо) підпорядковуються закону обернених квадратів, згідно якого щільність потоку

енергії електромагнітної хвилі обернено пропорційна квадрату відстані від точкового джерела:

$$\rho_0 \sim \frac{1}{r^2} \quad (2.9)$$

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.[4]

Глобальне покриття для вільного оптичного зв'язку між сузір'ям малих супутників низької орбіти і земною станцією.

Лазерний зв'язок між супутниками, а також між будь-яким супутником передачі та наземною станцією в діапазоні кратних (бажано сотень) Гбіт/с необхідний для встановлення глобального підключення до Інтернету. Лазерний канал з високою швидкістю передачі даних вимагатиме високоточних можливостей наведення та ширококутового оптичного приймача землі в поєднанні з лазерним маяком та двостороннім каналом передачі даних. Для передачі супутників можна використовувати мікросупутникову платформу. Лазерний зв'язок система може бути розроблена, щоб забезпечити лазерну зв'язок високій швидкості передачі даних на Землю з низькоорбітальних супутників, з високою точністю наведення можливості. Наслідки атмосферної турбулентності та обмеження наведення обмежують доступ кожного супутника до наземної станції. Для цього знадобиться відносно велика кількість супутників на малих висотах. На орбітальній площині для забезпечення постійного зв'язку може використовуватися сузір'я Уокера у формі «перлин», де кожен супутник може легко отримати доступ до двох найближчих супутників (попереду та позаду нього). Це зведе до мінімуму загальну кількість необхідних супутників і необхідних орбітальних площин. Атмосферні ефекти, такі як турбулентність, впливатимуть на отриманий КБП та ймовірність

загасання сигналу до допустимої величини, достатньої для надійного зв'язку. Одним з ключових факторів у системному сузір'ї є максимальний кут відносно зенітуколи трансивер може вказувати на приймач і передавати дані. Якість лінії зв'язку задовольняється, поки не досягнуто максимального кута. Кут дорівнює нулю, коли супутник проходить точно над наземною станцією. Оскільки шлях із збільшенням кута довший, вплив турбулентності на продуктивність системи зв'язку також збільшується. Зенітний кут не більший за 30° дозволяє не погіршувати КБП за межі необхідного КБП, необхідного для успішного високоякісного зв'язку. Коли НОЗ заблокований хмарами або сильно постраждав від туману та дощу, надлишкова передача на кілька терміналів у різних місцях знадобиться. З аналізу розміру сузір'я [45] повідомляється про групу з 27 супутників на НОЗ для забезпечення постійного зв'язку. Мобільні наземні станції можуть бути корисними для зменшення кількості супутників і, отже, вартості, щоб збільшити кількість і якість нових додатків.

Таким чином, очевидно, що ринок супутників зміщується в бік менших (мікро- та наносупутників), меншої маси та високопродуктивних платформ, застосованих 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 [46], яка представляє систему СЗРО 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 [1] 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 СЗРО 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.[5]

2.3 Визначення впливу магнітного поля землі на енергетичні параметри систем супутникового зв'язку.

Супутниковий зв'язок зазвичай розглядається як надійний засіб зв'язку, не чутливий до впливу навколишнього середовища. Це сприйняття не зовсім точне. На супутниковий зв'язок може впливати середовище, в якому він працює.

Вплив космічного середовища на супутниковий зв'язок можна розділити на:

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

Вплив на супутник залежить від орбіти супутника. Геосинхронні супутники на найвищих орбітах чутливі до спалахів частинок високої енергії, які рідко випромінюються Сонцем. Ці частинки можуть викликати

1. порушення пам'яті;
2. діелектричний заряд;
3. радіаційне пошкодження компонентів.

Це може призвести до збоїв у роботі, погіршення якості обслуговування або, в крайніх випадках, до втрати супутника.

Супутники на низьких земних орбітах (НЗО) менш сприйнятливі до пошкодження частинками, за винятком полярних регіонів, але можуть зазнавати збільшення орбітального розпаду (і, як наслідок, скорочення тривалості життя), коли відбувається підвищена сонячна активність.

На чутливість низхідної наземної станції впливають джерела шуму в промені приймальної антени. Це може включати шум неба та сонячний шум. Ефект залежить від частоти роботи.

На сигнал, що поширюється, може вплинути його проходження через іоносферу (верхня атмосфера) або тропосферу (нижня атмосфера). Ці ефекти значно залежать від частоти, але включають поглинання сигналу, сцинтиляцію, обертання Фарадея та декогеренцію смуги пропускання. Географічне розташування та шлях поширення сигналу можуть визначити ступінь впливу на сигнал.

У наступних розділах кожен із зазначених вище ефектів розглядається більш детально.[6]

2.3.1 Ефекти супутника

Космос — це не те благополучне середовище, яке колись вважалося. Його перетинають невеликі шматочки речовини (метеороїди), а також великий і змінний потік радіації. Поле радіації на орбіті Землі надходить від трьох джерел: галактичної космічної радіації, уловлених радіаційних поясів (пояси Ван Аллена) і сонячної радіації. Перші два джерела - це випромінювання частинок, переважно протони та електрони. Сонячне випромінювання буває як електромагнітним, так і дисперсним (атомним і субатомним).

Галактичне космічне випромінювання складається здебільшого з протонів дуже високої енергії, які утворюють постійне джерело фонового випромінювання низького рівня. Ці частинки не мають особливого значення для супутників зв'язку, але становлять можливу небезпеку для тривалих польотів людини в космос на інші планети. Іноді вони можуть бути відповідальними за порушення пам'яті на супутниках зв'язку.

Захоплені радіаційні пояси — це низькоенергетичне випромінювання частинок, яке необхідно враховувати для супутників, які проводять значний час на орбітах середньої висоти. Пояси Ван Аллена фактично відповідають за бімодальний розподіл супутників. Орбіти нижче приблизно 1500 км переважно знаходяться нижче радіаційних поясів, тоді як геосинхронні орбіти лежать над ними. Супутники на напівсинхронних орбітах (наприклад, супутники GPS) повинні використовувати радіаційно загартовані компоненти (особливо в області пам'яті комп'ютера), щоб вижити протягом багатьох років. Поки що супутники типу "Молнія" з дуже еліптичними орбітами є єдиними коматами, які проводять багато часу в поясах Ван Аллена, і навіть вони досить швидко проходять через небезпечну область на своєму шляху від перигею (де вони не функціонують) до їх апогей, де вони проводять більшу частину свого активного життя.

Сонячна радіація надзвичайно мінлива. Фонове сонячне іонізуюче випромінювання складається з рентгенівських променів низького рівня та невеликого компонента частинок, який ми називаємо сонячним вітром. Однак під час вибухових подій, що відбуваються на Сонці (спалахи і корональні викиди маси), потік рентгенівських променів може збільшитися на кілька порядків, і енергія цього випромінювання збільшується (стає «твердішим»). Електрони і протони можуть викидатися у великій кількості, а в рідкісних випадках деякі частинки можуть бути прискорені до дуже високих енергій (навіть понад 1 ГеВ). Саме ці сонячні енергетичні частинки (СЕЧ) можуть завдати шкоди космічним кораблям.

СЕЧ можуть викликати пряме радіаційне пошкодження компонентів космічного корабля, таких як великі батареї сонячних батарей. У деяких космічних апаратів ефективність сонячних батарей знизилася більш ніж на 30% під час однієї події великої сонячної частки. Це фактично скорочує термін служби космічного корабля на кілька років (і позбавляє власника кількох мільйонів доларів доходу). Навіть велика кількість електронів нижчої енергії завдала шкоди супутникам, в одному випадку призводячи до повної втрати космічного корабля (канадський геосупутник Anik).

Інший вплив частинок на супутники пов'язаний із зарядкою автомобіля. У випадках, коли космічний корабель має поверхні з малим радіусом кривизни, і, зокрема, кілька поверхонь, які можуть бути ізольовані одна від одної, може виникнути диференціальний поверхневий заряд. Це може викликати глибокий діелектричний заряд на платах космічного корабля. Якщо заряд наростає до високого значення, може статися раптовий розряд, що призведе до пошкодження електронних компонентів. Поодинокі частинки можуть також відкласти достатній заряд всередині космічного корабля поблизу компонентів комірки пам'яті і призводити до «перевороту бітів», змінюючи стан комірки пам'яті з нуля на одиницю (або навпаки), викликаючи помилку в системній програмі або дані. Це тимчасові ефекти, які називаються розладами однієї події або СЕЧ.

Потенційно небезпечний стан може виникнути для геосинхронних супутників (геосатів), коли сонячний вітер і умови міжпланетного магнітного поля створюють достатній тиск, щоб зсунути кордон магнітосфери Землі (так звану магнітопаузу) на висоту, меншу, ніж орбіту супутників. Зазвичай магнітосфера, область, де магнітне поле Землі контролює рух частинок у космосі, забезпечує певний ступінь екранування та захисту супутників у межах своїх кордонів. Якщо супутник опиняється за межами магнітосфери, фактично «у космосі», тоді він буде піддаватися масовому збільшенню сонячної радіації, коли знаходиться на сонячній стороні Землі. Крім того, старі супутники також покладаються на магнітне поле

Землі для підтримки правильної орієнтації. Коли відбувається перетин магнітопаузи.

Перешкоди наземної станції

Супутникова наземна станція відповідає за прийом сигналів від супутника і, можливо, передачу команд та/або комунікаційного матеріалу на супутник. Для прийому супутникових сигналів наземна станція використовує антену для «вловлювання» супутникового сигналу. Усі антени мають ширину променя, кутовий діапазон, у якому вони можуть виявляти сигнал, що визначається розміром або апертурою антени та частотою роботи. Чим більше антена, тим менше буде її ширина променя, а чим вище частота роботи, тим менше ширина променя.

Будь-який прийнятий сигнал повинен конкурувати з фоновим шумом. Параметр, відомий як співвідношення сигнал/шум (ССШ), визначає, чи приймає антена придатний для використання сигнал. Для нормального зв'язку потужність сигналу, що цікавить, повинна бути щонайменше на 10 дБ (десять разів) вище будь-якого фонового шуму, щоб його можна було використовувати.

Шум у системі виникає з двох джерел; внутрішні і зовнішні. Кожен приймач створює певний внутрішній шум. Це можна звести до мінімуму шляхом ретельного проектування, але неможливо повністю усунути, і в кінцевому підсумку встановлює обмеження на всі комунікації. Зовнішній шум надходить через приймальну антену і надходить від будь-яких джерел (крім бажаного супутника), які можуть випадково лежати в межах ширини променя антени. Сонце з температурою, яка може змінюватися від 6000 до 2 мільйонів градусів, є сильним джерелом радіошуму, який щодня переміщується по небу і, можливо, потрапляє в промінь приймальної антени. Для геосупутників це, як правило, відбувається навколо рівнодення (березень і вересень), коли схилення (небесна широта) Сонця дорівнює видимому схиленню геосупутника. Коли це відбувається, супутниковий сигнал повинен конкурувати з сигналом сонячного шуму. Навіть під час низької сонячної активності цей сигнал зазвичай приблизно на 20 децибел (потужність у

100 разів) перевищує типовий транспондер супутникового телебачення в діапазоні С (4 ГГц).

Весь супутниковий зв'язок піддається «вимкненням на сонці», описаним вище. Системи, які мають малу ширину променя і високі SNR, будуть найбільш стійкими до відключення на сонці. Системи з великою шириною променя і низьким співвідношенням сигнал/шум будуть вражені більше. Радіошум Сонця також збільшується з частотою, тому системи діапазону К часто піддаються більшому ризику, ніж системи діапазону С.

Навіть системи супутникового зв'язку, які виявилися надійними в тихих сонячних умовах, можуть постраждати під час енергійної сонячної події, коли вихідний радіошум на всіх частотах може підвищитися на кілька порядків.



2.2. Вплив на сигнал, що поширюється

2.3.2 Іоносферні ефекти

Іоносфера - це область верхніх шарів атмосфери, яка простягається приблизно від 70 до 500 км у висоту. Це область, де деякі з атомів видалили зовнішні електрони за допомогою екстремального ультрафіолетового (EUV) і рентгенівського випромінювання, що надходить від Сонця. Тому кажуть, що атмосфера частково іонізована – звідси й назва іоносфера. Іонізований газ також називають плазмою. Плазма є провідною, і через це вона буде взаємодіяти з електромагнітними сигналами (наприклад, радіохвилями), які проходять через неї. Фактично, нижче певної частоти (частоти плазми, яка пропорційна квадратному кореню з електронної густини плазми) плазма буде відображати

радіосигнал, що падає на неї. Саме ця властивість дозволяє поширювати високочастотні або короткохвильові сигнали по всьому світу. Вище плазмової частоти, сигнал не буде відбиватися, але все одно буде заломлюватися або вигинатися, коли він проходить через плазму. Чим вище частота радіосигналу, тим менше вигин.

