ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи використання платформ мікро та нано супутників в низькоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних мережах»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

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



(підпис) Владислав СЮРВАСЄВ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-62
Владислав СЮРВАСЄВ

Керівник: Лариса ДАКОВА

Рецензент: О. Варфоломеєва

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій
_____ Наталія РУДЕНКО
"___" _____ 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сюрвасєву Владиславу Валерійовичу

1. Тема роботи: "Методи використання платформ мікро та наносупутників в низькоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних мережах",
Керівник кваліфікаційної роботи Лариса ДАКОВА, к.т.н., доц.
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 №145.

2. Строк подання студентом роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Загальні відомості про способи утворення мережі NTN.
2. Архітектура «розподіленого супутника» для низкоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних систем на основі групування мікро- і наносупутників.
3. Багатопроменеві супутникові мережі з підтримкою 5G NR.
4. Система зв'язку для наносупутникового спостереження Землі.
5. Науково-технічна література.

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

1. Аналіз сучасних супутникових групувань з підтримкою 5G NR.
2. Недоліки та проблеми реалізації низкоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних систем.
3. Концепція та етапи реалізації LEO-систем Інтернету Речей (IoT).
4. Застосування «розподіленого супутника» у телекомунікаційних системах.
5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	17.10.23	Викон.
2.	Аналіз сучасних супутникових групувань з підтримкою 5G NR.	30.10.23	Викон.
3.	Багатопроменева модель NTN 5G NR	10.11.23	Викон.
4.	Проблеми реалізації низкоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних систем	22.11.23	Викон.
5.	Архітектура «розподіленого супутника»	06.12.23	Викон.
6.	Система зв'язку для наносупутникового спостереження Землі	09.12.23	Викон.
7.	Висновки, вступ, реферат	18.12.23	Викон.
8.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти  Владислав СЮРВАСЄВ

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи  Лариса ДАКОВА

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 84 с., 41 рис., 13 табл., 37 дж.

Мета роботи – аналіз системи зв'язку для наносупутникового спостереження землі, що дозволяє використовувати супутники класу мікросупутник та наносупутник (куб-сат) для створення складних інформаційно-телекомунікаційних систем космічного базування.

Об'єкт дослідження – архітектура низькоорбітальних космічних мереж.

Предмет дослідження – архітектура «розподіленого супутника» на основі мікро- і наносупутників, що пов'язані в багаторівневу гетерогенну розподілену обчислювальну хмарну структуру.

Короткий зміст роботи: У магістерській роботі пропонується система зв'язку для попереднього проектування системи наносупутникового спостереження Землі як корисних інструментів для управління та покращення різних аспектів регіональних і національних ресурсів. У процесі аналізу було запропоновано процес проектування низькоорбітальної наносупутникової системи зв'язку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СУПУТНИКОВА МЕРЕЖА, МІКРОСУПУТНИК, НАНОСУПУТНИК, РОЗПОДІЛЕНИЙ СУПУТНИК, 5G/IOT, LEO-СИСТЕМА

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 84 pages, 41 pictures, 13 table, 37 sources.

The purpose of the work - analysis of the communication system for nanosatellite earth observation, which allows the use of satellite class microsatellite and nanosatellite (cube-sat) to create complex space-based information and telecommunication systems.

Object of research – architecture of low-orbit space networks.

Subject of research – "distributed satellite" architecture based on micro- and nanosatellites connected in a multi-level heterogeneous distributed computing cloud structure.

Summary of the work: The master's thesis proposes a communication system for the preliminary design of a nanosatellite Earth observation system as a useful tool for managing and improving various aspects of regional and national resources. In the process of analysis, the process of designing a low-orbit nanosatellite communication system was proposed.

KEYWORDS: SATELLITE NETWORK, MICROSATELLITE, NANOSATELLITE, DISTRIBUTED SATELLITE, 5G/IOT, LEO SYSTEM

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

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

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

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка

освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Методи використання платформ мікро та наносупутників в низькоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних мережах

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника магістерської роботи

Здобувач Сюрвасєв Владислав Валерійович під час написання магістерської роботи показав гарну теоретичну підготовку, володіння необхідними знаннями у сфері супутникових телекомунікаційних технологій, вміння користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Магістерська робота виконана на високому рівні і заслуговує оцінку «добре», а студент Сюрвасєв Владислав Валерійович - присвоєння кваліфікації «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Лариса ДАКОВА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2023 року

Висновок кафедри про магістерську роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Сюрвасєв В.В.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2023 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Сюрвасєва Владислава Валерійовича

на тему: "Методи використання платформ мікро та наносупутників в низькоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних мережах"

Актуальність:

Концепція застосування супутникового сегмента 5G інтегрується з іншими мережами мобільного та фіксованого зв'язку. Супутниковий сегмент буде сприяти характеристикам глобальності, збільшення можливостей послуг 5G і вирішення проблем, пов'язаних з підтримкою зростання мультимедійного трафіку, повсюдного покриття, між машинного зв'язку і критично важливих телекомунікаційних місій. У магістерській роботі детально вивчені принципи багатопроменевої супутникової мережі з підтримкою 5G NR, проаналізовано концепції супутникових технологій із застосуванням низькоорбітальних супутникових мереж на основі платформ мікро та наносупутників.

Позитивні сторони:

У магістерській роботі показано, що рознесення функціональних елементів цільової корисного навантаження супутникової системи за декількома фізично відокремленими елементами дозволяє впросити відновлення працездатності системи та створити умови для вдосконалення системи в процесі експлуатації.

Проведені дослідження свідчать про високий науково-технічний рівень використання інформаційних технологій в даному дослідженні.

Робота викладена науковою мовою, логічно й послідовно відбиває мету та поставлені в роботі завдання. Пояснювальна записка відповідає стандартам до її оформлення.

Недоліки:

1. Не наведені технологічні особливості та характеристики кубсатов.
2. В роботі занадто багато уваги приділено теоретичній інформації про «розподілений супутник».

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «добре», а студент Сюрвасєв Владислав Валерійович - присвоєння кваліфікації «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент: к.т.н., доц. (Варфоломеєва)

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

ЗМІСТ

ВСТУП 10
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПОСОБИ УТВОРЕННЯ МЕРЕЖІ NTN 13
1.1 Роль неназемних мереж 13
1.2 HAPS 15
1.3 Типи супутникових орбіт 20
1.4 Особливості передачі сигналів в космічному просторі 24
1.5 Діапазони робочих частот систем зв'язку через ШСЗ 26
2. ПОСЛУГИ ПО БАГАТОПРОМЕНЕВИМ НЕНАЗЕМНИМ МЕРЕЖАМ З ПІДТРИМКОЮ 5G NR 29
2.1 Мережі радіодоступу для NR NTN 29
2.2 Послуги та системні аспекти NR NTN 33
2.3 Багатопроменева модель NTN 5G NR 36
2.4 Сценарій розгортання NTN мережі за допомогою низькоорбітальних угрупувань 42
3. СТВОРЕННЯ АРХІТЕКТУРИ «РОЗПОДІЛЕНОГО СУПУТНИКА» ДЛЯ НИЗКООРБІТАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ГРУПУВАННЯ МІКРО- І НАНОСУПУТНИКІВ 48
3.1 Застосування «розподіленого супутника» в радіолокаційних системах із синтезованою апертурою (SAR-система) 48
3.2 Застосування «розподіленого супутника» у телекомунікаційних системах 54
3.3 Реалізація LEO-системи Інтернету Речів (IoT) на основі концепції «розподіленого супутника» 60
4. СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ НАНОСУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ 63
4.1 Технологічні та інженерні аспекти місій спостереження Землі наноспутниками: використання, тенденції та вдосконалення 63
4.2 Наносупутникова система спостереження Землі 66

4.3 Основи дизайну 70
4.4 Антени на борту супутників: визначення, класифікація та вимоги до напрямленості 80
4.5 Характеристики сигналів квадратурного фазового зрушення 83
4.6 Проектування приймача QPSK 86
4.7 Діаграма сузір'я та Помилка фази 89
4.8 Формування Імпульсу та Вивчення Миттєвого Амплітудного Сигналу 91
ВИСНОВКИ 93
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 95
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 98

ВСТУП

Термін «наносупутник» застосовується до штучного супутника з масою від 1 до 10 кг. Конструкції та запропоновані конструкції цих типів можуть бути запущені окремо, або вони можуть мати кілька наносупутників, які працюють разом або утворено, і в цьому випадку іноді може застосовуватися термін «супутниковий рій» або «фракціонований космічний корабель». Деякі конструкції вимагають більшого «материнського» супутника для зв'язку з наземними контролерами або для запуску та стикування з наносупутниками. Станом на серпень 2021 року було запущено понад 1600 наносупутників.

CubeSat — це звичайний тип наносупутника, побудований у формі куба на основі кратних 10 см × 10 см × 10 см, з масою не більше 1,33 кілограма на одиницю. Концепція CubeSat була вперше розроблена в 1999 році спільною командою Каліфорнійського політехнічного університету та Стенфордського університету, а специфікації, призначені для використання всіма, хто планує запустити наносупутник у стилі CubeSat, підтримується цією групою.

З постійним прогресом у мініатюризації та збільшенні можливостей електронних технологій та використання супутникових сузір'їв, наносупутники все більше здатні виконувати комерційні місії, які раніше вимагали мікросупутників. Наприклад, стандарт CubeSat 6U був запропонований, щоб дозволити супутниковій групі з 35 8 кг супутників, що створюють зображення Землі, замінити сузір'я з п'яти супутників зображення Землі вагою 156 кг при тій самій вартості місії, зі значно збільшеним часом перегляду: кожну область земної кулі можна знімати кожні 3,5 години, а не раз на 24 години за допомогою сузір'я RapidEye. Більш швидкий час перегляду є значним покращенням для країн, які здійснюють реагування на стихійні лиха, що було метою сузір'я RapidEye. Крім того, опція nanosat дозволить більшій кількості країн володіти власними супутниками для збору даних зображень у непікові (не катастрофічні) дані. Оскільки витрати знижуються, а час виробництва скорочується, наносупутники стають все більш можливими підприємствами для компаній.

13 січня, о 17:25 за київським часом, з бази Космічних сил США на мисі Канаверал стартувала ракета з держаним українським супутником Січ-2-30.

Січ-2-30 призначений для отримання цифрових фото поверхні Землі у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні: 0,51-0,59 мкм (зелений), 0,61-0,68 (червоний), 0,80-0,89 (ближній ІЧ) та 0,51-0,90 (панхром). Також його використають для моніторингу іоносфери. Загальна маса – близько 210 кг, з них 40 кг корисного навантаження. Роздільна здатність ~6,1 м при ширині смуги знімання ~ 36,5 км. Накопичувач для даних – 10 Гб, канал передачі – 30,72 Мбіт/с. Розрахований на 3 роки служби на ССО заввишки 525 км з нахилом 98,1°.

Приклад наносупутників: ExoCube (CP-10), ArduSat, SPROUT

Розробники та виробники наноспутників включають EnduroSat, GomSpace, NanoAvionics, NanoSpace, Spire, Surrey Satellite Technology, NovaWurks, Dauria Aerospace, Planet Labs і Reaktor.

Супутниковий сегмент буде сприяти характеристикам глобальності, збільшення можливостей послуг 5G і вирішення проблем, пов'язаних з підтримкою зростання мультимедійного трафіку, повсюдного покриття, між машинного зв'язку і критично важливих телекомунікаційних місій при оптимізації вартості послуг для кінцевих користувачів. Вимоги до супутникового сегменту мережі п'ятого покоління будуть визначатися насамперед сукупністю послуг, що надаються мережами 5G, які об'єднані трьома основними бізнес-моделями: розширений та мобільний.

Архітектура «розподіленого супутника» дозволяє проводити вимірювання параметрів орбітального руху кубсата на базі вимірювань їх взаємного розташування. В результаті можливо підвищити ефективність використання кубсатів, відключивши частину обладнання, необхідного для вимірювання параметрів. До складу корисного навантаження супутників-ретрансляторів включені SDR-модулі (програмно-конфігуровані модулі), призначені для функціонування і обробки транспортних потоків для передачі і прийому інформації. Для забезпечення зв'язку всередині «розподіленого супутника» використовується бездротова мережа.

Недоліком відомого рішення є те, що у ньому не визначена архітектура міжсупутникового каналу зв'язку, що не дозволяє оцінити його технічні характеристики та відповідно технічні можливості системи низькоорбітального супутникового радіозв'язку для надання якісних послуг в інтегрованих мережах зв'язку 5G та IoT.

Тому актуальною задачею є проаналізувати архітектуру «розподіленого супутника», що дозволяє використовувати супутники класу мікросупутник та наносупутник (куб-сат) для створення складних інформаційно-телекомунікаційних систем космічного базування, зокрема систем дистанційного зондування Землі.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПОСОБИ УТВОРЕННЯ МЕРЕЖІ NTN

1.1 Роль неназемних мереж

Серед основних принципів 5G - здатність ефективно та надійно передавати інформацію. Системи 5G – це не лише нові протоколи, але, що ще важливіше, вони забезпечують нову телекомунікаційну інфраструктуру. Таким чином, одне із завдань полягає у досягненні надійної інтеграції між наземним та неназемним сегментами. Оскільки супутники зв'язку пропонують можливості великомасштабного мовлення та глобального покриття, вони є ефективними засобами зв'язку для мереж на основі 5G, особливо для підключення віддалених районів і бортових, морських платформ. За останні кілька років багато операторів супутникового зв'язку оновили свій парк, щоб забезпечити розширені функціональні можливості та більш високе повторне використання частот. На додаток до існуючого парку геостаціонарних супутників, наступне покоління супутникових систем MEO і LEO буде дуже гнучким і буде в десять разів більш потужним, ніж існуючі угруповання. Супутники та інші неназемні платформи, такі як дирижаблі або БПЛА, покращують системи 5G, роблячи їх більш гнучкими, розумними та надійними.

Очікується, що неназемні мережі, завдяки своїм широким можливостям покриття та зменшеній уразливості космічних та повітряних транспортних засобів до фізичних атак та стихійних лих, зможуть:

- сприяти розгортанню послуги 5G в необслуговуваних районах, які не можуть бути покриті наземною мережею 5G (ізольовані або віддалені райони, на борту літаків або суден) і в недостатньо обслуговуваних районах (наприклад, приміські або сільські райони), щоб покращити продуктивність обмежених наземних мереж економічно ефективним способом;

- підвищити надійність послуги 5G, забезпечуючи безперервність обслуговування для пристроїв M2M/IoT або для пасажирів на борту рухомих

платформ (наприклад, пасажирських транспортних засобів, літаків, кораблів, високошвидкісних потягів, автобусів) або забезпечення доступності послуг у будь-якому місці, особливо для критичних комунікацій;

- запровадити масштабованість мережі 5G, забезпечуючи ефективні багато адресні та широкомовні ресурси для доставки даних до країв мережі або навіть терміналу користувача.

Загальну мережу зв'язку, яка зростатиме з використанням технології 5G, можна розглядати як мережу мереж, оскільки вона дозволить адаптувати та комбінувати різні та альтернативні мережеві стеки та технології зв'язку. Завдяки можливостям широкомовної та багатоадресної передачі, NTN і, зокрема, мережі супутникового зв'язку (SatCom) можуть грати безліч ролей у 5G, виступаючи як мережа радіодоступу (RAN) і як транзитне з'єднання для віддалених розгортань 5G. Супутниковий компонент може бути корисним як:

- резервне з'єднання: користувачі підключаються до мережі через стандартне наземне з'єднання (наприклад, ADSL) та інші вторинні з'єднання (наприклад, супутникове). Первинне з'єднання використовується в нормальних умовах, в той час як інше включається у разі збою або несправності, щоб замінити стандартне з'єднання (перемикання при відмові), що призводить до більш високої доступності та надійності обслуговування;

- розвантаження даних: користувачі вибирають основне з'єднання для надсилання та/або отримання даних. Супутникова мережа може забезпечувати додаткове з'єднання, спрямоване на усунення піків трафіку та збереження продуктивності певних конфіденційних потоків. Спеціальний маршрутизатор може бути налаштований для визначення та застосування правил залежно від статистики трафіку та певних механізмів, таких як фіксовані або динамічні пороги трафіку, щоб активувати додаткове з'єднання та розвантажити основний маршрут;

- паралельні незалежні канали: в мережі можуть бути присутні два або більше незалежних канали доступу або зворотного рейсу, які можуть використовуватися одночасно. Кожне посилання (одне з них може бути супутниковим) керується окремим провайдером (ISP), який характеризується цільовою технологією та

підписаною угодою про рівень обслуговування (SLA). Спеціальний маршрутизатор у приміщенні користувача може бути налаштований для збору всього локально згенерованого трафіку та пересилання його на основі критеріїв вартості, продуктивності для реалізації багатоканальної агрегації.

Варіант використання зазвичай відноситься до взаємодії між роллю та системою для досягнення певної мети. Отже, необхідно визначити мету послуги, яка забезпечується компонентом неназемної мережі, інтегрованим у систему 5G.

Для кожного з факторів надання послуг 5G варіанти використання, в яких компоненти не наземної мережі мають відігравати певну роль. До факторів, що забезпечують підтримку послуг 5G, відносяться eMBB (розширений мобільний широкосмуговий зв'язок), URLLC (наднадійний зв'язок із малою затримкою) та mMTC (масовий зв'язок машинного типу). Сценарії використання 5G відповідають взаємодіям між зацікавленою стороною (користувачем, оператором, постачальником послуг) та системою 5G для досягнення певної мети.

Хоча затримка розповсюдження супутникових систем може бути проблемою для певних додатків, що вимагають малої затримки, важливість супутників для критично важливих комунікацій, включаючи зв'язок для суспільної безпеки, через їхню надійність і велику зону покриття добре відома.

Отже, роль супутників і неназемних мереж має бути досліджена для забезпечення основних областей використання систем 5G, що охоплюють не тільки покращений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB), але й високу стійкість до відмов, самоналаштовуваність, підтримка та безпека мереж спеціального призначення.

1.2 HAPS

HAPS – це мережевий вузол, який працює у стратосфері на висоті близько 20 км. Завдяки унікальним властивостям стратосфери, HAPS може залишатися у квазістаціонарному положенні та робити значний внесок у забезпечення повсюдного зв'язку. Дослідження, пов'язані з HAPS, можна простежити до 1990-х

завдяки численним дослідженням показало перспективну повсюдного підключення до Інтернету з особливим упором на сільські райони та програми для надання допомоги при стихійних лихах. Далі ми підемо на крок уперед і покажемо, як використання систем HAPS може сприяти розвитку передових послуг мобільного бездротового зв'язку із надширокими покриттям та високою пропускною здатністю.

Останнім часом HAPS обговорюється як життєздатний компонент повітряної мережі завдяки розвитку технологій зв'язку та досягнень у галузі підвищення ефективності сонячних панелей, легких композитних матеріалів, автономної авіоніки та антен. Оскільки витрати залежать від часу і з'являються більш економічні технології та матеріали, використання систем HAPS стане більш економічно доцільним у майбутніх мережах. Очікується, що з розробкою передових матеріалів та здійсненням необхідних технологічних ривків у найближчі роки поступово з'являться нові можливості. Ці дослідні тенденції призвели до того, що HAPS активно сприймається як можлива технологія для мереж бездротового зв'язку майбутнього. Хоча вибір джерела енергії розглядався як фундаментальне питання у дослідженнях HAPS, сонячна енергія у поєднанні з накопиченням енергії розглядалася як основний засіб забезпечення енергією систем HAPS, оскільки вони мають великі поверхні, які підходять для розміщення сонячних панелей. Більш того, завдяки своїм характеристикам низької затримки в порівнянні з супутниковими мережами, що з'являються, HAPS може надавати бездротові послуги безпосередньо користувачам наземних мереж.

У зв'язку з постійними збоями в дизайні бездротового зв'язку (наприклад, у проектах, заснованих на даних) та появі нових варіантів використання (наприклад, розподілених платформ машинного навчання та центрів обробки даних) системи HAPS стали більш привабливими через їх потенційні переваги. З цієї точки зору автономна повітряна куля, що забезпечує доступ до Інтернету у віддалену область. Настала ера портативних центрів обробки даних, інтелектуальних підсилювачів сигналів, літаючих базових станцій та платформ машинного навчання, здатних приймати інтелектуальні рішення для величезної кількості вантажних дронів та

літаючих автомобілів. Фактично, ми передбачимо майбутнє з сузір'ям HAPS, що забезпечує доступ до мережі з високою пропускною здатністю, розвантаження обчислень та інструменти аналізу даних для мільйонів користувачів. пристрої у приміських районах, а й у щільних міських районах.

Рівень HAPS, який виступає як великомасштабний інтелектуальний об'єкт, забезпечує швидкий, надійний та ефективний зв'язок на великій відстані між супутниками, минаючи необхідність встановлення мільйонів наземних та морських ретрансляційних станцій. Він також може функціонувати як розподілений центр обробки даних для запису орбітальних траєкторій супутників, моніторингу попереджень про з'єднання та розрахунку ймовірності зіткнення між ними. Своєчасна доступність такої інформації для різних супутникових компаній має життєво важливе значення для збереження функціональних можливостей супутників. Крім того, супутники допомагають рівню HAPS покращувати характеристики передачі обслуговування. Рівень HAPS відповідає за управління мобільністю безпілотних літальних апаратів (БПЛА) шляхом надання прикордонного інтелекту, розвантаження важких обчислень та обробки великомасштабних зондувань та моніторингу, які корисні для систем доставки та моніторингу. Очікується, що комунікаційна платформа безперешкодно оброблятиме різноманітні комунікаційні вимоги, такі як наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC) та покращений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB). Рівень HAPS забезпечує швидкий доступ до Інтернету та послуги бездротового зв'язку, такі як IoT та розподілене машинне навчання, для міських, приміських та віддалених районів, знижуючи залежність від наземних та супутникових мереж.

Завдяки цим можливостям ми припускаємо, що використання систем HAPS може бути засобом вирішення архітектурних проблем, які виникнуть зі збільшенням використання повітряних компонентів у бездротових мережах. Використання систем HAPS як нових платформ бездротового доступу для майбутніх систем бездротового зв'язку має великий потенціал.

HAPS знаходиться у стратосфері, шарі атмосфери Землі. Цей рівень має

унікальні властивості, що робить його придатним для розгортання HAPS. Тут практично немає погодних явищ, таких як блискавка чи гроза. Через відсутність хмар у цьому шарі сонячна енергія може ефективно використовуватись без забруднення атмосфери. Понад те, стратосфера безпечна для розгортання, оскільки перебуває над висотою комерційного повітряного руху. Через ці внутрішні особливості стратосфери два різні типи стратосферних платформ (аеростатичні та аеродинамічні) можуть бути розгорнуті, щоб залишатися в квазістаціонарному положенні над Землею протягом тривалого часу. Загалом система зв'язку HAPS складається з двох частин: неназемної частини та наземної частини.

Неземна частина – це частина, яка включає всі основні відносні мережеві компоненти в повітрі або космосі, а також основні бортові підсистеми для ефективного розгортання HAPS і успішної системи зв'язку. Складається з двох сегментів, а саме з бортової підсистеми та неназемної мережі.

Бортові підсистеми здебільшого складаються з трьох підсистем: підсистема управління польотом, підсистема енергоменеджменту та підсистема корисного навантаження зв'язку. Підсистема управління польотом призначена для стабілізації платформи, управління її рухливістю та напрямки її в заданому напрямку. Для цього потрібні датчики для вимірювання висоти та напрямки HAPS, обчислювальний блок для прийняття рішень та виконавчі механізми для виконання бажаного руху та орієнтації. Крім того, блок управління польотом управляє інтерфейсом між платформою та наземною станцією управління.