Іоносфера не є однорідним шаром плазми. Його щільність змінюється залежно від часу доби, висоти, широти, сезону та сонячної активності. Він може містити нерівності, такі як плями, згустки та спади іонізації. Це також дисперсійне середовище, тобто середовище, через яке сигнали різної частоти поширюються з дещо різною швидкістю. На найнижчих висотах він також має тенденцію поглинати радіохвилі, а не відбивати їх. Всі ці характеристики викликають різноманітний вплив на електромагнітні сигнали, що поширюються.

Пряме поглинання на малих висотах і відбиття на більших висотах відбувається лише для сигналів нижче приблизно 30 МГц, тому це зазвичай не є проблемою для супутникового зв'язку. Однак заломлення (вигин) і дисперсія є важливими проблемами для супутникових каналів. В однорідній іоносфері заломлення є важливим фактором для радарів, які стежать за космічними об'єктами, оскільки це змушує їх бачити об'єкт у положенні, зміщеному від справжнього. Це те саме, що дивитися на об'єкт, занурений у воду, який здається зміщеним з того місця, де він насправді є, внаслідок заломлення (вигину) світла. Дисперсія викликає затримку сигналу та диференціальну затримку в ширококутових системах зв'язку, що може бути проблемою. Інше явище, ефект Фарадея, виникає, коли сигнал поширюється через плазму в присутності магнітного поля. Коли в іоносфері є нерівності, ми стикаємося з явищем сцинтиляції. Цей ефект розглядається в наступному розділі.

2.3.4 Сцинтиляція

Іоносферна сцинтиляція – це швидке коливання сили сигналу трансіоносферного сигналу (наприклад, від супутника до наземної станції). Ефективно сцинтиляція вносить додатковий компонент низькочастотного шуму в сигнал.

Сцинтиляція, схожа на видиме мерехтіння зірок на нічному небі, викликана дрібномасштабними нерівностями в іоносфері. Тобто замість рівномірного шару іонізації певні області іоносфери піддаються іонізації з нижчою або вищою щільністю.

Ці нерівності переважно утворюються в двох різних областях над Землею – полярних, а точніше, полярних областях (як північних, так і південних) і екваторіальних областях. У полярних областях іоносферні нерівності викликані частками, що випадають в іоносферу з магнітосфери (ті самі частинки, які утворюють видиме сяйво). Потоки цих частинок викликають нестійкі бульбашки та впадини, на краях яких сцинтиляції є найсильнішими. Авроральні сцинтиляції можуть виникати в будь-який час дня, але, як правило, сильніші вночі та коли геомагнітна активність висока (тобто під час геомагнітних бур). В екваторіальних областях після заходу сонця бульбашки іонізації утворюються на дні іоносфери і піднімаються вгору протягом ночі, утворюючи вертикальні шлейфи (які також можуть рухатися горизонтально). Сигнали, які поширюються біля країв цих шлейфів, піддаються найінтенсивнішим сцинтиляціям. Таким чином, екваторіальні сцинтиляції в основному є нічним явищем, причому більшість шлейфів зникає до півночі, хоча деякі з них зберігаються до ранніх годин. Екваторіальні сцинтиляції збільшуються в міру збільшення потужності ультрафіолетового (ПУТ) і рентгенівського випромінювання Сонця (що створює більш товсту і сильно іонізовану іоносферу). Таким чином, їх інтенсивність відповідає приблизно 11-річному сонячному циклу. Вони також показують 27-денну періодичність через обертання Сонця, оскільки утворююча ПУТ пластина розподіляється нерівномірно по сонячній поверхні. Більшість шлейфів зникає до півночі, хоча деякі зберігаються до ранніх годин. Екваторіальні сцинтиляції збільшуються в міру збільшення

потужності ультрафіолетового (УФ) і рентгенівського випромінювання Сонця (що створює більш товсту і сильно іонізовану іоносферу). Таким чином, їх інтенсивність відповідає приблизно 11-річному сонячному циклу. Вони також показують 27-денну періодичність через обертання Сонця, оскільки утворююча УФ пластина розподіляється нерівномірно по сонячній поверхні. більшість шлейфів зникає до півночі, хоча деякі зберігаються до ранніх годин. Екваторіальні сцинтиляції збільшуються в міру збільшення потужності ультрафіолетового (УФП) і рентгенівського випромінювання Сонця (що створює більш товсту і сильно іонізовану іоносферу). Таким чином, їх інтенсивність відповідає приблизно 11-річному сонячному циклу. Вони також показують 27-денну періодичність через обертання Сонця, оскільки утворююча УФП пластина розподіляється нерівномірно по сонячній 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 від географічного екватора, як показано на наведених нижче картах світу.