Це виконується за допомогою сигналів телеметрії, стеження та команд, які повідомляють про стан платформи та забезпечують важливий двосторонній потік інформації між HAPS та його наземною станцією управління. Підсистема управління енергоспоживанням управляє процесом виробництва та зберігання енергії, а також регулює споживання енергії іншими підсистемами.

Підсистема корисного навантаження зв'язку відповідає за керування зв'язком між HAPS та іншими об'єктами. Залежно від місії HAPS та цільових програм у корисне навантаження може бути включено різне обладнання та технології. Додаткові деталі підсистем енергії та корисного навантаження

обговорюватимуться у підрозділах IV-C та IV-D.

Неназемні мережі представляють всі неназемні вузли зв'язку в аерокосмічній області, які потенційно задіяні в системах зв'язку HAPS, як показано. HAPS може бути з'єднаний з іншими HAPS і утворити угруповання або він може бути частиною мережі з різними рівнями супутників . Більш того, рівень HAPS може бути пов'язаний з різними типами низьковисотних платформних станцій (LAPS), такими як базові станції або ретранслятори БПЛА або може обслуговувати рій з різними типами користувачів БПЛА.

Наземну частина можна розділити на три сегменти: станція управління, комунікаційний шлюз та наземні мережі.

Станція управління керує операціями зв'язку між HAPS та різними типами користувачів. Крім того, він організує канали зв'язку та керує ресурсами між декількома вузлами HAPS та іншими неназемними або наземними мережами. Крім того, станція управління керує процесом зльоту/посадки, дистанційно контролює положення HAPS і контролює його напрямок, щоб максимізувати ефективність антени та покращити характеристики.

Комунікаційний шлюз з'єднує HAPS із базовою мережею через провідну транспортну інфраструктуру. Залежно від корисного навантаження HAPS і типу наземної мережі, HAPS може безпосередньо зв'язуватися з наземними користувачами, або обмінюватися інформацією даних через комунікаційний шлюз. Станція управління та комунікаційний шлюз можуть бути розташовані в одному будинку або різних місцях. В основному вони складаються з підсилювачів, процесорів та антен. Антени, які зазвичай використовуються, мають параболічні відбивачі, щоб гарантувати високий коефіцієнт спрямованості.

Наземні мережі включають всі наземні вузли або користувачів, що беруть участь у системах зв'язку HAPS. Сюди входять наземні базові станції та різні типи користувачів, наприклад мобільні користувачі та датчики IoT.

1.3 Типи супутникових орбіт

У наш час використовується декілька різних орбіт для розміщення супутників, які можна використовувати для мережі NTN. Найбільшу увагу прикуто до геостаціонарної орбіти, яка може бути використана для «стаціонарного» розміщення супутника над тією чи іншою точкою Землі. Орбіта, обрана для роботи супутника, залежить від його призначення. Наприклад, супутники, які використовуються для прямого мовлення телевізійних програм, поміщають на геостаціонарну орбіту. Багато супутників зв'язку також знаходяться на геостаціонарній орбіті. Інші супутникові системи, зокрема ті, які використовуються для зв'язку між супутниковими телефонами, обертаються на низькій навколоземній орбіті.

Траєкторія руху ШСЗ називається орбітою. Під час вільного польоту супутника, коли його бортові реактивні двигуни вимкнені, рух відбувається під впливом гравітаційних сил і за інерцією, причому головною силою є тяжіння Землі.

Конкретна орбіта, яка обирається для роботи супутника, залежить від безлічі факторів, серед яких - функції супутника, а також обслуговує їм територія. В одних випадках це може бути вкрай низька навколоземну орбіту, що знаходиться на висоті всього 160 кілометрів над Землею, в інших випадках супутник знаходиться на висоті більше 36000 кілометрів над Землею - тобто, на геостаціонарній орбіті GEO. Більш того, ряд супутників використовує не кругову орбіту, а еліптичну.

По мірі обертання супутників на навколоземній орбіті вони з неї зміщуються через сили тяжіння Землі. Якби супутники не обертається по орбіті, вони б почали поступово падати на Землю і згоріли б в верхніх шарах атмосфери. Для кожної з орбіт існує своя розрахункова швидкість, яка дозволяє збалансувати силу тяжіння Землі і відцентрову силу, утримуючи апарат на постійній орбіті і не даючи йому ні набирати, ні втрачати висоту.

Ракета повинна набрати швидкість в 40320 кілометрів на годину, щоб повністю подолати земну гравітації і полетіти в космос. Космічна швидкість куди більше, ніж потрібно супутнику на орбіті. Вони не долають земну гравітацію, а

знаходяться в стані балансу. Орбітальна швидкість - це швидкість, необхідна для підтримки балансу між гравітаційним притяганням і інерціальним рухом супутника. Це приблизно 27359 кілометрів на годину на висоті 242 кілометри. Без гравітації інерція забрала б супутник в космос. Навіть з гравітацією, якщо супутник буде рухатися занадто швидко, його віднесе в космос. Якщо супутник буде рухатися занадто повільно, гравітація притягне його назад до Землі.

Орбітальна швидкість супутника залежить від його висоти над Землею. Чим ближче до Землі, тим швидше швидкість. На висоті в 200 кілометрів орбітальна швидкість складає 27400 кілометрів на годину. Для підтримки орбіти на висоті 35786 кілометрів супутник повинен мати швидкість 11300 кілометрів на годину. Ця орбітальна швидкість дозволяє супутнику робити один оберт за 24 години. Оскільки Земля також обертається 24 години, супутник на висоті в 35786 кілометрів знаходиться у фіксованій позиції щодо поверхні Землі. Ця позиція називається геостаціонарна. Геостаціонарна орбіта ідеально підходить для метеорологічних супутників і супутників зв'язку.

В цілому, чим вище орбіта, тим довше супутник може залишатися на ній. На низькій висоті супутник знаходиться в земній атмосфері, яка створює опір. На великій висоті немає практично ніякого опору, і супутник, як місяць, може перебувати на орбіті століттями.

Для того щоб супутник міг використовуватися для надання послуг зв'язку, наземні станції повинні мати можливість «стежити» за ним з метою отримання з нього сигналу і відправки сигналу на нього. Зрозуміло, що зв'язок із супутником можлива лише тоді, коли він знаходиться в зоні видимості наземних станцій, і, в залежності від типу орбіти, він може перебувати в зоні видимості лише в короткі проміжки часу.

Кругові орбіти можна класифікувати за кількома параметрами. Такі терміни, як Низька навколоземна орбіта, Геостаціонарна орбіта та інші вказують на відмінну рису конкретної орбіти. Короткий огляд визначень кругових орбіт представлений в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Визначення супутникових орбіт

Назва орбіти	Абревіатура	Висота орбіти (в кілометрах)
Низька навколоземна орбіта	LEO	200 – 1200
Середня навколоземна орбіта	MEO	1200 – 35790
Геосинхронна орбіта	GSO	35790
Геостаціонарна орбіта	GEO	35790
Висока навколоземна орбіта	HEO	Вище 35790

Зі збільшенням висоти орбіти, на якій знаходиться супутник, збільшується і період його звернення по даній орбіті. На висоті 35790 кілометрів над Землею супутнику потрібно 24 години для повного витка навколо планети. Така орбіта відома як геосинхронна, так як вона синхронізована з періодом обертання Землі навколо своєї осі.

Дуже популярною супутникової орбітою є геостаціонарна орбіта. Вона використовується для розміщення супутників багатьох типів, включаючи супутники, що забезпечують зв'язок та доступ до мережі Інтернет.

Перевагою геостаціонарної орбіти є те, що супутник, що знаходиться на ній, постійно розташовується в одній і тій же позиції, що дозволяє направляти на нього фіксовану антену наземної станції.

Окремим випадком геосинхронної орбіти є геостаціонарна орбіта. При використанні такої орбіти напрямок руху супутника навколо Землі відповідає напрямку обертання самої планети, а період обертання космічного апарату приблизно дорівнює 24 годинам. Геостаціонарна орбіта зображена на рис. 1.1. Це означає, що супутник обертається з тією ж кутовою швидкістю, що і Земля, в тому ж напрямку і, отже, постійно знаходиться в одній і тій же точці відносно поверхні планети [4].

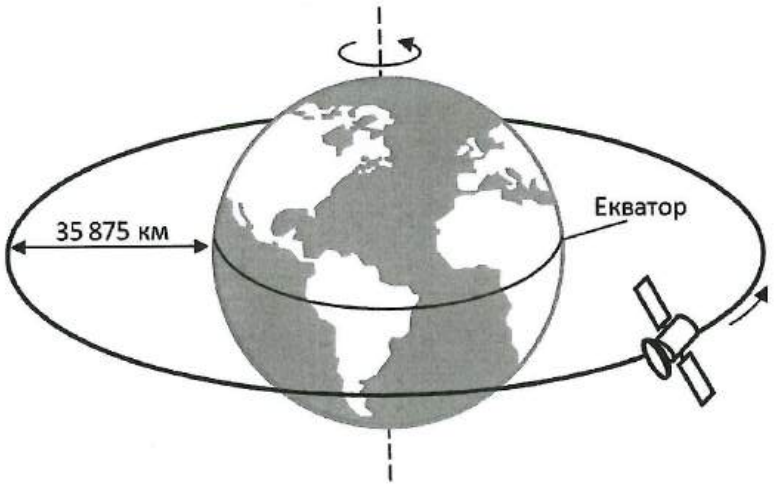


Рис. 1.1 Геостаціонарна орбіта

Якщо вважати Землю строго сферичної, а дія гравітаційного поля Землі - єдиною силою, що впливає на супутник, то рух ШСЗ підпорядковується відомим законам Кеплера: воно відбувається в нерухомій площині, що проходить через центр Землі, - площини орбіти; орбіта має форму еліпса або кола (окремий випадок еліпса).

Особливістю еліптичної орбіти є наявність двох важливих точок на ній. Одна з них розташована в місці найбільшого віддалення від Землі. Ця точка відома, як апогей - в ній швидкість руху космічного апарату знижується до мінімальних показників, так як тут сила земної гравітації відчувається найменше. Точка, в якій супутник знаходиться найближче до Землі, відома як перигей - при проході через неї супутник рухається з найбільшою швидкістю. Еліптичну орбіту зображено на рис 1.2.

При русі супутника повна механічна енергія (кінетична і потенційна) залишається незмінною, внаслідок чого при видаленні супутника від Землі швидкість його руху зменшується.

Для виконання деяких завдань може вимагатися розміщення супутника на високій навколоземній орбіті. У цих випадках період обертання супутника навколо Землі перевершує 24 години, а крім того відстань до супутника є чималим, що призводить до більшої затримки під час руху сигналу з Землі до супутника і назад, а також великих втрат сигналу.