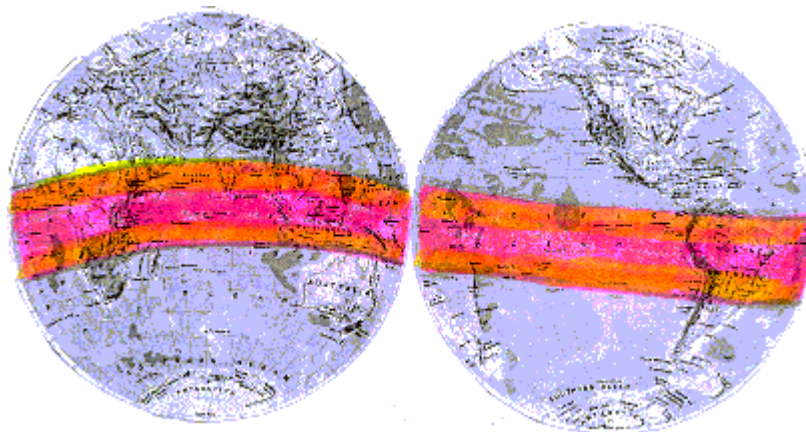


Рис. 2.3. Геомагнітний екватор

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 на певний шлях сигналу іоносферна сцинтиляція, необхідно визначити геомагнітну широту точки проникнення в іоносферу (ТПІ) трансіоносферного сигналу. У таблиці нижче показано ТПІ для сигналів, отриманих у Дарвіні (Австралія) з ряду геосинхронних супутників. Зауважте, що багато з них знаходяться під кутом 20 градусів на південь (геомагнітні) і, таким чином, будуть піддаватися іоносферним сцинтиляціям, які будуть посилюватися на схід, а також у напрямку до сонячного максимуму в міру збільшення загальної електронної щільності. Ефекти сцинтиляції, коли вони виникають, стануть очевидними відразу після локального заходу сонця і зменшаться після локальної опівночі. До 3 години ночі за місцевим часом усі сигнальні мерехтіння повинні були зникнути.

```

> 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/GEOGRPH
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 1 частоти 240 МГц, які використовуються у військових комунікаціях, тоді як L-діапазон страждає помірно, і лише найсильніші мерехтіння впливають на діапазон С і вище.[7]

2.3.5 Обертання Фарадея

Коли радіосигнал із плоскою поляризацією проходить через плазму, таку як іоносфера, в якій також присутнє магнітне поле (наприклад, магнітне поле Землі), площина поляризації сигналу повертається. Величина обертання пропорційна величині магнітного поля та повній іонізації, через яку проходить сигнал. Він також обернено пропорційний квадрату частоти сигналу.

Таким чином, низькі частоти зазнають значно більшого обертання, ніж високі. Оскільки іоносфера стає більш іонізованою, через збільшення сонячного СЕЧ та потоку рентгенівських променів обертання сигналу також збільшується. Сигнали, що проходять через іоносферу під низькими кутами місця, будуть вплинути більше, ніж сигнали, що поширюються поблизу зеніту, оскільки загальна відстань, пройдена через іоносферу, буде більшою.

На частотах УКХ і високих рівнях сонячної активності площину поляризації можна повернути багато разів на 360 градусів. На частотах С-діапазону (4 ГГц) обертання сигналу рідко перевищуватиме кілька градусів.

Проблема, викликана поворотом площини поляризації сигналу, подвійна. Якщо наземна станція очікує отримати горизонтально поляризовану хвилю, то поворот на 90 градусів може призвести до повної втрати сигналу. Однак набагато менші обертання можуть викликати проблеми в системах супутникового зв'язку, які використовують як вертикально, так і горизонтально поляризовані сигнали однієї частоти (тобто спектральне повторне використання через ортогональну поляризацію). У цьому випадку невеликий поворот майже не вплине на силу отриманого сигналу бажаної поляризації, але дозволить деякій частині ортогонально поляризованого сигналу (небажаного каналу) перехресно з'єднатися з антеною. Це призводить до перешкод для потрібного сигналу. Поворот всього на 5 градусів може з'єднати небажаний канал з рівнем лише на 20 дБ нижче бажаного.

На графіку нижче показано типові зміни загального вмісту електронів в іоносфері протягом дня високої фонові сонячної активності, результуюче обертання Фарадея, яке створюється в низхідному каналі супутникового телебачення С-діапазону, і ортогональне співвідношення потужності, яке виникає. Шкала праворуч показує відношення перехресних завад до основного сигналу, у цьому випадку досягаючи приблизно -20 дБ (або відношення від 1 до 100).

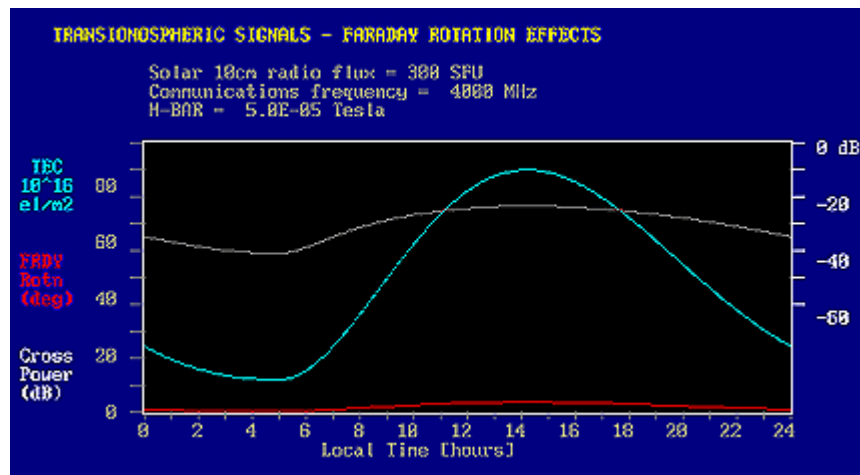


Рис. 2.5. Результат Фарадея

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 К-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 ряд стратегій, які можна застосувати для мінімізації впливу космічної погоди на системи супутникового зв'язку.

Що стосується самих супутників, то перший крок має відбутися на етапі проектування перед запуском. Конструкція супутника може звести до мінімуму можливість заряджання космічних кораблів і подальший розряд, який може призвести до пошкодження компонентів. Це робиться за допомогою вибору матеріалів, контурів поверхні та відповідного «грунтового» з'єднання.

Потрапивши на орбіту, кмітливий супутниковий оператор може орієнтувати супутник, щоб мінімізувати пошкодження від частинок високої енергії (переважно протонів), що виникають у результаті події SEP, отримавши відповідне попередження відповідного агентства космічної погоди. Супутниковий контролер також може вирішити не завантажувати команди під час таких подій. Щоб підтримувати положення супутника, особливо в LEO, контролер може захотіти виконати «дамп імпульсу», щоб переконатися, що реакційні колеса супутника не працюють на максимальних обертах, коли виникає порушення.

Ефекти відключення сонця можна пом'якшити лише за допомогою більш ніж одного супутника в різних орбітальних місцях. Трафік може бути тимчасово перенаправлений на супутник, який у певний час не знаходиться перед Сонцем. Таке «просторове різноманіття» також може бути застосовано до тропосферного поглинання, щоб уникнути локальних регіонів із високим рівнем опадів.

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

Деполаризацію 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. [10]

3 РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ СУПУТНИКОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Особливості розрахунку супутникових систем передачі інформації.

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:

$$\tau \cong \frac{2H}{c} \quad (3.1)$$

де H - відстань від супутника до поверхні Землі;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с - швидкість світла.

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

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

3.1.2. Ехосигнали

Запізнення сигналів призводить до появи помітних для абонентів ехосигналів, які проявляються у вигляді прослуховування абонентом своєї розмови, затриманого на час, що дорівнює подвоєному часу поширення сигналу між абонентами, тобто:

$$t_{\text{эс}} = \frac{4H}{c} \quad (3.3)$$

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

$$\tau \cong 2 \cdot 250 = 500 \text{ мс}. \quad (3.4)$$

3.1.3 Ефект Доплера

Це фізичне явище, яке полягає в зміні частоти прийнятих коливань при взаємному переміщенні передавача і приймача цих коливань. Ефект Доплера найбільший, якщо рух передавача щодо приймача відбувається уздовж лінії зв'язку:

$$\Delta f = \frac{f_0 V}{c}, \quad (3.5)$$

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

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

3.2 Розрахунок параметрів наведення антен земних станцій супутникових систем зв'язку.

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.

Як параметри наведення антени ЗС використовуються кутові координати напрямку максимуму головної пелюстки ДС на ШСЗ по азимуту $\alpha_{ШСЗ}$ і куту місця $\beta_{ШСЗ}$. Наближені значення кутових координат $\alpha_{ШСЗ}$ і $\beta_{ШСЗ}$ можуть бути розраховані за формулами або визначені за допомогою спеціальних таблиць. Слід зазначити, що точні значення параметрів наведення для будь-якого часу доби можуть бути отримані лише безпосередньо при роботі системи наведення антени ЗС за сигналами, що приймаються з ШСЗ.

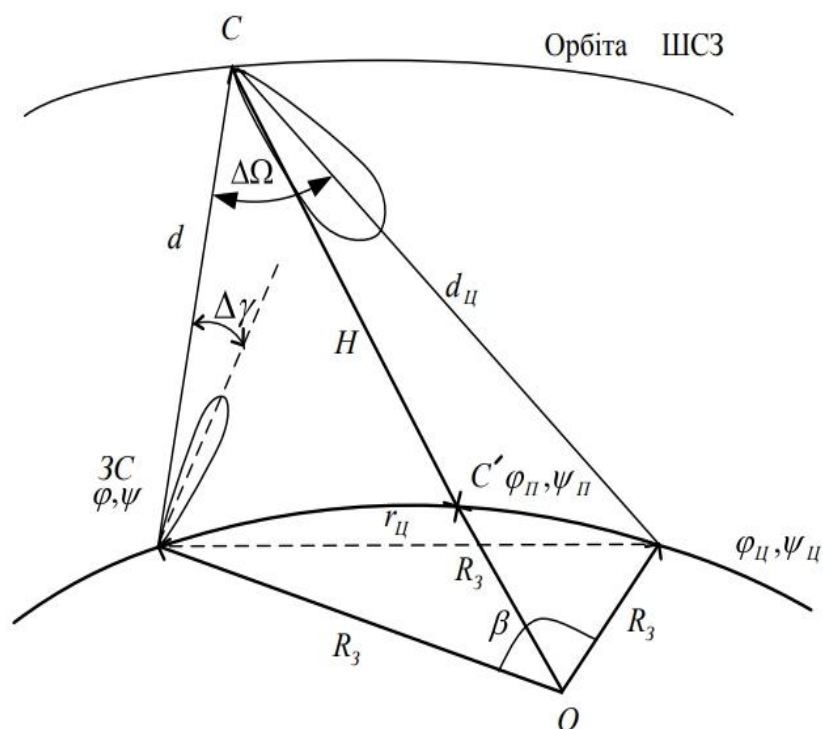


Рис 3.1. Наведення ШСЗ

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:

$$\beta_{\text{ШСЗ}} = \arctg \left[\frac{\cos(\lambda_R - \lambda_P) \left(\varphi_R - \frac{R_3}{R_3 + H} \right)}{\sqrt{1 - \cos^2 \lambda (\lambda_R - \cos \varphi) (\varphi_R)^2}} \right], \quad (3.6)$$

де P_λ – географічна довгота координата підсупутникової точки;

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

R_3 – радіус Землі ($R_3 = 6\,378,16$ км);

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

азимута антени ЗС має наступний вигляд:

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

Позитивний напрям азимута визначається при повороті антени ЗС від напрямку на північ за годинниковою стрілкою. Для оцінки можливості приймання/передавання радіосигналів на заданий ШСЗ необхідно порівняти отримані чисельні значення кута місця і азимута з допустимими значеннями. ШСЗ, що знаходяться на геостаціонарній орбіті, вважаються доступними для приймання сигналів з території України в межах кутів: $\alpha_{\text{ШСЗ}} \approx 180^\circ \pm 70^\circ$ і $\beta_{\text{ШСЗ}} \leq 10^\circ < 36,5^\circ$. [12]

3.3 Аналіз геометричних та електродинамічних параметрів антен систем супутникового зв'язку.

Антенна є невід'ємною частиною радіоканалу будь-якої системи радіозв'язку. Основним типом антен, що застосовуються у системах супутникового зв'язку, є параболічна антенна та її модифікації (однодзеркальна, дводзеркальна, офсетна). Для розрахунку основних електродинамічних характеристик (діаграма спрямованості (ДС), коефіцієнт посилення (КП), коефіцієнт використання поверхні (КВП) параболічних антен в інженерній практиці часто використовується апертурний метод. Згідно з даним методом параболічну антену можна розглядати як синфазний збуджений круглий розкрив (апертуру) із заданим амплітудним розподілом на ньому збуджуючого поля, яке формується опромінювачем. Як опромінювачі параболічних антен використовуються: відкритий кінець хвилеводу, рупорні опромінювачі та ін. Амплітудний розподіл поля в апертурі антени з даними видами опромінювачів можна описати наступним 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 $u = 0,5 kd_A \sin \theta$; $k = 2\pi/\lambda$; $J_1(u)$, $J_2(u)$ – 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 ($\lambda = c/f$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$).

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 $S_A = \pi \cdot d_A^2 / 4$ – площа круглої апертури з діаметром d_A , або безпосередньо в логарифмічному вигляді за формулою:

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

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

3.4 Енергетичний розрахунок супутникового каналу зв'язку.

Супутникова система зв'язку складається із двох ділянок Земля-ШСЗ й ШСЗ-Земля. Розрахунок її схожий на розрахунок РРС прямої видимості, що має два інтервали. Однак у супутникових системах необхідно враховувати особливості апаратурних відмінностей на цих ділянках, а також різних енергетичних потенціалів і шумів на цих ділянках.

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

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

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

де:

- $G_{\text{пер}}$ й $G_{\text{пр}}$ - коефіцієнт підсилення антен;
- $\eta_{\text{пер}}$ $\eta_{\text{пр}}$ - 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:

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

$$P_{\text{ш}\Sigma} = k T_{\Sigma} \Delta f_{\text{ш}} \quad (3.15)$$

Для всієї лінії з ШСЗ

$$\left(\frac{P_{\text{ш}}}{P_c}\right)_{\Sigma} = \left(\frac{P_{\text{ш}}}{P_c}\right)_{\text{З-С}} + \left(\frac{P_{\text{ш}}}{P_c}\right)_{\text{С-З}} \quad (3.16)$$

Для ділянки Земля-Супутник

$$\left(\frac{P_{\text{ш}}}{P_c}\right)_{\text{З-С}} = \frac{(4\pi)^2 R^2 \frac{2}{\text{З-С}} \eta_{\text{перЗ}} \eta_{\text{прЗ}} k T_{\Sigma} \Delta f_{\text{шС}} U_{\text{З-С}}}{P_{\text{перЗ}} G_{\text{перЗ}} G_{\text{прЗ}} \lambda_{\text{З-С}}^2} \quad (3.17)$$

$$\left(\frac{P_{\text{ш}}}{P_c}\right)_{\text{С-З}} = \frac{(4\pi)^2 R^2 \frac{2}{\text{С-З}} \eta_{\text{перС}} \eta_{\text{прС}} k T_{\Sigma} \Delta f_{\text{шЗ}} U_{\text{С-З}}}{P_{\text{перС}} G_{\text{перС}} G_{\text{прС}} \lambda_{\text{С-З}}^2} \quad (3.18)$$

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

1. $R_{c-3}=R_{3-c}=R$.
2. $\eta_{перз}=\eta_{прз}=\eta_3$ й $\eta_{перс}=\eta_{прс}=\eta_c$.
3. $\Delta f_{шс}=\Delta f_{шз}$.
4. $U_{3-c}=U_{c-3}=1$.

Тому можна записати

$$\left(\frac{P_{ш}}{P_c}\right)_{\Sigma} = 16\pi^2 R^2 \eta_3 \eta_c K \cdot \Delta f_{шз} \cdot \left(\frac{T_{с\Sigma}}{P_{перз} G_{перз} G_{прс} \lambda_{3-c}^2} + \frac{T_{з\Sigma}}{P_{перс} G_{прз} G_{прз} \lambda_{c-3}^2} \right). \quad (3.19)$$

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.

$$T_{з\Sigma} = T_{пр} + T_{АФТ} + \left(\frac{T_{АТМОС} + T_{КОС}}{\eta_3} \right) \quad (3.20)$$

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

$$T_{АФТ} = T_0(1 - \eta_3) \quad (3.21)$$

де: $T_0=290$ К - абсолютна температура;

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

$T_{КОСМ}$ - 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 $T_{КОСМ} = T_я$.

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

Шумова температура бортового приймача ШСЗ

$$T_{CS} = T_z + T_{атм} + bT_{косм} + T(3.23)_{пр.бор} \quad (3.23)$$

де: T_z - 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_{CS} велико, однак збільшуючи енергетичні параметри земного устаткування можна вважати, що велике значення T_{CS} несуттєвим.

3.5 Методи покращання енергетичних параметрів систем супутникового зв'язку та обґрунтування їх. Мультиплексування.

3.5.1 Методи мультиплексування в супутниковому зв'язку

Мультиплексування – це процес передачі інформації з більш ніж одного джерела в один сигнал через спільне середовище. Ми можемо мультиплексувати аналоговий або цифровий сигнал. Якщо аналогові сигнали мультиплекуються, то такий тип мультиплексора називають аналоговим мультиплексором. Якщо цифрові сигнали мультиплекуються, то такий тип мультиплексора називають цифровим мультиплексором. Перевага мультиплексування полягає в тому, що ми можемо передавати велику кількість сигналів на одне середовище. Цей канал може бути фізичним середовищем, таким як коаксіальний, металевий провідник або бездротова лінія, і йому доведеться обробляти кілька сигналів одночасно. Таким чином можна знизити вартість передачі. Незважаючи на те, що передача відбувається на одному каналі, вона не обов'язково відбувається в один і той же момент. Загалом мультиплексування — це техніка, за якої кілька сигналів повідомлень об'єднуються в складений сигнал, щоб їх можна було передавати по загальному каналу. Щоб передавати різні сигнали по одному каналу, важливо тримати їх окремо, щоб уникнути перешкод між ними, а потім їх можна легко розділити на приймальній стороні.

Домени, в яких може здійснюватися мультиплексування, - це час, фаза, довжина хвилі частоти тощо. Схеми мультиплексування називаються мультиплексорами або мультиплексорами.

Види мультиплексування: аналогові та цифрові.

Мультиплексування з частотним поділом - це мережева техніка, яка об'єднує багато сигналів в один, а потім передає об'єднаний сигнал через загальний канал зв'язку. На стороні приймача виконується протилежний процес, відомий як демультиплексування, який витягує сигнали окремих каналів. Тут сторона передавача виконує мультиплексування, а сторона приймача виконує демультиплексування. У FDM загальна пропускна здатність, доступна в середовищі зв'язку, розділена на серію частотних діапазонів, що не перекриваються. Кожна з цих смуг використовується для передачі окремого сигналу. У FDM всі користувачі постійно використовують один і той же загальний канал. Але кожному з користувачів виділяються різні частоти для передачі, щоб уникнути перешкод сигналу. Іноді існує можливість перехресних розмов, оскільки всі користувачі використовують середовище передачі одночасно. Мультиплексування і демультиплексування WDM подібні до заломлення світла через призму.

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.

3.5.2 Переваги WDM

1. У WDM можлива повнодуплексна передача.
2. Його легше переналаштувати.
3. Оптичні компоненти більш надійні та забезпечують більш високу

пропускну здатність.

4. Забезпечте високий рівень безпеки та швидший доступ до нового каналу.
5. Низька вартість і просте розширення системи.
6. Одночасна передача різних сигналів.

3.5.3 Недоліки WDM

Масштабованість викликає занепокоєння в якості завершення оптичної лінії (OLT); оптична кінцева лінія повинна мати масив передавачів з одним передавачем для кожного блоку оптичної мережі (ONU). Додавання нового ONU може бути проблемою, якщо передавачі не були підготовлені заздалегідь. Кожна ONU повинна мати лазер, що залежить від довжини хвилі.