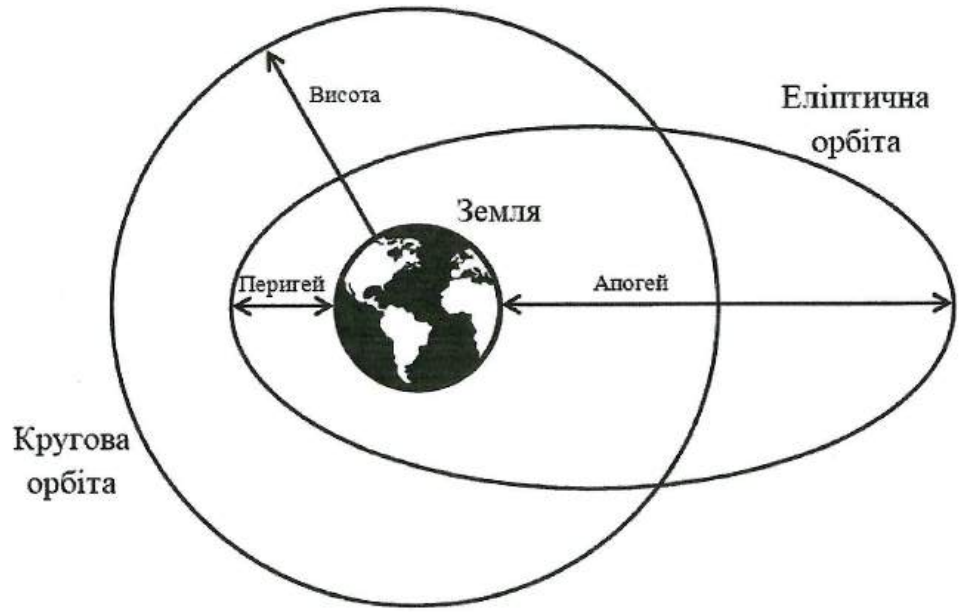


Рис. 1.2 Кругова та еліптична орбіта

Вибір орбіти супутника залежить від функцій, які він виконує. У той час, як для організації прямого мовлення і подібних послуг, як правило, використовуються супутники, розташовані на геостаціонарних орбіт, для систем GPS і навіть для мобільної телефонії використовуються супутники, що обертаються набагато нижче.

1.4 Особливості передачі сигналів в космічному просторі

Велика протяжність лінії зв'язку між земними станціями і ретранслятором, що знаходяться на борту ШСЗ, призводить до запізнювання сигналів.

Запізнення сигналів призводить до появи помітних для абонентів ехосигналів, що виникають при переході з чотирьох провідних ланцюгів зв'язку на двохпровідні через не ідеальність диференціальних систем. Відлунні сигнали проявляються у вигляді прослуховування абонентом своєї розмови, затриманої на час, що дорівнює подвоєному часу поширення сигналу між абонентами. Це залежить від того, що для проходження відстані сигналу потрібен час.

$$t = \frac{L}{c} = \frac{2H}{c}, \tag{1.1}$$

де L - довжина лінії зв'язку від земної станції до іншої земної станції, яка проходить через супутник; с - швидкість світла; Н - відстань від супутника до поверхні Землі. Звідси випливає, що при Н = 36000 км величина запізнювання складе приблизно 250 мілісекунд. Запізнення сигналу при передачі дуплексних телефонних розмов призводить до появи вимушених пауз в розмові, втрати "контакту" між абонентами, тобто обмежує природність бесіди.

Для систем зв'язку, що використовують супутники, що рухаються по орбітах з висотою 36000 кілометрів (тобто для геостаціонарних супутників) значення затримки ехосигналів може бути рівним 500 мілісекунд. У цих випадках слід забезпечити загасання ехосигналів до величини, що дорівнює приблизно 60 дБ щодо рівня корисного сигналу.

Однією з особливостей систем зв'язку через ШСЗ є виникнення ефекту Доплера, що викликаний рухом супутника щодо ЗС. Позначимо через V ту компоненту швидкості руху ШСЗ, яка збігається з лінією радіозв'язку ШСЗ - ЗС і домовимося вважати величину V негативною в разі зменшення відстані між ШСЗ і ЗС і позитивною при збільшенні цієї відстані.

Відомо, що при русі джерела сигналу зі швидкістю ±V частота прийнятих коливань пов'язана з частотою випромінюваних коливань наступним співвідношенням

$$f = f_0\left(1 \pm \frac{V}{c}\right), \tag{1.2}$$

де f - частота прийнятих коливань; f_0 – частота випромінюваних коливань; V – швидкість руху ШСЗ; с – швидкість світла.

Найбільш сильно ефект Доплера буде проявлятися в системах зв'язку, що використовуються не геостаціонарні орбіти. У системах зв'язку з геостаціонарними ШСЗ ефект Доплера може мати місце при корекції положення супутника на орбіті.

Відзначимо, що ефект призводить не тільки до зміни частоти випромінюваних коливань, а отже, і несучої частоти, а й викликає деформацію спектра переданого повідомлення. Верхні частоти в спектрі будуть змінюватися на велику величину, а ширина спектра прийнятого коливання буде відрізнятися від ширини спектра модульованих коливань [5].

1.5 Діапазони робочих частот систем зв'язку через ШСЗ

Питаннями розподілу смуг частот між різними службами радіозв'язку займається одна із спеціалізованих організацій ООН - Міжнародний союз електрозв'язку, який на базі досліджень, проведених в країнах - членах МСЕ і подаються Міжнародній консультативній комітету по радіо, на своїх адміністративних конференціях розробляє відповідні регламентують правила і процедури. Основним міжнародним документом, який регламентує використання частот, є Регламент радіозв'язку, що містить таблицю розподілу смуг частот між службами, окремі технічні обмеження, що накладаються при спільному використанні частот різними службами, процедури координації систем, а також правила реєстрації частотних присвоєнь в Міжнародному комітеті реєстрації частот.

Вибір смуг частот, що виділяються для роботи систем зв'язку через ШСЗ, визначається наступними основними умовами:

- особливостями поширення електромагнітних коливань через атмосферу;
- інтенсивністю шумів, викликаних радіовипромінювання різних зовнішніх джерел (Сонце, Місяця, планет, атмосфери Землі та інших);
- можливістю роботи систем зв'язку через ШСЗ в виділених смугах частот спільно з іншими радіослужбами при допустимих значеннях радіоперешкод.

Згідно регламенту радіозв'язку, для району 1 (Європа, РФ, Африка) фіксованої супутникової служби, до якої відносяться системи зв'язку через ШСЗ, відводяться наступні смуги частот (у діапазоні до 40 ГГц):

- для передачі повідомлень на ділянці повідомлень Земля – ШСЗ 5.725...7.075; 7.9...8.4; 12.5...13.25; 14.0...14.8; 27.5...31.0 ГГц;

- для передачі повідомлень на ділянці повідомлень ШСЗ – Земля 3.4...4.2; 4.5...4.8; 7.25...7.75; 10.7...11.7; 12.5...12.75; 17.7...21.2; 37.5...40.5 ГГц.

Слід зазначити, що найкращими смугами частот для систем зв'язку через ШСЗ є частоти в діапазоні 2 ... 8 ГГц.

В таблиці 1.2 зведено використання різних радіочастотних діапазонів в різноманітних супутникових системах зв'язку.

Таблиця 1.2

Смуги частот систем супутникового зв'язку

Позначення смуги	Діапазон частот (ГГц)	Приклади систем	Типове використання
P	0.23 - 1.00	Orbcomm, E-SAT	Пейджинг, визначення місцезнаходження
L	1.53 - 2.70	Iridium, Globalstar, ICO, Thuraya	Телефонія, мобільний зв'язок, пейджинг, низькошвидкісна передача даних
S	2.70 - 3.50	Globalstar	Телефонія, мобільний зв'язок, пейджинг, низькошвидкісна передача даних
C	3.70 - 6.50	Intelsat, Skynet	Фіксований зв'язок, передача відео, VSAT-застосування
X	7.25 - 8.50	-	-
Ku (Європа)	11.0 - 14.0	Direct TV, Echostar, Astra	Фіксований зв'язок, ТВ, передача даних, мобільний зв'язок, широкополосний зв'язок, доступ до Інтернет
Ku (США)	11.0 - 17.8	Spaceway, Cyberstar, Astrolink, Teledesic	Фіксований зв'язок, ТВ, передача даних, мобільний зв'язок, широкополосний зв'язок, доступ до Інтернет

Продовження таблиці 1.2

Смуги частот систем супутникового зв'язку

Позначення смуги	Діапазон частот (ГГц)	Приклади систем	Типове використання
Ka	17.7 - 30.5	Teledesic, Skybridge, Cyberstar	Широкополосний зв'язок, високошвидкісна передача даних, доступ до Інтернет
V	31.0 - 70.0	Milstar, AFSATCOM, USTS	Військові застосування

Ширина смуги супутникового каналу характеризує кількість інформації, що він може передати в одиницю часу. Типовий супутниковий прийомопередавач має ширину смуги 36 Мгц на частотах від 4 Мгц до 6 Мгц. Таких прийомопередавачів на супутнику встановлюється від 12-24, що дає в результаті від 432 до 864 МГц.

Як вже згадувалося, смуги частот супутника зв'язку вказуються у парах. Наземна станція передає сигнал на супутник на більш високій частоті (Uplink), а приймає на більш низькій (Downlink).

Сучасні супутникові системи найчастіше застосовують одну з двох смуг: C-смугу (від супутника до наземної станції в області 6 ГГц і назад в області 4 ГГц), чи Ku-смугу (14 ГГц і 12 ГГц, відповідно). Ширина будь-якої полоси складає 500 МГц.

Ка-смуга (2.5 ГГц у діапазоні від 30 до 120 ГГц) використовується для зв'язку між супутниками, а також між супутником і наземними станціями [7].

2. ПОСЛУГИ ПО БАГАТОПРОМЕНЕВИМ НЕНАЗЕМНИМ МЕРЕЖАМ З ПІДТРИМКОЮ 5G NR

2.1 Мережі радіодоступу для NR NTN

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

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

У роботі обговорюються проблеми та можливості NTN, а також представлений практичний приклад використання частот міліметрового діапазону для підключення мобільних терміналів. Детальний огляд NTN представлений у, але обговорення роботи 3GPP NTN у ньому залишається високому рівні. Натомість, мета цієї статті – проаналізувати варіанти роботи NTN, заглибившись у детальні аспекти та фундаментальні обґрунтування застосування технологій, що впливають на стандартизацію. Зокрема, у цьому документі обговорюються ключові рішення NTN, що охоплюють безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів до ядра та терміналів.

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

Ключові сценарії та моделі включають:

- використання S- та Ka-діапазонів;
- супутники GEO, супутники LEO та HAPS;

- спрямовані до Землі промені (тобто промені, які прямують на ділянку землі якомога довше) і промені, що рухаються (тобто промені, що рухаються по поверхні Землі слідом за рухом супутника);

- типові розміри зони обслуговування та мінімальні кути місця (елевації) для розгортань GEO, LEO та HAPS;

- два типи терміналів NTN: портативні термінали та термінали з дуже малою апертурою (VSAT) (оснащені параболічними антенами і зазвичай встановлюються на будівлях або транспортних засобах);

- моделі антени для супутникової антени та антени HAPS.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Мета останніх досліджень полягає у визначенні покращень, необхідних для NTN на базі LEO та GEO, а також націлити на неявну підтримку HAPS та мереж "повітря-земля". Це включає аспекти фізичного рівня, протоколи та архітектуру, а також управління радіоресурсами, вимоги до радіочастот та використання смуги

частот. Основна увага приділяється прозорій архітектурі корисного навантаження з фіксованими наземними зонами та системами дуплексного зв'язку із частотним розподілом (FDD), де передбачається, що всі UE мають можливості глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

На рис. 1 показано архітектуру NTN з прозорим корисним навантаженням. Базова мережа 5G (5GC) підключається до gNB за допомогою NG-інтерфейсу. GNB розташований на землі та підключається до шлюзу NTN, який через фідерне з'єднання підключається до корисного навантаження NTN (мережевий вузол, встановлений на борту супутника або HAPS). Корисне навантаження NTN підключається до UE через службове посилання за допомогою інтерфейсу Uu.

Наземний користувач UE з можливостями GNSS може розрахувати відносну швидкість між UE та супутником, а також час прийому-передачі (round-trip time, RTT) між UE та супутником. Виходячи з відносної швидкості, UE може розрахувати та застосувати попередню компенсацію для доплерівської частоти, щоб гарантувати, що його сигнал висхідної лінії зв'язку приймається на супутнику або gNB на бажаній частоті. GNB надає UE загальне випередження синхронізації (timing advance, TA), яке сигналізує RTT між супутником та gNB. UE додає час RTT між UE та супутником до загальної TA, щоб отримати повну TA. Повний TA використовується як зсув між прийнятою синхронізацією низхідної лінії зв'язку і синхронізацією передачі висхідної лінії зв'язку в UE, тобто, якщо слот n низхідній лінії зв'язку починається в момент часу t1, то слот n висхідної лінії зв'язку починається в момент часу t1 мінус повне TA. Це дозволяє UE відправляти передачі по висхідній лінії зв'язку з точною синхронізацією прийому gNB як для довільного доступу, так і для передачі даних в підключеному режимі.

Передачі в NR засновані на 16 процесах HARQ із зупинкою та очікуванням для безперервних передач. Процес HARQ не може бути повторно використаний для нової передачі, доки не буде отримано зворотний зв'язок для попередньої передачі. При тривалих RTT та використанні протоколу зупинки та очікування передачі зупинятимуться, коли всі процеси HARQ очікують зворотного зв'язку, що знижує пропускну здатність зв'язку. Щоб зменшити зрив, кількість процесів HARQ

збільшена до 32, що може охоплювати деякі сценарії "повітря-земля". Однак 32 процесів HARQ недостатньо для покриття RTT NTN на основі LEO та GEO. Оскільки подальше збільшення кількості процесів HARQ вважається небажаним, необхідно використовувати схеми для повторного використання того самого процесу HARQ до того, як пройде повний RTT, щоб уникнути зупинки. При повторному використанні процесу HARQ для передачі по низхідній лінії зв'язку до того, як пройде RTT, зворотний зв'язок HARQ стає непотрібним і таким чином відключається. Для висхідної лінії зв'язку немає зворотного зв'язку HARQ, і gNB може динамічно вирішувати, чи повторно використовувати процес HARQ до того, як пройде RTT, відправивши гранти для нових даних або гранти для повторних передач, або дочекатися, поки він не декодує передачу по висхідній лінії. Показано, щоб реалізувати в реальному часі RTT NTN для UE необхідно (повторно) вибрати новий супутник, який заснований на існуючих критеріях і може включати нові критерії, такі як час, коли супутник перестає покривати зону, де знаходиться UE. Умовна передача обслуговування заснована на місцезнаходження UE та синхронізації супутникового покриття з місцем розташування UE.

2.2 Послуги та системні аспекти NR NTN

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

Вимоги охоплюють супутниковий доступ на основі NTN RAN для доступу,

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

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

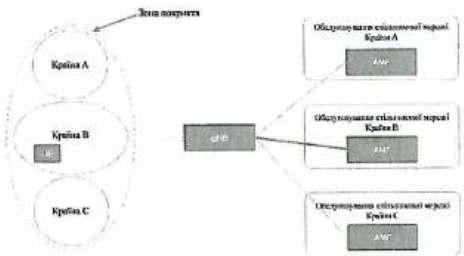


Рис. 2.1 Супутниковий доступ, що охоплює декілька країн та gNB, підключений до стільникових мереж, що обслуговують різні країни

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

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

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

Результат дослідження задокументований, який включає варіанти використання, а також потенційні вимоги та рішення, наприклад, для управління та моніторингу компонентів gNB та управління мережевим сегментом. Порівняно з наземним NR, впливи в основному відбуваються через сценарії LEO/MEO, де компоненти gNB, такі як gNB-DU, розташовані на борту супутникових апаратів і, таким чином, будуть переміщатися щодо Землі. Інші покращення необхідні через тривалі затримки, які впливають на деякі функції моніторингу та ключові показники ефективності. Для покращення ефективності запропоновано концепції мереж, що самоорганізуються (self organizing network, SON) для 5G необхідно, а також обробка вимірювань робочих характеристик, які використовують процес

HARQ, що може бути недоступний при використанні супутникової RAN. Крім того, функції моніторингу, що підтримують використання балансування навантаження між різними радіотехнологіями, повинні бути розширені, щоб охопити балансування навантаження між наземною RAN та не наземною RAN.

2.3 Багатопроменева модель NTN 5G NR

Покращення технології виробництва супутників в поєднанні зі зростаючим попитом на послуги в будь-який час і в будь-якому місці привертають увагу операторів зв'язку і дослідницьких організацій до рішень NTN, які будуть інтегровані з системами 5G NR. 5G NTN покликаний забезпечити більш широку зону покриття, поліпшити безперервність обслуговування як для масових пристроїв зв'язку, так і для користувачів, які подорожують на рухомих платформах, а також допомогти забезпечити доступність послуг в критично важливих випадках використання (наприклад, стихійні лиха, відновлення після збоїв і громадська безпека). Крім того, 5G NTN може підвищити масштабованість мережі за рахунок надання послуг багатоадресної та широкомовної передачі, тобто вдосконаленою служби мультимедійної широкомовної та багатоадресної передачі (eMBMS).

В останні роки дослідницьке співтовариство в галузі телекомунікацій було особливо зацікавлене в дослідженні багатопроменевих NTN (тобто HTS). У таких системах частоти повторно використовуються серед променів, а доступні смуги частот залежать від коефіцієнта повторного використання частот, який визначає, скільки і які набори частот повторно використовуються в променях. Коефіцієнти повторного використання частоти: один (тобто, схема повторного використання повної частоти), два (тобто чотириколірна схема повторного використання частоти) або три (тобто триколірна схема повторного використання частоти) є доступними варіантами 3GPP.

Очікується, що в наступні роки багатопроменеві NTN будуть відігравати вирішальну роль в забезпеченні eMBMS через їх здатності досягати більш високих швидкостей передачі даних. Більш того, eMBMS також надаватиметься в

одночастотному режимі (MBSFN) з попередньою мережевою синхронізацією. Багатопроменеві NTN і MBSFN демонструють важливі переваги, революцію традиційних стільникових мереж та традиційний режим передачі «точка-точка» (PTP), відповідно.

У існуючій літературі розглядаються різні ключові підходи (тобто методи RRM та попереднього кодування) для обмеження міжпроменевих перешкод у приймачах NTN через ненульові бічні пелюстки діаграм спрямованості випромінювання. У цій роботі ми пропонуємо інше рішення для зменшення перешкод між терміналами NTN на краях променя шляхом використання одночасних передач MBSFN серед синхронізованих променів одного і того ж супутника для доставки заданого контенту одним і тим же радіоресурсами. Отже, кілька форм сигналів, що належать різним променям, розглядаються як джерело конструктивних перешкод приймача NTN.

Наскільки нам відомо, підхід MBSFN раніше не розглядався для багатопроменевого супутникового зв'язку. Таким чином, у цій роботі ми визначаємо концепції передачі променя MBSFN, області променя синхронізації (SBA) та області променя MBSFN (MBA), на основі яких ми розробляємо новий алгоритм формування MBA, спрямований на збільшення ADR у багатопроменевій NTN системи. У кожному MBA промені синхронізуються в часі для доставки одного й того самого потоку eMBB до кількох терміналів NTN за одними й тими радіоресурсами (тобто передача MBSFN1 виконується кількома променями).

Ми пропонуємо метод розподілу радіоресурсів, який дозволяє уникнути міжпроменевих перешкод при доставці кількох елементів контенту. Ми враховуємо мобільність терміналів NTN і, отже, зміни якості каналу у часі. Оскільки жодна з пропозицій не готова до систем 5G NR, ми адаптуємо нашу модель системи з урахуванням технології 5G NR.

Пропонована схема SF-MBT спрямована на ефективний розподіл радіоресурсів для забезпечення вищого ADR у багатопроменевій системі NTN порівняно зі схемами повторного використання частот. Для досягнення цієї мети наш алгоритм SF-MBT використовує концепцію MBSFN серед променів одного і

того ж GEO-супутника шляхом синхронізації (у часі) передачі променів при доставці однієї і тієї ж послуги eMBB з використанням одного і того ж набору RB. Параметри передачі променя MBSFN встановлюються відповідно до найнижчої MCS (тобто найбільш стійкої модуляції), що підтримується всіма терміналами NTN, зацікавленими в цьому контенті eMBB. На рис. 2.1 представлений алгоритм SFMBT за допомогою блок-схеми.

Принцип роботи запропонованої схеми полягає в тому, щоб згрупувати промені, що належать SBA GEO-супутнику, у декілька MBA для кожного контенту, таким чином, беручи до уваги інтереси NTN. Коли промінь належить виключно одному MBA або незалежному MBA, всі термінали NTN в зоні дії цього променя зацікавлені в тому самому контенті, тоді як коли промінь належить двом або більше MBA, він повинен доставляти два або більше елемента контенту. . Для останнього контексту ми визначаємо перекриваються MBA як два або більше MBA, які спільно використовують принаймні один промінь. У разі перекриття MBA схема SF-MBT виконує розподіл радіоресурсів за задіяними MBA, щоб уникнути міжпроменевих перешкод. Крім того, схема SF-MBT покращує ADR системи, задовольняючи обмеження обслуговування всіх зацікавлених терміналів NTN.

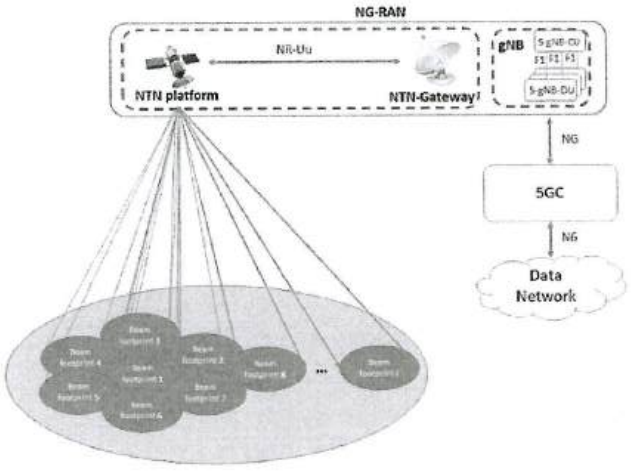


Рис. 2.2 Платформи NTN мережі

Як еталонну платформу NTN ми розглядаємо супутник GEO (GEO-sat), що працює в частоті S-діапазону (тобто 2 ГГц). Наземним компонентом GEO-sat є

GEO-gNB, який відповідає за процедури адаптації каналу. Зокрема, GEO-sat збирає та пересилає весь зворотний зв'язок з інформацією про статус каналу від терміналів NTN у GEO-gNB, який вибирає відповідну схему модуляції та кодування (MCS) для доставки заданого контенту eMBB у декілька пунктів призначення.

Зворотний зв'язок терміналів NTN передається фідерним каналом, який позначається як канал від терміналів NTN до GEO-gNB. Дані eMBB передаються через службовий канал, який позначається як канал NTNgNB до терміналів NTN. Затримка приймання-передачі (RTD) - це час, необхідний сигналу для проходження від терміналу NTN до NTN шлюзу і назад (або навпаки). Для супутника на основі корисного навантаження RTD зазвичай дорівнює 541,46 мс.

Розглянута багатопроменева система NTN заснована на технології 5G NR, яка підтримує кілька масштабованих нумерологій мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM) (μ = від 0 до 4), кожна з яких характеризується своїм рознесенням піднесучих (SCS, від 15 кГц до 240 кГц) наступного рівняння:

$$SCS = 15kHz \times 2^{\mu}, \tag{2.1}$$

де μ – нумерологічний індекс.

Передача NR заснована на OFDM з циклічним префіксом (CP-OFDM) у низхідній лінії зв'язку, тоді як у висхідній лінії зв'язку підтримуються як CPOFDM, так і OFDM з дискретним перетворенням Фур'є з розширенням спектра (DFT-OFDM) з CP. Передачі по низхідній та висхідній лініях зв'язку NR організовані в кадрах, кожен із яких складається з субкадрів тривалістю в 1 мілісекунду. Кожен підкадр має різну кількість слотів відповідно до обраної нумерології. Управління радіочастотним спектром здійснюється за допомогою блоків ресурсів (RB), кожен з яких складається з 12 послідовних та рівномірно рознесених піднесучих. У цій роботі ми посилаємося на термінали NTN, зацікавлені у послугах eMBB; отже, ми вибираємо нумерологію μ = 0 з SCS = 15 кГц, яка є найбільш підходящою для додатків eMBB, які доставляють через eMBMS.