Вартість системи зростає з додаванням оптичних компонентів. Неefективність використання BW, складність налаштування довжини хвилі та складність каскадної топології.

Мультиплексування з частотним поділом FDM ґрунтується на спільному використанні доступної пропускної здатності каналу зв'язку серед сигналів, що підлягають передачі. Це метод аналогового мультиплексування, який використовує єдине середовище передачі, яке поділено на кілька частотних каналів. Тут загальна пропускна здатність каналу повинна бути вище суми окремої пропускної здатності. Якщо канали розташовані ближче один до одного, можуть виникнути перехресні розмови; таким чином, необхідно реалізувати синхронізацію каналів. Для цього деяка пропускна здатність виділяється як захисна смуга; це невикористані канали, розміщені між послідовними каналами передачі, щоб уникнути перехресних розмов.

Для мультиплексування з частотним поділом, якщо вхідний сигнал є цифровим, його необхідно перетворити в аналоговий, перш ніж подавати його як вхід до модулятора.

Перевага мультиплексування FDM

1. Велика кількість сигналів (каналів) може передаватися одночасно.
2. Демодуляція FDM проста.
3. Для належної роботи FDM не потребує синхронізації між передавачем і приймачем.
4. Внаслідок повільного вузькосмугового завмирання впливає лише один канал.

Недоліки мультиплексування FDM

1. Канал зв'язку повинен мати дуже велику пропускну здатність.
2. Відбувається інтермодуляційне спотворення.
3. Потрібна велика кількість модуляторів і фільтрів.
4. FDM страждає від проблеми перехресних розмов.
5. Усі канали FDM страждають від широкосмугового завмирання.

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 використовується для передачі аналогового сигналу. Він не потребує синхронізації між передавачем і приймачем. Тут одночасно може передаватися велика кількість сигналів. Він страждає від проблеми перехресних розмов, і може мати місце інтермодуляційне спотворення.

FDM використовується в амплітудній модуляції (AM) і FM-мовленні, телефонних мережах загального користування та мережевих системах кабельного телебачення.

Волоконно-оптичний зв'язок вимагає іншого типу мультиплексора, який називається мультиплексором з поділом довжини хвилі (WAD) . Це метод аналогового мультиплексування. Він розроблений для оптоволоконного кабелю з високою швидкістю передачі даних. У цій техніці пропускну здатність каналу

зв'язку повинна бути більшою, ніж сукупна пропускна здатність окремих каналів. Тут сигнали перетворюються на світлові; кожне світло з різною довжиною хвилі передається через один і той же волоконний кабель. Система передачі WDM ділить смугу пропускання оптичного волокна на ряд неперекриваються оптичних довжин хвиль; вони називаються каналами WDM. WDM зміщує всі вхідні сигнали з різною довжиною хвилі і передається по загальному каналу. Демультіплексор виконує зворотну операцію і розділяє довжини хвиль. Цей механізм мультиплексування забезпечує набагато більшу доступну потужність передачі.

3.6 РОЗРАХУНКИ КОСМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

При проектуванні систем космічного зв'язку важливо знати необхідну потужність передавача та розміри антен, як у космосі, так і на землі, що дозволить забезпечити адекватний ефективний зв'язок із прийнятним співвідношенням сигнал/шум або частотою бігових помилок.

На щастя, зв'язок у космосі, як правило, є прямою видимості без проміжного поглинання та малого розсіювання середовищ. Тому досить точно розрахувати та передбачити фактичні параметри зв'язку легко.

Основний фізичний принцип, який лежить в основі будь-якої космічної комунікації, - це закон зворотних квадратів. Це виражає той факт, що все електромагнітне випромінювання поширюється під час свого поширення і має інтенсивність, пропорційну зворотному (або оберненому) квадрату відстані від джерела. Математично це виражається так:

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

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

Цей закон графічно проілюстровано нижче.

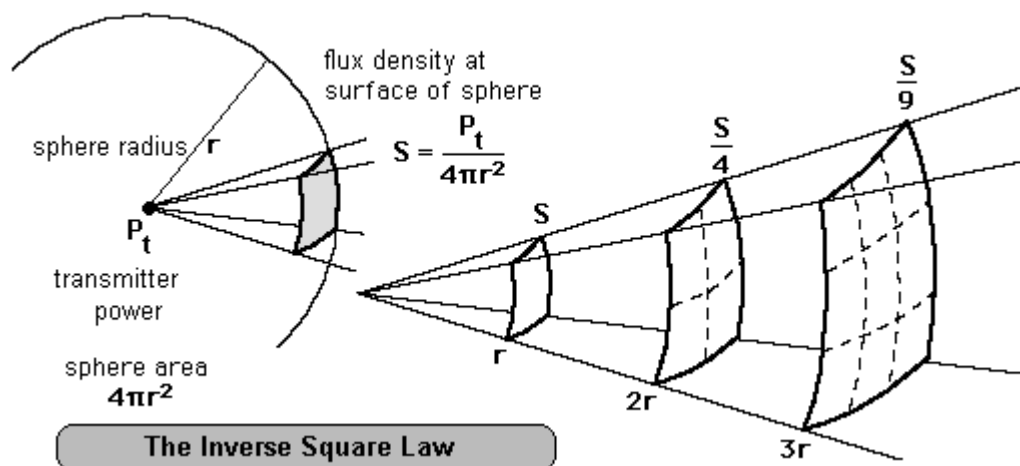


Рис. 3.2. Закон зворотних квадратів

На відстані r промінь проходить через площу A . На відстані $2r$ промінь проходить через площу $4A$, а на відстані $3r$ промінь проходить через площу $9A$. Видно, що площа збільшується як квадрат відстані. Якщо не відбувається поглинання енергії пучка, однакова потужність повинна проходити через кожену 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? Уявіть, що у нас є ізотропний випромінювач, передавач, який передає потужність P_t рівномірно в усіх напрямках. Якщо ми також уявимо сферу, що оточує передавач, з передавачем у його центрі, то потужність у кожній точці сфери буде однаковою. Тепер ми знаємо, що повна площа поверхні кулі радіуса r дорівнює $4\pi r^2$. Через цю область повинна проходити вся передана потужність, тому щільність потоку сигналу на поверхні сфери дорівнює:

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

Це також показано на малюнку нижче.

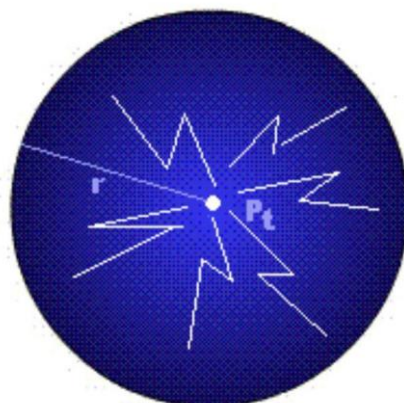


Рис. 3.3. Константа пропорційності

Вся енергія, що випромінюється ізотопний передавач потужність P_t 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:

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

Примітка. Якщо ми уважно розглянемо це питання, ми побачимо, що закон обернених квадратів є наслідком того, що ми живемо у тривимірному Всесвіті. У двовимірному всесвіті ми мали б обернений закон відстані, де $S_{2D} = P_t / (2\pi r)$. Тобто в 2D потужність падає як обернена відстань, а не зворотний квадрат відстані (це означає, що потужність падає з меншою швидкістю).

Дуже мало передавальних систем є ізотропними випромінювачами. Зазвичай вони посиляють сигнали в промені, який концентрує потужність уздовж прицілу антени за рахунок зменшення сигналу в інших напрямках. Промінь має ширину променя, яка може бути широкою (якщо коефіцієнт посилення антени низький) або вузькою (коли коефіцієнт посилення антени високий).

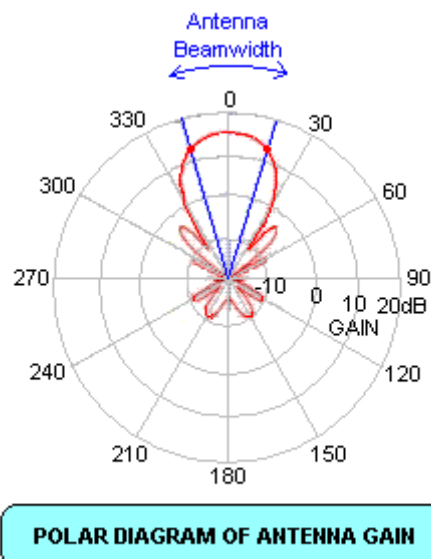


Рис. 3.4. Коефіцієнт посилення антени

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 розходить з віддаленістю від випромінювача. Для неізотропного випромінювача з коефіцієнтом посилення антени G_t ми використовуємо «ефективну» потужність випромінювання (потужність у центрі променя), де:

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

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

На приймальному кінці розташована антена, яка перехоплює частину переданої потужності. Основним параметром, пов'язаним з приймальною антеною, є її ефективна площа. Для параболічної антени, як показано на схемі, ефективною площею є частка «е» фізичного поперечного перерізу, який антена представляє для вхідного сигналу. Таким чином, частка "е" називається ефективністю антени. Для іншого типу антени ефективну площу можна визначити, як описано далі.

Тепер одиницями щільності потоку є ват на квадратний метр ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$), а одиницями площі є квадратні метри. Потужність (у ватах), яку збирає антена, є таким чином помноженою на щільність потоку ефективну площу збору антени:

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

Підставляючи S і A_e , знаходимо, що:

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

Тепер у будь-якій системі прийому ця потужність сигналу повинна боротися з потужністю шуму. Цей шум може виникати від зовнішніх джерел, але він також неминуче створюється в приймачі звичайними електронними процесами, пов'язаними з активними пристроями, такими як транзистори, які необхідні для посилення сигналу. Навіть резистори створюють шум, і цей шум пропорційний температурі резистора. Таким чином, зазвичай говорять про шумову температуру приймача як температуру узгодженого резистора, підключеного до ідеального (безшумового) приймача, який генерує ту саму вихідну шумову потужність, що й фактичний приймач.

Ця потужність шуму задається математично за формулою:

$$P_n = k B T, \text{ де} \quad (3.20)$$

k – константа (звана постійною Больцмана),

B – смуга пропускання приймача (в Гц), а

T – еквівалентна шумова температура приймаючої системи.

У одиницях СІ k має значення $1,38 \times 10^{-23}$.

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:

$$P_r > n P_n \quad (3.21)$$

Значення $n = P_r / P_n$ зазвичай називають відношенням сигнал/шум або SNR (хоча альтернативним визначенням ССШ є $\text{ССШ} = (P_r + P_n) / P_n$). 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 голосового зв'язку ССШ має бути більше 3 дБ, щоб сигнал взагалі був зрозумілий. Значення 10 дБ, як правило, є мінімальним бажаним ССШ, а ССШ 20 дБ ($n=100$) необхідне для сприйняття «безшумного» зв'язку. Для зображення телевізора без шумів може знадобитися ще вищий ССШ. Однак для деяких типів модуляції, зокрема для модуляції «розширеного спектру», все ще можна декодувати сигнал для значень n менше 1 (тобто негативних значень ССШ в децибелах).

ССШ обчислюється з виразу:

$$n = P_r / P_n = e D^2 G_t P_t / (16 r^2 k B T) \quad (3.22)$$

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:

$$A_e = \lambda^2 G / (4 \pi) \quad (3.23)$$

або

$$e D^2 = \lambda^2 G / \pi^2 \quad (3.24)$$

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

Примітка: інженери часто використовують «логарифмічні» версії цих формул, щоб кількості можна було додавати та віднімати, а не множити та ділити. З комп'ютерами це більше не потрібно. У багатьох інженерних підручниках зі зв'язку також дається вираз для втрат на шляху «вільного простору» в децибелах, які залежать від частоти. Це повністю оманливе, оскільки ми довели вище, що втрати вільного простору повністю пов'язані з геометрією простору і є незалежними довжини хвилі або частоти. Причина, чому інженери плутаються, полягає в тому, що вони використовують неправильний параметр для приймальної антени. Вони

використовують підсилення замість площі збору, і в процесі вводять залежність підсилення від довжини хвилі, яку вони потім помилково приписують втратам у вільному просторі. Ці рівняння працюють, але дають оманливу картину фізичної ситуації.

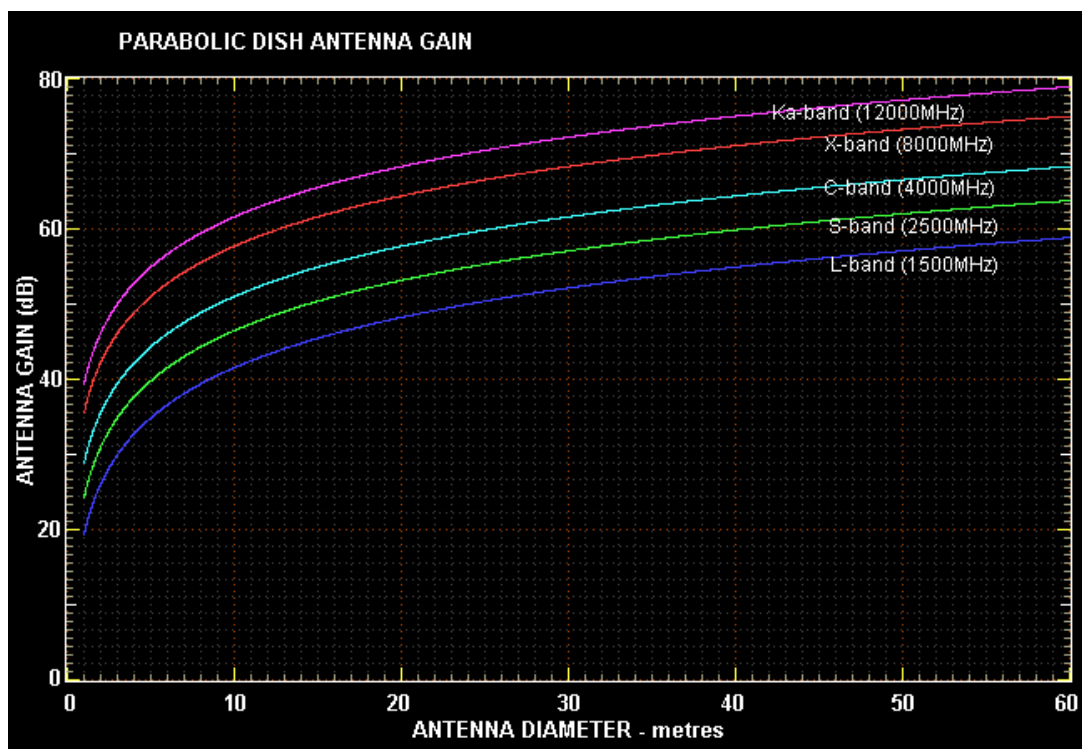


Рис. 3.5. Залежність ширини променя від діаметра антени

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

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

де

θ - ширина променя в радіанах;

λ – робоча довжина хвилі в метрах;

a - апертура в метрах

Зверніть увагу, що $\lambda(m) = 300 / \text{частота (МГц)}$

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.

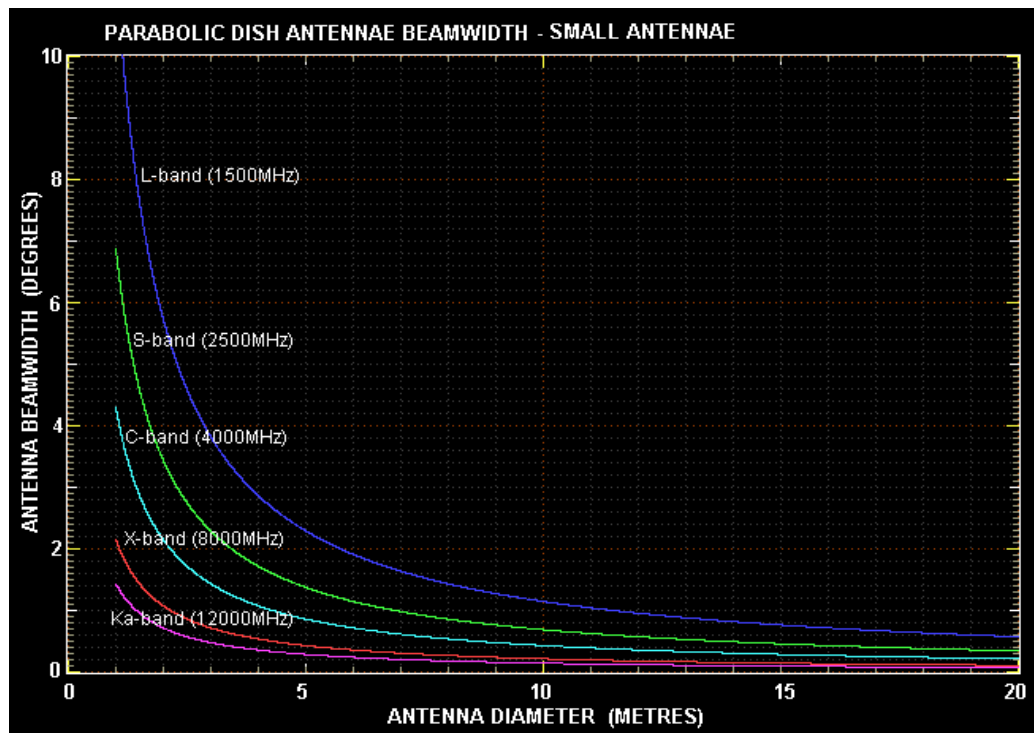


Рис. 3.6. Зміна діаметра антени

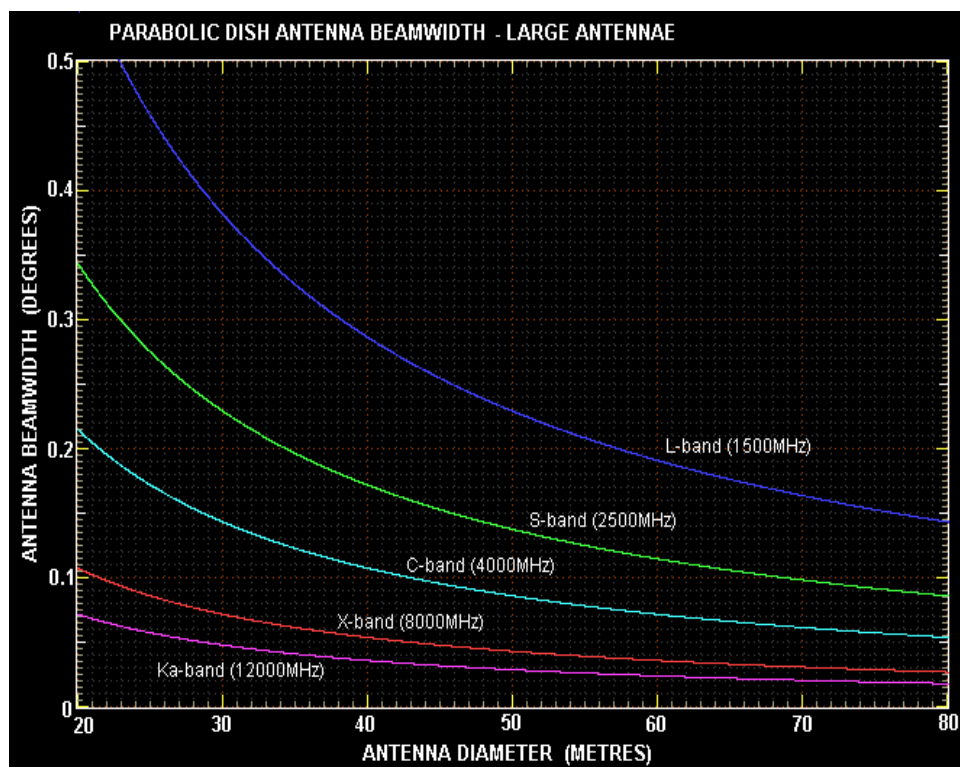


Рис. 3.7. Залежність ширини променя від діаметра антени

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

На Міжнародній космічній станції (МКС) проводиться радіоаматорський експеримент, за допомогою якого школи та радіоаматори можуть спілкуватися з астронавтами. МКС обертається навколо Землі на висоті близько 400 км. Це в нижньому кінці діапазону орбіт, який називається низькою орбітою Землі (НОЗ). На цій висоті атмосферний опір є значним, і орбіту МКС необхідно періодично підвищувати, щоб не дати їй повернутися на Землю. Таким чином, орбітальна висота може змінюватися приблизно від 350 до 450 км.

Однією з проблем зв'язку від Землі до НОЗ є те, що супутник рухається швидко, і що відстань до супутника змінюється значною мірою від того, коли він знаходиться над головою, до того, коли він знаходиться на горизонті – див. діаграму нижче:

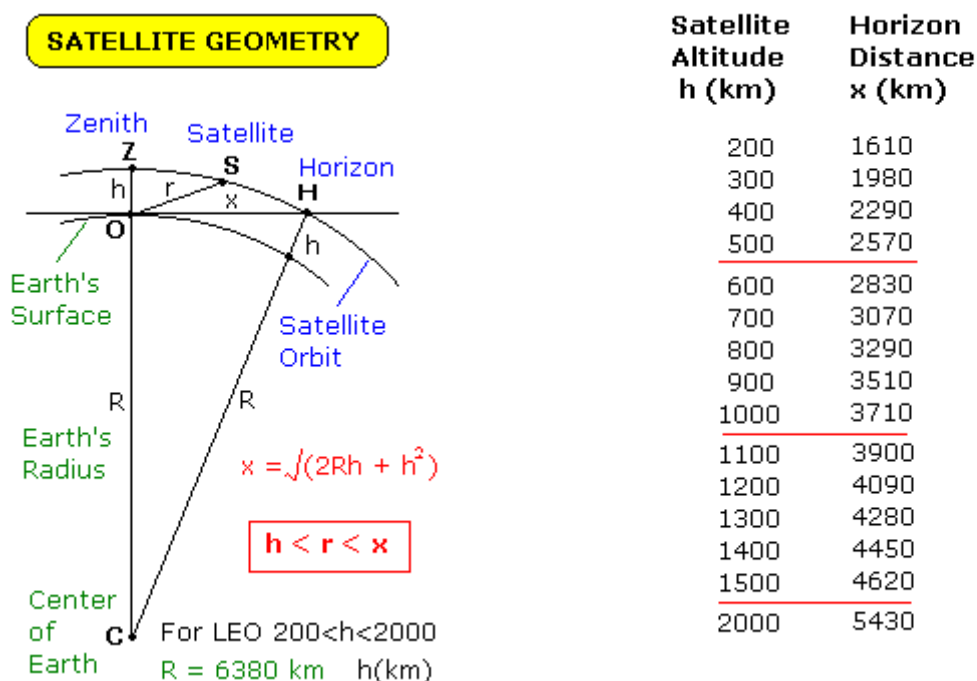


Рис. 3.8. Вимір затримки сигналу

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 напрямку на МКС, коли вона проходить через небо комунікатора, може стати проблемою для недорогого зв'язку, якщо потрібна спрямована антена. Це пов'язано з тим, що спрямована антена мала б стежити за МКС під час її руху. На щастя, використовується низька частота (145,825 МГц) дозволяє використовувати ручні радіоприймачі з майже всеспрямованими штриховими антенами.

Таким чином, наша задача для обчислення полягатиме у визначенні отриманого SNR для діапазону відстаней, на яких має відбуватися зв'язок. Ми зробимо це для трьох потужностей передачі, 1 Вт, 3 Вт і 5 Вт, які є типовими для потужностей, які можуть використовувати прості аматорські ручні трансивери. Це ефективні випромінювані потужності, які можуть бути результатом потужності передачі, яка вдвічі менша за коефіцієнт посилення антени в два рази. Ми також припускаємо чітку лінію видимості між наземним комунікатором і МКС. Результати показані на графіку нижче:

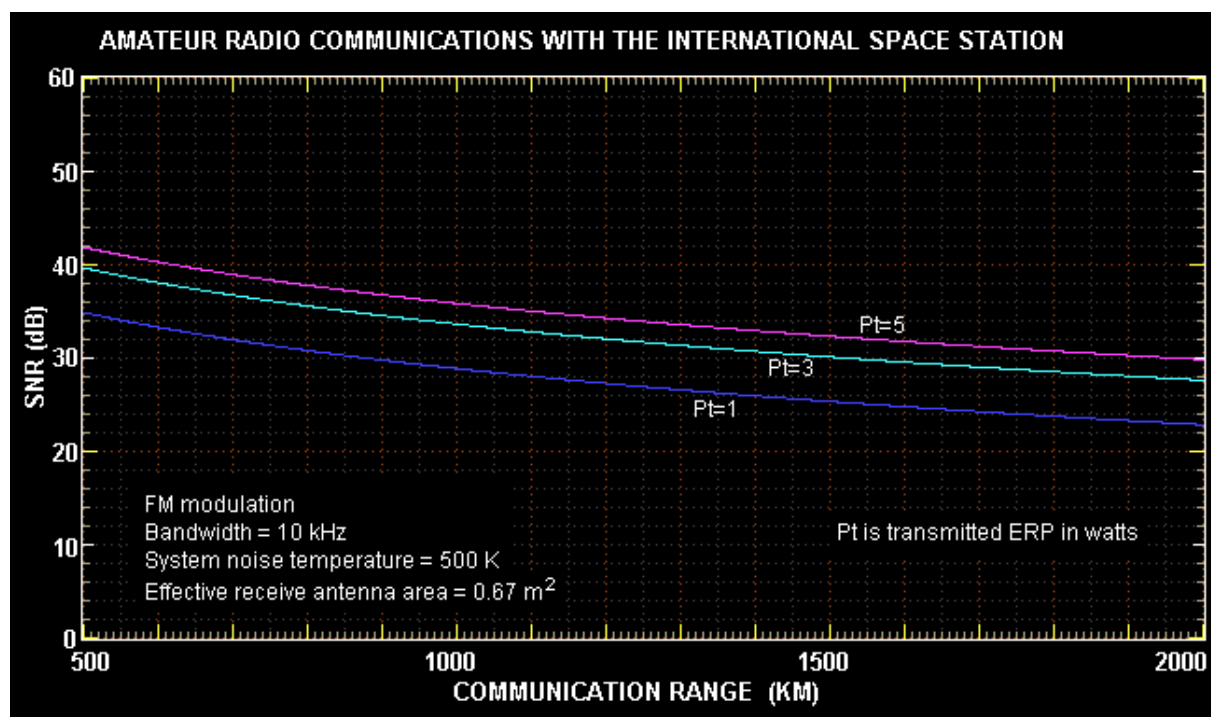


Рис. 3.9. Аматорський радіозв'язок з МКС

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 низькоорбітальний супутник може обертатися на висоті близько 800 км. З наведеної вище таблиці це призведе до діапазону понад 3000 км під час проходження наземної станції.

Розглянемо випадок метеорологічного супутника на полярній орбіті на висоті 800 км і передає зображення низької роздільної здатності на УКХ (137 МГц) і зображення високої роздільної здатності в L-діапазоні (1700 МГц). Припустимо, що кожен передавач випромінює з ефективною потужністю 5 Вт. Для приймача нам знадобиться смуга пропускання 70 кГц і шумова температура системи 300 К.

Для цієї справи розглянемо SNR, що є результатом використання 3 різних підсилення антени прийому. Один на 3 дБ, що ми очікуємо від всепрямованої антени без відстеження, 13 дБ, що є типовим підсиленням для 10-елементної антени Ягі, і 27 дБ підсилення антени. Останнього можна досягти в L-діапазоні за допомогою антени 1,5 м, тоді як для отримання такого посилення на УКХ-

діапазоні знадобиться набагато більша антена, або, як альтернатива, величезна кількість.

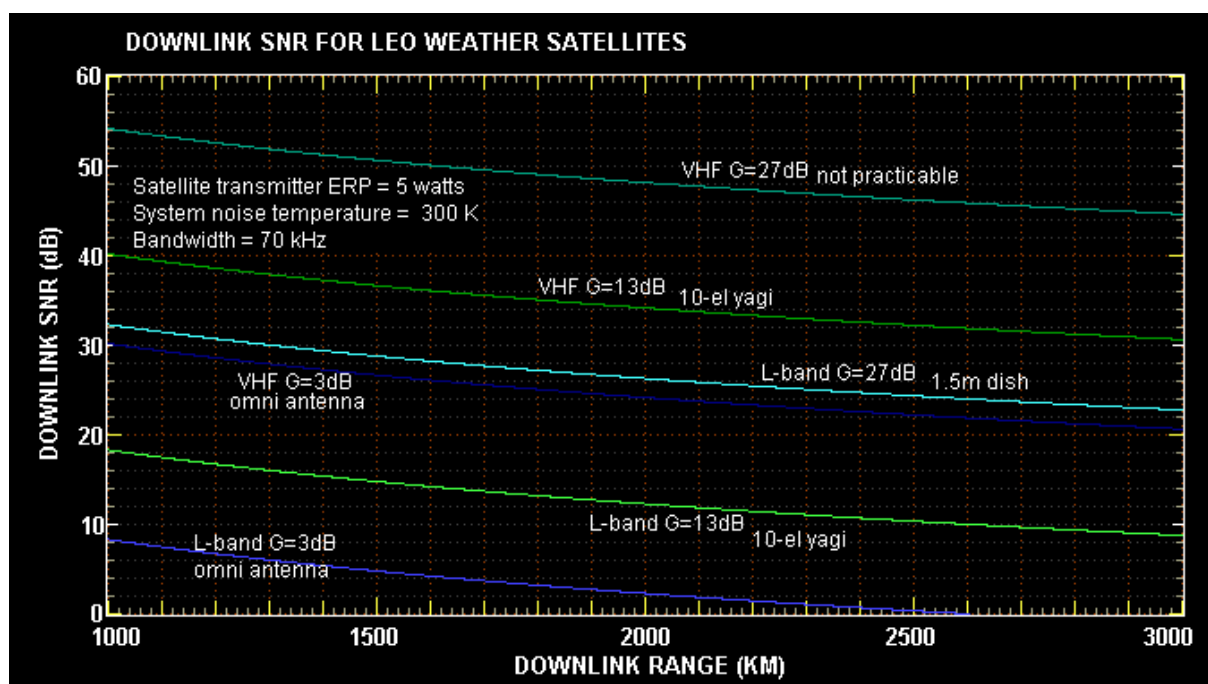


Рис. 3.10. ССШ на НОЗ

Ми відразу бачимо, що антену без відстеження можна використовувати на частоті УКХ, але не в L-діапазоні. Нам дійсно потрібні 27 дБ (тарілка 1,5 м) у L-діапазоні, щоб отримати якісний сигнал. Це означає, що в діапазоні L і вище потрібна антена відстеження, з усім додатковим обладнанням і витратами, які це тягне за собою.

Насправді в L-діапазоні ситуація ще гірша, ніж показано на малюнку вище, тому що нам потрібна пропускна здатність значно більше 70 кГц для завантаження зображень з високою роздільною здатністю. Це зменшує SNR. Щоб компенсувати це, супутниковий передавач L-діапазону випромінює значно більше потужності, ніж УКХ. Нам також допомагає природа в тому, що космічний шум, який встановлює шум нашої системи на УКХ, швидко зменшується з частотою і дозволяє використовувати нижчу системну шумову температуру в L-діапазоні.

Геосинхронні супутники обертаються на висоті 36 000 км. Така велика висота означає, що нам завжди потрібна спрямована антена для зв'язку геосупутника. Проте ми маємо два позиції на користь. Оскільки радіус орбіти в 6,6

разів перевищує радіус Землі, зміна діапазону від зеніту до горизонту не дуже велика (близько 17%). У наших розрахунках ми можемо припустити середню дальність 38 000 км. Друга перевага геосинхронної орбіти полягає в тому, що такий супутник залишається відносно багато на одному і тому ж місці в небі, і тому його не потрібно відстежувати. Це робить можливим пряме домашнє телевізійне мовлення за низькою ціною (оскільки антену можна зафіксувати в положенні для перегляду).

Геосинхронні низхідні лінії розрізняються за потужністю та пропускною здатністю. Пропускна здатність може бути дуже вузькою у випадку маяків до дуже великої у випадку телевізійних передач, ширина яких може становити 36 МГц. Потужність може варіюватися від кількох ват до сотень ват. На графіку нижче ми розглянемо, як SNR змінюється в залежності від потужності передачі (ERP) і пропускної здатності. Прийємо низьку шумову температуру системи прийому 50 К.

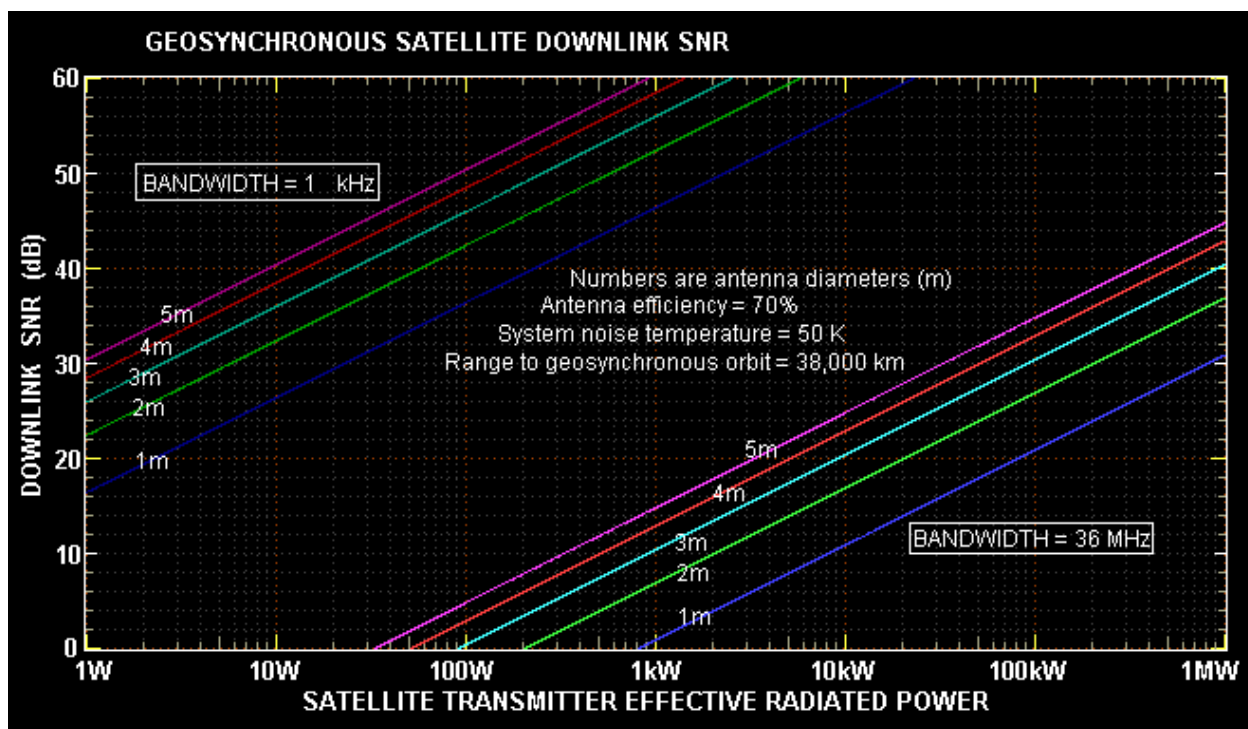