Ми визначаємо зону синхронізації променя (SBA) як зону покриття GEO-sat,

де можуть бути сформовані один або кілька MBA. Ми визначаємо зону променя MBSFN (MBA) як область, що відповідає двом або більше сусіднім променям, де відповідні промені синхронізуються в часі для доставки одного і того ж потоку контенту по одним і тим же радіоресурсам в декілька пунктів призначення, виконуючи передачу променя MBSFN. Ми позначаємо M як набір всіх MBA, включених до SBA, а E – це набір всього вмісту eMBB, запрошеного до SBA. Нехай T буде набором усіх терміналів NTN, які зацікавлені у широкомовному обслуговуванні вмісту eMBB:

$$|T| = \sum_{m \in M} |T_m|, \tag{2.2}$$

де T_m - набір терміналів NTN, що належать m-му MBA.

Ми позначаємо RB як набір доступних радіоресурсів (тобто терміни RB). Нехай RB_m буде кількістю RB, призначених для променів m-го MBA. Загальна кількість RB, що виділяються m-му MBA, не повинна перевищувати кількість доступних RB:

$$|RB_m| \leq |RB|, \forall_m \in M, \tag{2.3}$$

Якщо одна або кілька зон охоплення променя належать кільком MBA, сума RB, призначених променям цих MBA, не повинна перевищувати кількість доступних RB, щоб уникнути міжпроменевих перешкод:

$$\sum_{m \in M} |RB_m| \leq |RB|, \tag{2.4}$$

Метою пропонованої схеми RRM є збільшення загальної ADR багатопроменевої системи NTN шляхом задоволення вищезазначених обмежень при виконанні адаптації каналу з динамічним вибором рівня MCS для передачі променя MBSFN у відповідності з інформацією зворотного зв'язку CSI, надісланої

через всі термінали NTN до GEO-sat. Посилаючись на SBA як на набір M MBA, ADR визначається так:

$$ADR = \sum ADR_m, \tag{2.5}$$

де ADR терміналів NTN, що приймають контент m-м MBA за допомогою передачі променя MBSFN, представлений як:

$$ADR_m = \sum_{t \in T} Rate(t) \times \left| RB_m \right|, \forall_m \in M, \tag{2.6}$$

де Rate(t) - це мінімальна швидкість передачі даних на RB, що відноситься до t-го терміналу NTN з найнижчим MCS з усіх терміналів NTN в m-му MBA.

2.4 Сценарій розгортання NTN за допомогою низькоорбітальних угрупувань

У мережах супутникового зв'язку використовуються космічні платформи, які включають супутники на низькій навколоземній орбіті (LEO), супутники на середній навколоземній орбіті (MEO) та супутники на геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO).

За останні кілька років світ став свідком відродження інтересу до широкосмугового зв'язку, що надається мережами LEO NTN із великими супутниковими угрупованнями (наприклад, Starlink, Kuiper та OneWeb). Щоб отримати вигоду від масштабу системи 5G супутникова індустрія підключилася до процесу 3GPP для інтеграції супутникових мереж в систему 5G NR(нова технологія стільникового зв'язку). HAPS - це повітряні платформи, які можуть включати літаки, повітряні кулі і дирижаблі. У технології NTN основна увага приділяється станціям із висотною платформою, таким як базові станції міжнародного мобільного зв'язку, відомі як HABS (англ. high-altitude platform stations as IMT base

stations). Система HABS надає послуги мобільного зв'язку в тих же смугах частот, що і наземні мобільні мережі.

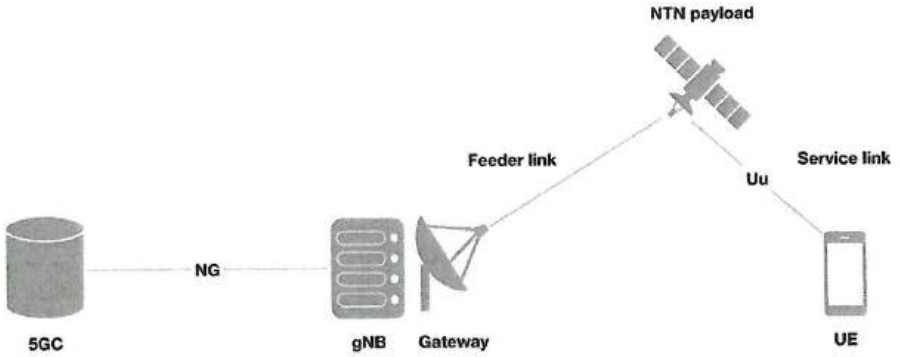


Рис. 2.3 Архітектура NTN із прозорим корисним навантаженням

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

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

У цьому розділі описується реалізований симулятор. На рисунку 2.4 показано блок-схему процедури симулятора. Спочатку UE випадковим чином скидаються у зоні, покритій кількома супутниками. У цій області кут місця між кожним UE та кожним супутником становить від 30 до 90 градусів. Потім супутники транслюють

опорні сигнали позиціонування на UE. Потім слід обчислення коефіцієнтів каналу та ефектів каналу програми. В імітатор вбудовані дві моделі каналів: модель великого завмирання і модель швидкого завмирання. Також додається ефект втрат на трасі та згасання в тіні, і розраховується відношення несуча / шум (CNR). Крім того, до сигналу додається гауссовський білий шум (WGN).

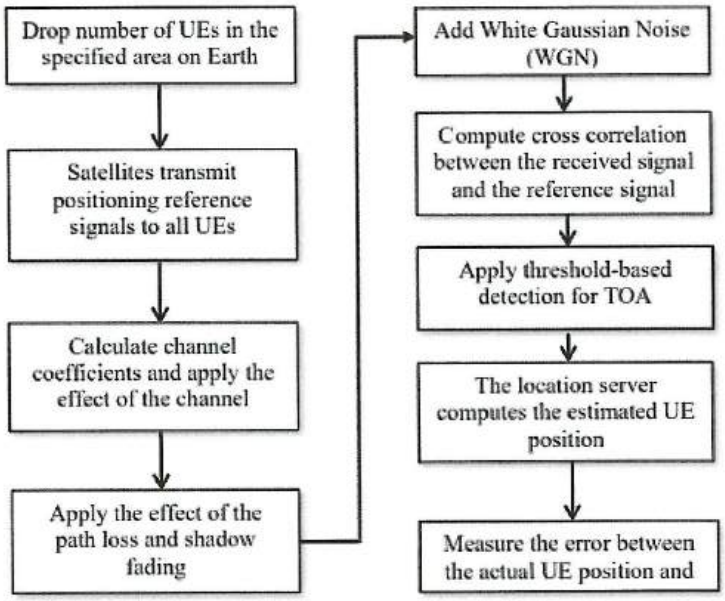


Рис. 2.4 Блок-схема процедури симулятора

UE приймає переданий сигнал після застосування каналу та обчислює кореляцію між прийнятим сигналом та опорним сигналом. Потім він обчислює TOA першого шляху, використовуючи метод, що базується на порозі. Нарешті, сервер позиціонування обчислює оцінне положення UE з використанням оцінювача максимальної правдоподібності (MLE).

Як еталонне супутникове угруповання використовується угруповання Starlink Phase I. Це сузір'я надає інтернет-послуги з високою швидкістю і низькою затримкою для користувачів у всьому світі, навіть у районах, що недостатньо обслуговуються. Це робить його одним із найцікавіших сузір'їв сьогодні. Сузір'я Starlink Phase I, як показано на рисунку 2.5 складається з 24 площин. У кожній площині 66 супутників, що у сумі дає 1584 супутники, що покривають всю Землю.

Супутники – супутники LEO на висоті 550 км. Орбіти нахилені на 53^0 по відношенню до екватора, а відстань між орбітальними площинами дорівнює 15^0.

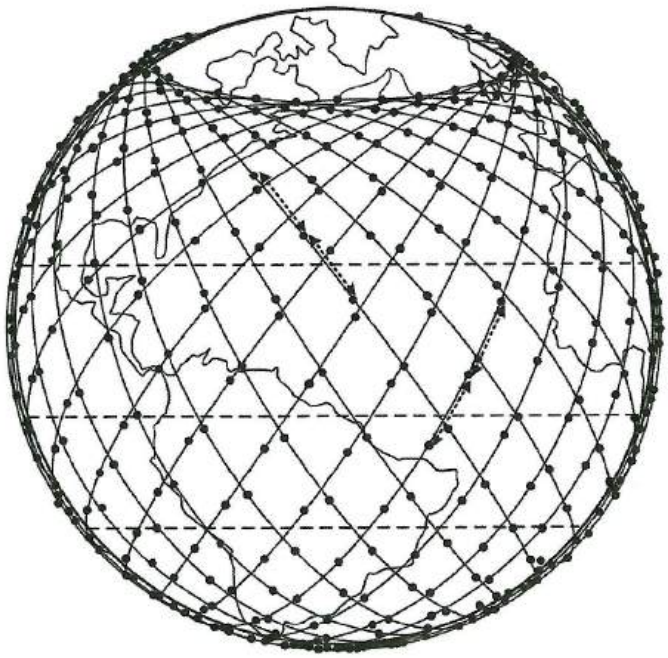


Рис. 2.5 Розгортання NTN за допомогою низькоорбітальних угрупувань LEO

Моделювання у цій дисертації зосереджено певної області Землі. Ця область має форму кола з радіусом, що дорівнює 850 км, як показано на рис. 2.6. Ця область покрита 9 супутниками двох різних орбітах. 9 супутників розділені на 5 супутників на першій орбіті та 4 супутники на другій орбіті. Перша орбіта нахилена на 2°, а друга орбіта нахилена на 17°.

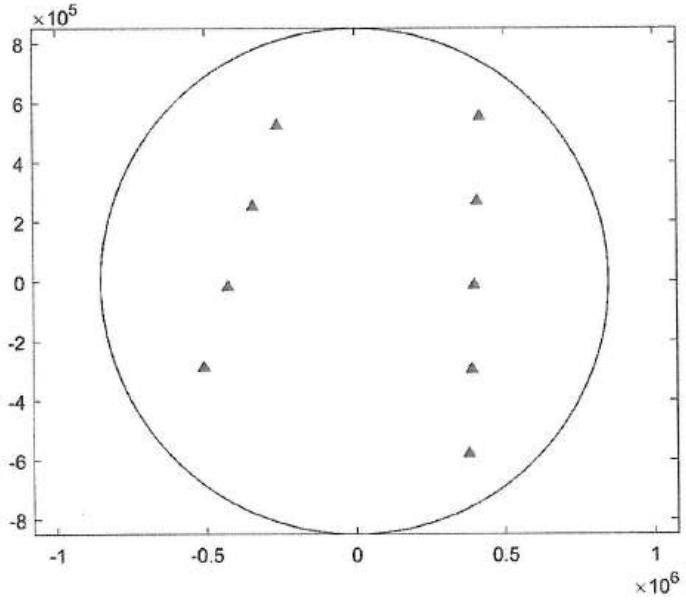


Рис. 2.6 Моделювання певної області Землі з радіусом 850 км

Кожен супутник випромінює 19 променів, утворюючи 19 зон охоплення променя Землі, як показано на рисунку 2.7.

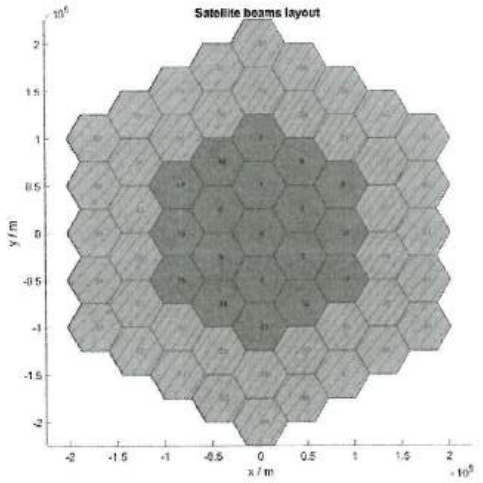


Рис. 2.7 Схема супутникових променів

У цьому симуляторі коефіцієнт повторного використання частоти дорівнює 1, що означає, що смуга частот системи використовується у всіх слідах променя. Діаграма променя переміщається разом із рухом супутника.