Рис. 3.11. Геосинхронний супутник НЛЗ

Зв'язок з Місяцем спрощується тим, що відстань від Землі до Місяця фактично постійна, незалежно від того, де на небі знаходиться Місяць. У наведеному ни

жче прикладі нас цікавить розмір наземної антени, який нам знадобиться для отримання даних від наукового пакета, залишеного на поверхні Місяця, разом із передавачем на один ват з ненаправленою антеною.

Хоча Земля завжди з'являється в одній і тій же точці на небі з фіксованого положення на Місяці, і, таким чином, антена з високим коефіцієнтом посилення, спрямована на Землю, не повинна відстежувати, вона повинна бути спрямована в правильному напрямку в першу чергу. Це може не бути проблемою для досконалих «приземників», але це може призвести до неможливого зниження ваги простого пакета.

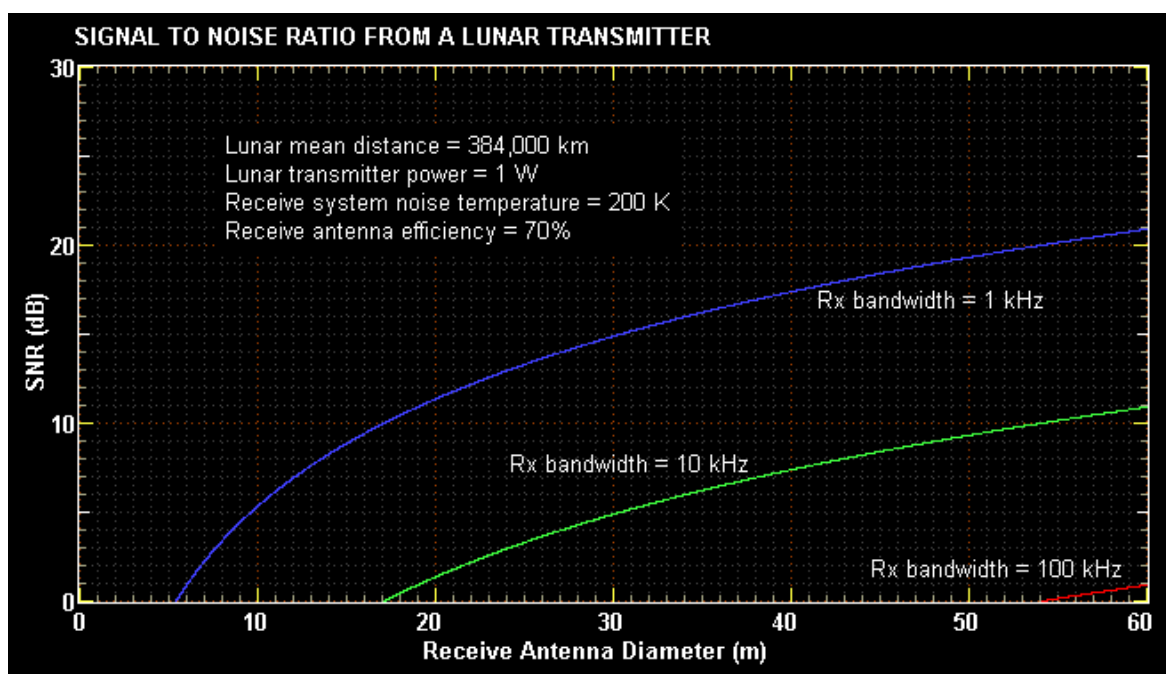


Рис. 3.12. ВСШ від місячного передавача

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 — орбіта, яка обертається навколо Сонця. Будь-який космічний зонд, надісланий для дослідження іншої планети, необхідно спочатку вивести на геліоцентричну орбіту перенесення, а потім перевести на планетоцентр

ичну орбіту. Зв'язок з космічним кораблем на будь-якій геліоцентричній орбіті передбачає набагато більші відстані, ніж на будь-якій орбіті навколо Землі.

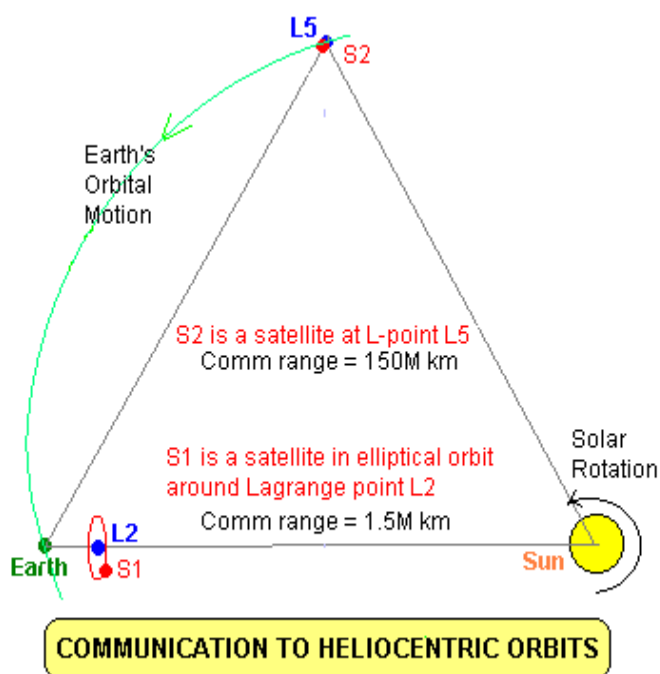


Рис. 3.13. Точки Лангража

Навколо будь-яких двох систем тіл (наприклад, Земля-Сонце) існують спеціальні гравітаційно стійкі точки. Точки Лагранжа Землі мають особливе значення для супутників. Точка L2 дозволяє безперешкодно безперервно спостерігати за Сонцем, а також дає можливість раннього виявлення сонячної космічної погоди до того, як вона вдариться про Землю (наприклад, поштовхи сонячного вітру та СМЕ). L5 корисний, оскільки він може бачити «позаду» Сонця і попереджати про великі активні області та сонячні плями, перш ніж вони повернуться в поле зору Землі.

Зв'язок до та з L5 не викликає особливих проблем, за винятком великої відстані. Однак, незважаючи на малу відстань, отримання даних з L2 є великою проблемою. Якщо ваша антена спрямована на L2, вона також спрямована на Сонце, і дуже висока температура Сонця (вона може досягати мільйона Кельвінів на

довжинах хвиль УКХ) визначає шумову температуру вашої системи прийому. Немає користі мати підсилювач з низьким рівнем шуму 50 К, якщо Сонце вводить 50 000 К шуму в систему.

З цієї причини жоден супутник ніколи не розміщується безпосередньо в точці L2. Замість цього він розміщений на еліптичній орбіті радіусом близько 100 000 км навколо точки L2. Площина орбіти перпендикулярна до прямої від Землі до Сонця. Таким чином, приймальній антені на Землі ніколи не доведеться спрямовувати на Сонце. З геометрії ситуації можна визначити, що такий супутник буде знаходитися приблизно в 100 000/1 500 000 радіан від Сонця. Це трохи менше 4 градусів. Наша антена, ймовірно, повинна мати ширину променя не більше ніж 1 градус, щоб гарантувати, що вона уникає гарячої корони Сонця, яка простягається на досить велику відстань над видимою поверхнею. З наведеної вище таблиці ми бачимо, що для S-діапазону нам знадобиться антена від 7 до 8 метрів, щоб досягти цього.

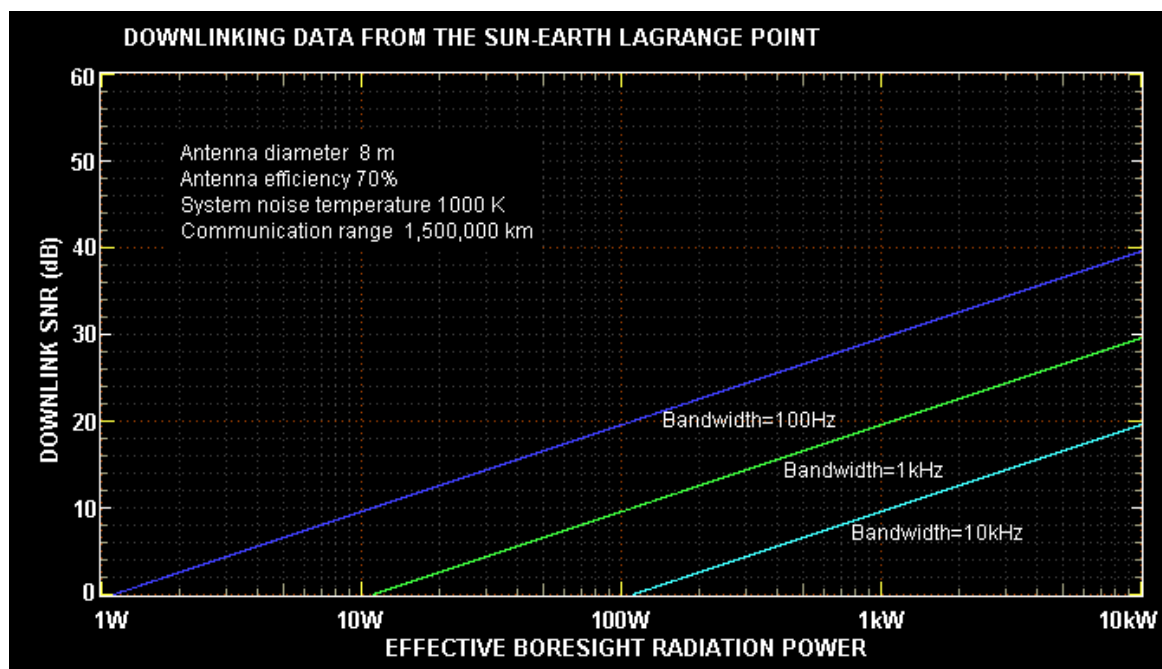


Рис. 3.14. Низхідні дані від точки Лангража Слнце-Земля

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.

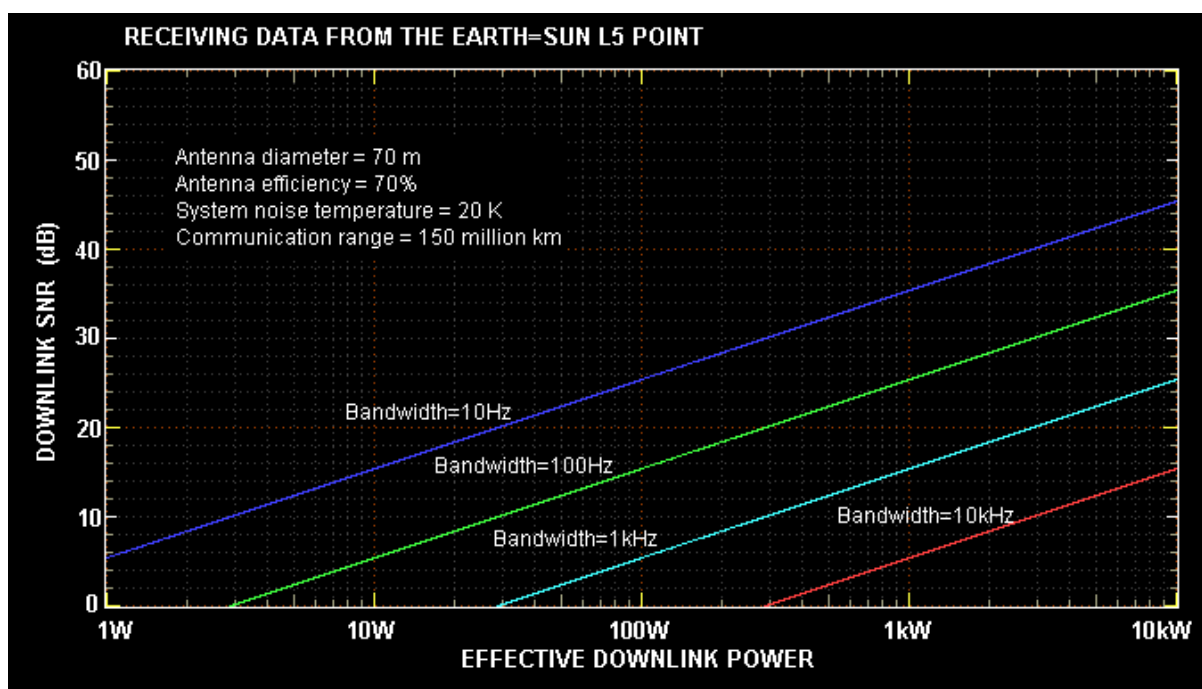


Рис. 3.15. Низхідні дані від точки Земля-Сонце L5

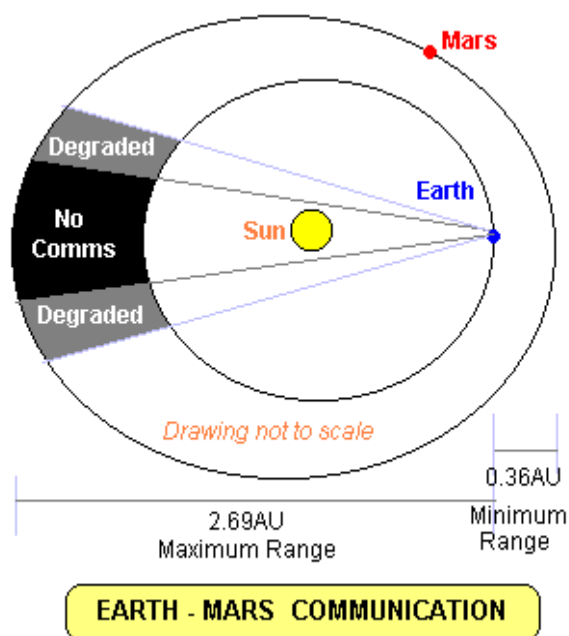


Рис. 3.16. Схема положення планет

Проблема зв'язку з планетами полягає в тому, що вони дуже далекі, їхня відстань від Землі надзвичайно різниться, оскільки вони та Земля обертаються навколо Сонця з різною швидкістю, і вони час від часу наближаються до Сонця та позаду

нього, що робить спілкування неможливе. Відстані вимірюються в АО (астрономічних одиницях), що становить трохи менше 150 мільйонів км.

Земля обертається навколо Сонця від 0,98 (перигелій) до 1,02 (афелій) а.о. Марс обертається по орбіті з перигелієм 1,38 і афелієм 1,67. (Марс має більш ексцентричну орбіту, ніж Земля). Це означає, що абсолютний мінімум і максимум відстані між Марсом і Землею становлять 0,36 і 2,69 а.о. Беручи до уваги орбіти та той факт, що зв'язок неможливий на абсолютному максимумі, більш типовий діапазон дальності зв'язку становить від 0,5 до 2,5 а.о. Це зміна в 5 разів, що призводить до зміни відношення сигнал/шум на 14 дБ.

Що стосується зв'язку L5, то лише найбільші антени та найнижчі підсилювачі шуму можуть забезпечити корисний SNR для завантаження цифрових даних з розумною швидкістю. Сторона висхідної лінії зв'язку завжди матиме набагато кращий SNR на космічному кораблі через набагато більшу потужність передавача, доступну від станції зв'язку на Землі.

3.7 Супутникове шифрування

Служба супутникового шифрування (ССШ)

ССШ може використовуватися як спеціальна служба передачі для передачі голосу, даних і відеотрафіку та широкосмугового мовлення, наприклад широкосмугового дистанційного навчання та трансляції даних/мультимедійних файлів. Послуга забезпечує повнодуплексну, напівдуплексну та симплексну (широкомовну) зашифровану передачу за допомогою супутників у діапазонах С, Ku та Ka.

ССШ забезпечує виділену та спеціальну (на основі резервування) зашифровану супутникову передачу. Ця передача може використовуватися будь-якими програмними службами на пропускній здатності, визначеній замовником, між двома або більше дистанційним навчанням, відео Національного комітету телевізійної системи (НКТС) з якістю мовлення та пов'язаним аудіо, цифровим

стиснутим відео та пов'язаним аудіо, включаючи визначені кінцеві точки зашифрованого зв'язку. З'єднання між місцями, які отримують цю послугу шифрування, встановлюється назавжди, якщо не буде отримано запит служби на зміну, переміщення або відключення.

Ця служба шифрування може використовуватися для таких програм, як голос, дані, відео та мультимедіа, і може включати державні наскрізні зашифровані комунікації. Як зазначалося раніше, SES також забезпечує широкосмугову зашифровану супутникову трансляцію на основі резервування, яку можна використовувати для багатьох додатків.

ССШ підключається до певних постійних або тимчасових місць (SDP, таких як приватна гілка, мультиплексор, маршрутизатор, відеокодек, наземна станція та інструмент оцінки безпеки напруги, як стаціонарний, так і переносний/розгорнутий) та взаємодіє з ними. Це призводить до того, що стратегія супутникового шифрування керується набором дій перед перемиканням (див. контрольний список: «Програма дій для послуги супутникового шифрування [ССШ] Precutover Activities »).

Загальні проблеми супутникового шифрування

Однією з проблем, спільних для всіх форм супутникового шифрування, є погіршення сигналу. Супутникові сигнали, як правило, передаються на великі відстані з використанням порівняно малопотужних передач, і часто доводиться боротися з багатьма формами перешкод, включаючи земну погоду, сонячне та космічне випромінювання та багато інших форм електромагнітного шуму. Такі збурення можуть спричинити появу помилок або пробілів у сигналі, який передає супутникову передачу від джерела до місця призначення. Залежно від обраного алгоритму шифрування, ця ситуація може бути особливо проблематичною для зашифрованих супутникових передач, оскільки все зашифроване повідомлення може бути безповоротно втрачено, якщо навіть один біт даних буде не на своєму місці. Щоб вирішити цю проблему, контрольну суму або криптографічну хеш-функцію можна застосувати до зашифрованого повідомлення,

щоб дозволити ідентифікувати та узгодити помилки після отримання. Однак такий підхід коштує – додавання контрольної суми або коду для виправлення помилок до зашифрованого повідомлення збільшує довжину повідомлення і, відповідно, збільшує час, необхідний для передачі повідомлення. Результатом, звичайно, є те, що фактична загальна комунікаційна пропускна здатність супутника зазвичай нижча за його теоретичну пропускну здатність через додатковий тягар, який накладається на його обмежені ресурси через ці накладні витрати .

Інша поширена проблема, пов'язана з двостороннім зашифрованим супутниковим зв'язком, стосується встановлення особи відправника повідомлення. Більшість сучасних супутників, наприклад, призначені для прийому та реагування на сигнали, які керують їхніми бортовими функціями. Такі супутники повинні бути впевнені, що контрольні сигнали, які вони отримують із землі, надходять від авторизованого джерела. На додаток до сигналів керування, відправники інших типів супутникових передач зазвичай також мають бути аутентифіковані. Наприклад, розвідувальна служба, яка отримує супутникову передачу від одного зі своїх оперативників, повинна підтвердити, що передача є справжньою. Щоб встановити особу відправника, повідомлення має бути зашифровано таким чином, щоб з точки зору одержувача, лише законний відправник міг закодувати повідомлення. гарантувати, що повідомлення захищено під час транспортування, і, таким чином, бажає, щоб лише авторизований одержувач міг декодувати повідомлення після отримання. Тому обидві сторони комунікації повинні погодитися використовувати алгоритм шифрування, який служить для ідентифікації автентичності відправника, забезпечуючи достатній рівень захисту повідомлення, поки воно передається до місця призначення. Хоча алгоритми шифрування без ключа можуть задовольняти цим двом критеріям, таких алгоритмів зазвичай уникають у супутниковому зв'язку, оскільки супутник може стати марним, якщо алгоритм шифрування без ключа буде скомпрометований, а заміна супутників коштує дорого. Ця проблема також поширюється на наземне

обладнання, яке використовується для шифрування супутникових сигналів перед передачею та дешифрування цих сигналів після отримання. Тому алгоритми ключового шифрування зазвичай використовуються для захисту інформації, що передається через супутник. Однак навіть ключові методи шифрування можуть бути проблематичними, коли справа доходить до супутникового зв'язку.

Щоб зрозуміти проблеми, пов'язані з шифруванням із ключем, спочатку можна розглянути випадок алгоритму шифрування із симетричним ключем, коли один і той самий ключ використовується як для кодування, так і для декодування повідомлення. Якщо сторона А хоче спілкуватися зі стороною В через супутник за допомогою цього методу, то і А, і В повинні домовитися про секретний ключ до початку зв'язку. Поки ключ залишається секретним, він також служить для аутентифікації обох сторін. Однак якщо сторона А також хоче спілкуватися зі стороною С, то А і С повинні домовитися про свій унікальний секретний ключ, інакше сторона В може маскуватися як А або С, і навпаки. Таким чином, підхід шифрування з ключем до двостороннього супутникового зв'язку вимагає, щоб кожна сторона встановила унікальний секретний ключ для кожної іншої сторони, з якою вони хотіли б спілкуватися. Щоб ще більше ускладнити цю проблему, кожна сторона повинна заздалегідь отримати всі свої секретні ключі, оскільки володіння відповідним ключем є необхідною передумовою для встановлення безпечного каналу зв'язку з іншою стороною.

Щоб вирішити ці проблеми, може бути прийнятий алгоритм шифрування з асиметричним ключем, у якому ключ, який використовується для шифрування повідомлення, відрізняється від ключа, який використовується для розшифрування повідомлення. Такий підхід вимагає, щоб кожна сторона підтримувала лише два ключі, один з яких зберігається приватним, а інший — загальнодоступним. Якщо сторона А хоче надіслати стороні В безпечну передачу, А спочатку запитує у В її відкритий ключ, який можна передати через незахищене з'єднання. Потім сторона А кодує секретне повідомлення, використовуючи відкритий ключ В. Повідомлення безпечне, оскільки лише закритий ключ В може декодувати

повідомлення. Щоб підтвердити себе перед B , потрібно тільки перекодувати повідомлення цілком, використовуючи її власний секретний ключ перш ніж надсилати повідомлення в B . Отримавши повідомлення, B може встановити, чи було воно надіслане A , тому що тільки закритий ключ A міг закодувати повідомлення, яке можна декодувати відкритим ключем A . Цей процес зображено на малюнку нижче.

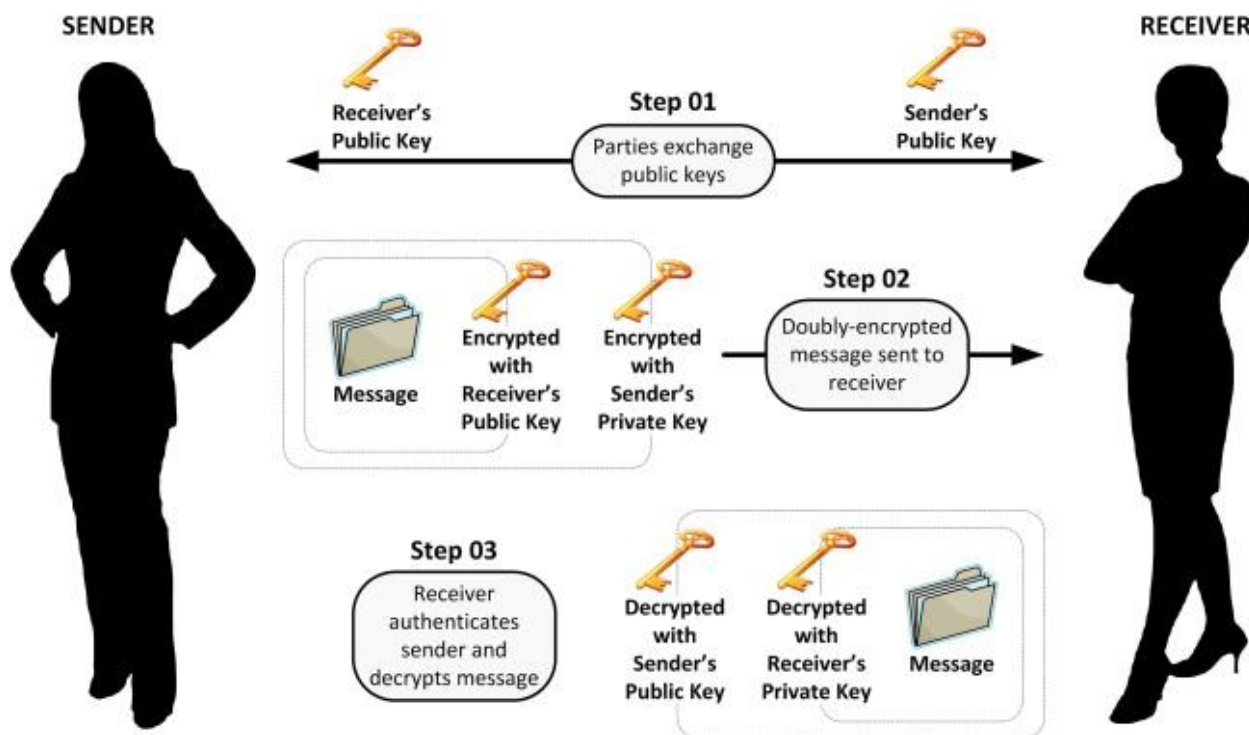


Рис. 3.17. Схема шифрування інформації

На жаль, навіть такий підхід до безпечного двостороннього супутникового зв'язку не є цілком надійним. Щоб зрозуміти, чому, подумайте, як злоумисник M може вставитися між A та B , щоб перехопити безпечне спілкування. Для ініціювання безпечної передачі, повинні запросити B відкритий ключ через незахищений канал. Якщо цей запит перехоплено M , то M може надати A свій власний (тобто M) відкритий ключ. Потім A зашифрує повідомлення відкритим ключем M , після чого повторно зашифрує результат першої операції шифрування за допомогою власного приватного ключа. Буде потім передавати зашифроване повідомлення B , який знову буде перехоплено M . Використання елементів a відкритий ключ в поєднанні з його власним ключем, M зможе розшифрувати та прочитати

повідомлення. *A* не знатиме, що повідомлення було перехоплено, а *B* не знатиме, що повідомлення навіть було надіслано. Зауважте, що перехопити захищене повідомлення особливо легко для *M* якщо він володіє або контролює супутник, через який маршрутизується повідомлення. На додаток до ризику перехоплення, алгоритми шифрування з асинхронним ключем зазвичай принаймні в 10 000 разів повільніше, ніж алгоритми шифрування з синхронним ключем – ситуація, яка може створити надзвичайно великий тягар для обмежених обчислювальних ресурсів супутника. Поки не буде розроблено засіб для динамічного та безпечного розподілу синхронних ключів, супутникове шифрування завжди вимагатиме компромісу між безпекою, складністю обчислень і простотою реалізації. [14]

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Джеффри Гайд, П'єр Л. Барджелліні, в довідкових даних для інженерів (дев'яте видання), 2002
Віджаякумар Нандалал
2. Кафедра електроніки та комунікаційної техніки, Інженерно-технологічний коледж Шрі Крішни, Коїмбатор, Тамілнад, Індія
РС. Сумалата
3. Кафедра електроніки та комунікаційної техніки, Інженерно-технологічний коледж Шрі Крішни, Коїмбатор, Тамілнад, Індія.
4. Супутникові спостереження довкілля Землі
Прискорення переходу досліджень до операцій (2003)
5. Порухення тропосфери: вимірювання та пом'якшення
Раджат Ачарья, у книзі Поширення супутникового сигналу, погіршення та пом'якшення, 2017.
6. Супутниковий зв'язок
Кеннет М. Петерсон, в Енциклопедії фізичної науки і техніки (третє видання), 2003 р.
7. Основи оптичних комунікаційних систем у вільному просторі, оптичних каналів, характеристик та технології мережі/доступу
Арун К. Маджумдар, у книзі Optical Wireless Communications for Broadband Global Internet Connection, 2019
8. Прийом сигналу
Уолтер Січіора, ... Майкл Адамс, у сучасній технології кабельного телебачення (друге видання), 2004
9. Системи супутникового зв'язку А. М. Бонч-бруевич, В. Л. Биков, Л. Я. Кантор та інші; ред. Л. Я. Кантора: Навч. довідник для вузів. – М.: Радіо та зв'язок, 1992 – 224 с.
10. ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ, «Розрахунок та аналіз супутникового каналу зв'язку», М.Б. Проценко, І.Ю. Рожновська.

11. Мордухович Л.Г., Степанов А.П. Системи радіозв'язку. Курсове проектування: Навч. довідник для вузів. – М.: Радіо та зв'язок, 1987- 192.
12. Гнатушенко, В.В. Системи супутникового та стільникового зв'язку [Текст]: навч. посіб. / В.В. Гнатушенко, О.О. Дробахін, В.М. Корчинський. – Д.: РВВ ДНУ, 2012. – 80 с.
13. Антонова І.В. «Супутникові системи методи та покращення енергетичних параметрів» Бакалаврська робота 2020.
14. Супутникове шифрування. Деніел С. Сопер , у Довіднику з комп'ютерної та інформаційної безпеки (третє видання) , 2013
15. Теза Антонов І.В. «ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАЧІ ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ У СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ» 2021 р.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