У цьому дипломі модель супутникової антени є рефлекторною антеною S-діапазону з круглою апертурою, яка має нормоване посилення антени наступним

чином:

Супутникова антена, що використовується, має максимальне посилення передавальної антени 30 дБі, дорівнює 10 довжинам хвиль, ширина променя по 3 дБ становить 4,4127. Його нормалізована діаграма посилення показано рисунку 2.8.

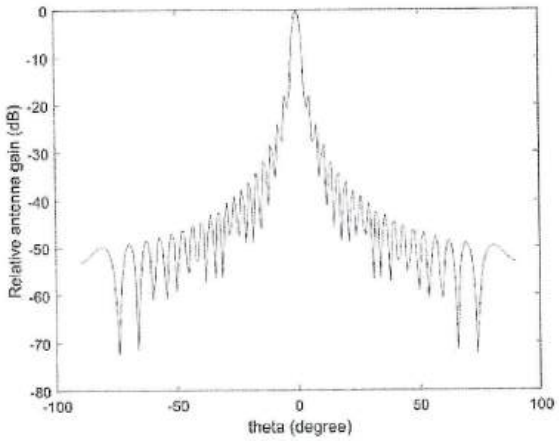


Рис. 2.8 Нормалізована діаграма посилення

Варіант використання UE – це портативний корпус S-діапазону з всеспрямованою антеною, яка має лінійну поляризацію. Коефіцієнти посилення передавальної та приймальної антен дорівнюють 0 дБі.

У мережах NTN виникають високі доплерівські зрушення через рух супутника і руху UE, які призводять до зміщення частоти в сигналі. Зсув частоти (FO) розраховується так:

$$\mathrm{FO} = (\mathrm{A}UE + \mathrm{DS}Sat + \mathrm{DS}UE) \times 10{-}6 \times \mathrm{f}c \tag{2.7}$$

де AUE - точність кристала UE, DSSat - доплерівський зсув через рух супутника, DSUE - доплерівський зсув через рух UE, а fc - несуча частота. У цьому моделюванні AUE дорівнює 10ppm, DSSat - це максимальний доплерівський зсув для супутника LEO на вказаній висоті, як показано в таблиці 3.1, fc = 2 ГГц (S-діапазон) і DS

$$\mathrm{DS}ue = \mathrm{f}c \times \mathrm{V} \times cos\ \theta\ /\ c \tag{2.8}$$

де V - швидкість UE, θ - кут між вектором швидкості UE та напрямом поширення сигналу між UE та супутником, c - швидкість світла.

Таблиця 2.1

Максимальна затримка та допплерівський зсув для супутника LEO на різних висотах

Altitude / Parameters	**LEO at 600 km**	**LEO at 1200 km**
Delay	6.44 ms	10.44 ms
Doppler Shift	+/- 48 kHz	+/- 42 kHz

У таблиці 2.1 показано максимальну затримку поширення між супутником LEO на різних висотах і UE при куті місця 10^0. Затримки поширення в NTN набагато більше, ніж у TN. Він залежить від висоти супутника. Для супутників LEO затримка поширення становить кілька мілісекунд.

3. СТВОРЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ГРУПУВАННЬ МІКРО- І НАНОСУПУТНИКІВ

3.1 Застосування «розподіленого супутника» в радіолокаційних системах із синтезованою апертурою (SAR-система)

Вимоги операторів супутникових SAR-систем та споживачів їхньої інформації визначають необхідність збільшувати інформаційний зміст у зображеннях SAR, що може бути досягнуто багатоканальної роботи (поляриметрія, робота в багаточастотному режимі), подальше покращення дозволу за дальністю, по азимуту та тимчасовим показникам (частота повторної зйомки однієї і тієї ж області), а також спостереження під різними кутами (інтерферометрія та томографія). Ці вимоги стимулюють розробку нових технологій, до яких належать цифрове формування променя, використання технології MIMO, антени з великим відбивачем, бі- та мультистатичні системи.

Дистанційне зондування Землі. Використання архітектури «розподіленого супутника» в SAR-системах дозволяє реалізувати технологію мультистатичної радіолокації з "м'якою" інтерференційною базою (від 200 м до 1 км). Для реалізації технології радіолокації із синтезованою апертурою рознесено на окремі супутники передавач, для роботи якого потрібна відносно велика потужність від системи електропостачання платформи, і приймальна частина. Додатковою перевагою такого рішення є просторове рознесення передавача та приймача, що дозволяє скоротити паузи між випромінюванням зондувальних сигналів та, відповідно, поліпшити роздільну здатність системи. На рис. 3.1 представлена схема організації та взаємодії «розподіленого супутника». До складу «розподіленого супутника» входять: супутник-передавач, який є ядром супутникового кластера, та кількох супутників-приймачів. Супутник-передавач побудований на платформи мікросупутника. Супутники-приймачі побудовані на платформі куб-сат.

Як зазначено, мультистатичний режим роботи супутникових SAR-систем має

наступні переваги:

- Отримання високоточних цифрових карт рельєфу місцевості та тривимірних зображень об'єктів;

- можливість одночасного спостереження об'єкта під різними ракурсами;

- реалізація поляриметричної інтерферометрії;

- багаторазове некогерентне накопичення.

Супутник-передавач виконує такі функції:

- Управління функціонуванням «розподіленого супутника»;

- формування та передача (випромінювання) зондувального сигналу складної структури у частотному діапазоні, що використовується.

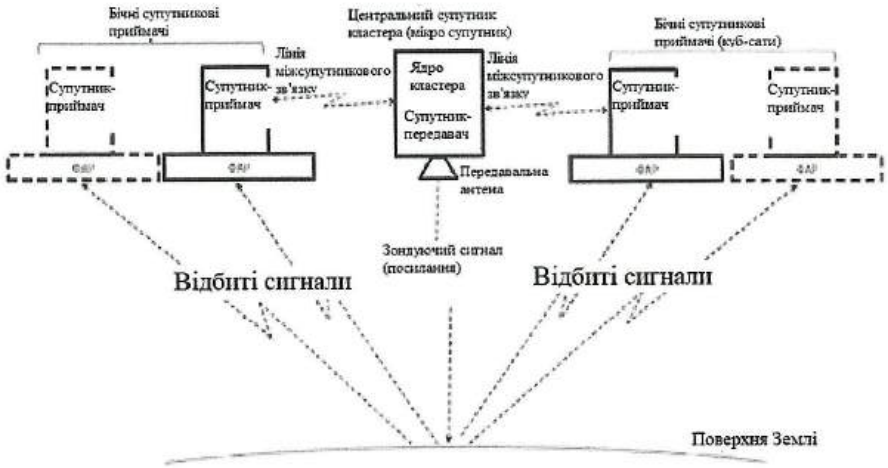


Рис. 3.1 Застосування концепції «розподіленого супутника» для задач дистанційного зондування із синтезованою апертурою

Передавач виконує такі функції:

- управління функціонуванням «розподіленого супутника»;

- формування та передача (випромінювання) зондувального сигналу складної структури у частотному діапазоні;

- проведення вимірювань взаємного розташування супутника-передавача та супутників-приймачів з визначенням похилої дальності взаємного кутового розташування, оцінка часу поширення сигналу по лінії міжсупутникового зв'язку;

- формування та підтримка місцевої шкали часу для синхронізації передачі зондувального сигналу та прийому відбитого сигналу;

- керування польотом супутника-ретранслятора, прийом від наземного комплексу управління команд управління, їх обробка, трансляція на наземний комплекс управління телеметричною інформацією про стан супутника-передавача;

- прийом від наземного комплексу управління та трансляція команд управління, адресованих супутникам-приймачам, прийом від супутників-приймачів телеметричної інформації та трансляція цієї інформації на наземний комплекс управління (при штатній експлуатації);

- прийом від супутників-приймачів інформаційного потоку та його трансляція на наземну станцію прийому інформації.

Супутник-приймач виконує такі функції:

- прийом від супутника-передавача позначок часу зі зразком копії переданого зондуючого сигналу;

- прийом відбитого сигналу;

- синхронізація шкали часу для реалізації кореляційної обробки прийнятого сигналу;

- передача цифрового потоку комплексної радіоголограми на наземну станцію прийому інформації та/або на супутник-передавач для подальшої ретрансляції на наземну станцію прийому;

- прийом по лінії міжсупутникового зв'язку команд управління та передача телеметричної інформації.

Важливе місце у роботі «розподіленого супутника» як супутника із синтезованою апертурою займає міжсупутникова радіолінія. Міжсупутникова радіолінія є дуплексною радіолінією і призначена для комплексного вирішення задач визначення геометричних взаємин між супутником-передавачем і супутниками-приймачами, передачі результатів первинної кореляційної обробки прийнятих відгуків зондувального сигналу та передач командно-телеметричної інформації. Міжсупутникова радіолінія організується окремо до кожного супутника-приймача. Щодо кожного супутника приймача міжсупутникова радіолінія забезпечує вимірювання похилої дальності та визначення кутів (кут місця та азимут у площині місцевого горизонту) на основі моноімпульсного методу

стеження. Вимірювання похилої дальності дозволяє забезпечити синхронізацію передачі та прийому для реалізації процедури кореляційної обробки прийнятого відгуку зондувального сигналу супутні ке-приймачі. Вимірювання геометрії взаємного розташування супутника-передавача та супутників-приймачів дозволяє визначити геометричні параметри розміщення передавальної та приймальної антен системи.

"Розподілений супутник" працює наступним чином (рис. 3.2).

Супутник-передавач формує зондуючий сигнал складної форми із заданими авто та взаємнокореляційними властивостями. Сформований сигнал випромінюється передавальної антеною супутника в робочому частотному діапазоні (як правило, діапазони S, C, X) у напрямку поверхні Землі. Ширина діаграми спрямованості та орієнтація передавальної антени щодо направлення надір визначається відповідно до прийнятої технології роботи систем із синтезованою апертурою (як правило, 30°-45°). Копія зондуючого сигналу передається супутникам-приймачам каналом міжсупутникового зв'язку. Дані про довжину міжсупутникової радіолінії дозволяють визначити величину затримки сигналу, обумовлену часом поширення сигналу від супутника-передавача до супутника-приймача, і синхронізувати бортову шкалу часу супутників у складі «розподіленого супутника».

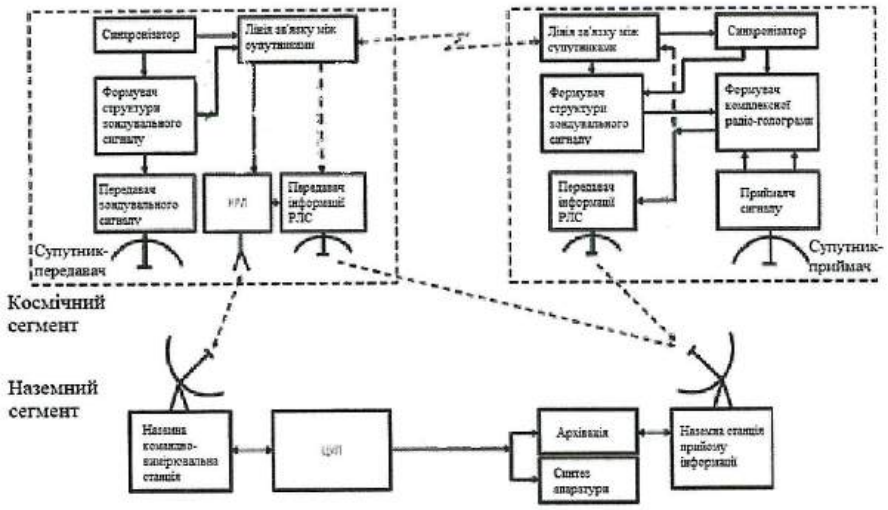


Рис. 3.2 Структурна схема SAR-системи ДЗЗ із використанням «розподіленого супутника»

Кожен супутник-приймач приймає відбитий сигнал і перетворює його на цифровий потік комплексного цифрового сигналу. Потік комплексного цифрового сигналу надходить на подальшу обробку у формувач комплексної радіоголограми. Супутник-приймач формує опорний сигнал, який є копією переданого зондувального сигналу. Опорний сигнал надходить на формувач комплексної радіоголограми, та використовується як опорний сигнал при кореляційній обробці. Синхронізацію процедури кореляційної обробки прийнятого сигналу забезпечує синхронізатор.

Результат кореляційної обробки прийнятого сигналу надходить у вигляді цифрового потоку даних передавача інформації РЛС для трансляції на наземну станцію прийому інформації або лінію міжсупутникового зв'язку для передачі на супутник-передавач, який забезпечує трансляцію прийнятого потоку на наземну станцію прийому інформації.

Супутник-передавач по радіоканалу командно-телеметричної радіолінії (КРЛ) передає наземну командно-вимірювальну станцію дані про своєму орбітальному положенні та взаємному розташуванні супутника-передавача та супутників-приймачів. Дані про взаємне розташування супутника-передавача та супутників-приймачів формує лінія міжсупутникового зв'язку. Ці дані використовуються наземним сегментом при реалізації алгоритму синтезу апертури з «м'якою» базою.

На малюнку наведено алгоритм синтезу SAR-зображення з використанням швидкого перетворення Фур'є для «розподіленого супутника». Особливістю алгоритму є розподіл обчислювального навантаження, пов'язаного з обробкою в цифрової форми прийнятих сигналів та обчислення прямого та зворотного швидкого перетворення Фур'є над масивами комплексних чисел між космічним та наземним сегментами. Космічний сегмент забезпечує формування комплексного радіоголографічного зображення. Процедура синтезу апертури покладено на наземний сегмент.

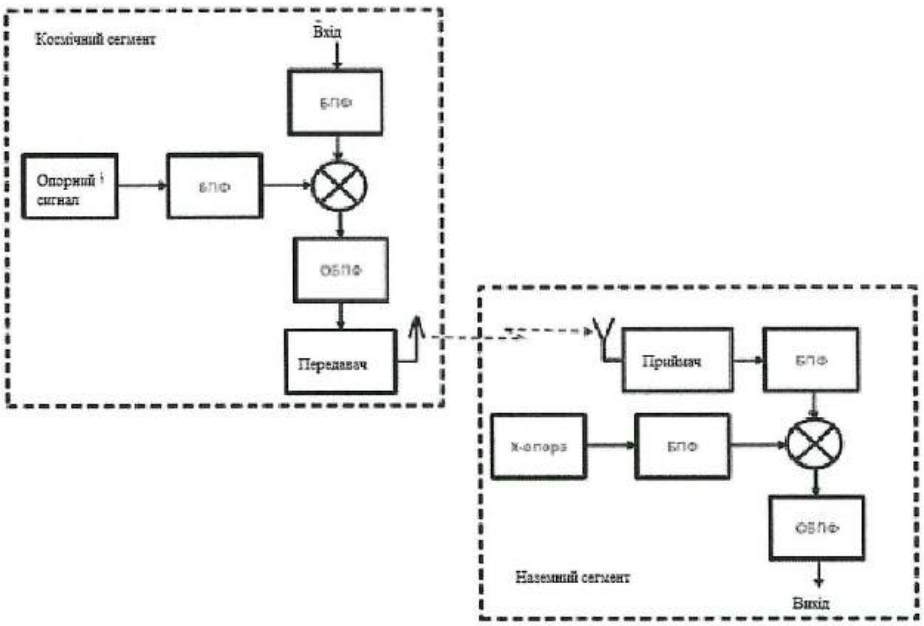


Рис. 3.3 Алгоритм синтезу радіолокаційного зображення з використанням «розподіленого супутника»

Входом алгоритму є цифровий потік комплексних відліків прийнятого сигналу, який отримується на виході приймача сигналу (див. рис. 3.2). Кореляційна обробка прийнятого сигналу у цифровій формі виконується методом множення спектра (у цифровій формі) прийнятого сигналу зі спектром опорного сигналу (рис. 3.3). Формування спектрів прийнятого та опорного сигналів здійснюється з використанням методів швидкого перетворення Фур'є (БПФ). Результат перемноження спектрів піддається зворотному перетворенню Фур'є з використанням алгоритму зворотного швидкого перетворення Фур'є (ОБПФ). В результаті перетворення формується цифрове комплексне радіоголографічне зображення, яке передається по радіоканалу з космічного сегменту на наземний сегмент.

Наземний сегмент на основі інформації центру управління польотом (ЦУП) про взаємне розташування супутника-передавача та супутників-приймачів (див. рис. 3.2) формує сигнали "Х-опора" (див. рис. 3.3). Прийнята цифрова послідовність комплексного радіо голографічного зображення та сигнал «Х-опора» піддаються перетворення Фур'є за допомогою алгоритму БПФ. Після перемноження спектрів виконується зворотне перетворення Фур'є та формується

підсумкове радіолокаційне зображення.

3.2 Застосування «розподіленого супутника» у телекомунікаційних системах

В останнє десятиліття знову зріс інтерес операторів та розробників систем супутникової зв'язку до низькоорбітальних систем з використанням міні- та мікросупутників. Ефективність функціонування низькоорбітальних систем підтверджено практичним досвідом експлуатації систем "Iridium", "Global Star", "Orbcom".

Сьогодні основним форм-фактором супутників для проектованих низькоорбітальних супутникових систем є малий супутник (маса 500-1000 кг) та міні супутник (маса 100-500 кг). Разом з тим, розглядаються варіанти використання мікросупутників (маса 10-100 кг) і куб-сат (маса 1-10 кг). Як приклад можна навести експериментальні супутники LEO Vantage 1 та LEO Vantage 2, виготовлені на замовлення канадського телекомунікаційного супутникового оператора Telesat для вивчення та відпрацювання технології низькоорбітальної системи широкосмугового доступу.

До переваг використання супутників форм-фактору куб-сат відносяться:

- простота конструкції;
- низька вартість;
- уніфікація та можливість оперативної заміни елементів системи, що відмовили, шляхом заміни супутника (куб-сата).

До недоліків конфігурації системи із супутниками форм-фактору куб-сат відноситься складність підтримки зміни орбітального угруповання та управління польотом супутників, що з великою кількістю супутників у складі орбітального угруповання.

Чинником, що стримує використання супутників типу куб-сат у складі низькоорбітальних систем супутникового зв'язку, є низька продуктивність (потужність) бортових систем енергопостачання та відведення тепла. Крім того,

складною завданням є адаптація телекомунікаційної корисного навантаження до розмірів куб-сата.

Архітектура «розподіленого супутника» дозволяє розподілити функціональні завдання телекомунікаційного корисного навантаження на кілька супутників. На рис. 3.4 представлений варіант архітектури низькоорбітальної супутникової системи зв'язку.

До складу «розподіленого супутника» входять кореневий супутник та супутники-ретранслятори. Кореневий супутник виконує такі функції:

- управління функціонуванням «розподіленого супутника»;

- формування транспортних потоків DVB-S2, DVB-S2x для передачі в абонентських променях «розподіленого супутника» послуг кінцевим споживачам та передача цих потоків на супутники-ретранслятори для випромінювання в користувальницьких променях;

- прийом від супутників-ретрансляторів інформаційних потоків DVB-RCS/2 або WiMax від кінцевих користувачів та їх обробка;

- маршрутизація трафіку передачі потоків інформації на земні станції сполучення (GateWay) у променях станцій сполучення та до сусідніх «розподілених супутників» у лінії зв'язку між супутниками;

- проведення вимірювань взаємного розташування кореневого супутника та супутників-ретрансляторів з визначенням похилої дальності взаємного кутового розташування, оцінка часу поширення сигналу по лінії між супутникової зв'язку;

- формування та підтримка місцевої шкали часу для синхронізації функціонування супутників у складі «розподіленого супутника»;

- керування польотом кореневого супутника, прийом від наземного комплексу управління команд управління, їх обробка, трансляція на наземний комплекс управління телеметричною інформацією про стан кореневого супутника;

- прийом від наземного комплексу управління та трансляція команд управління, адресованих супутникам-ретрансляторам, прийом від супутників-ретрансляторів телеметричної інформації та трансляція цієї інформації на наземний комплекс керування (при штатній експлуатації).

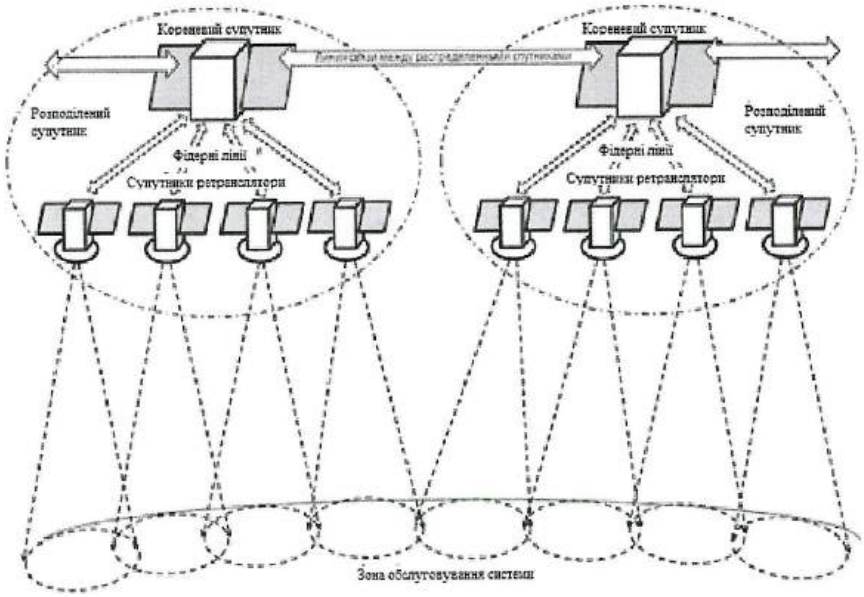


Рис. 3.4 Застосування концепції «розподіленого супутника» для низькоорбітальної системи супутникового зв'язку

Супутник-ретранслятор виконує такі функції:

- формування у Ku-діапазоні променів користувачів низькоорбітальної системи для надання послуг кінцевим користувачам низькоорбітальної системи супутникового зв'язку;

- прийом від кореневого супутника транспортного потоку у форматі DVB-S2, DVB-S2x та передача цього потоку з променю користувачів кінцевим споживачам;

- прийом у промені користувачів інформації від кінцевих споживачів у стандарті DVB-RCS/2 або Wi-Max, трансляція прийнятого потоку відбитого

сигналу на кореневий супутник по лінії зв'язку між супутниками у Ka-діапазоні;

- прийом від кореневого супутника команд управління (в режимі штатної експлуатації) та передача телеметричної інформації для трансляції на наземний комплекс керування;

- прийом команд управління від наземного комплексу управління та передача телеметричної інформації на командно-вимірювальну станцію наземного комплексу управління в аварійному режимі (при втраті зв'язку з кореневим супутником).

У низькоорбітальній системі супутникового зв'язку використовуються два

типи лінії зв'язку між супутниками:

- лінія зв'язку між «розподіленими супутниками» - радіолінія великої протяжності (до 1000 км і більше), яка з'єднує кореневі супутники високошвидкісними каналами передачі інформації та забезпечує циркуляцію інформації у системі супутникового зв'язку;

- лінія зв'язку всередині «розподіленого супутника»; - радіолінія малої протяжності (до 1 км), яка забезпечує циркуляцію інформації між кореневим супутником і супутниками ретрансляторами «розподіленого супутника», а також виконує вимірювання взаємного розташування супутників та відстаней між ними.

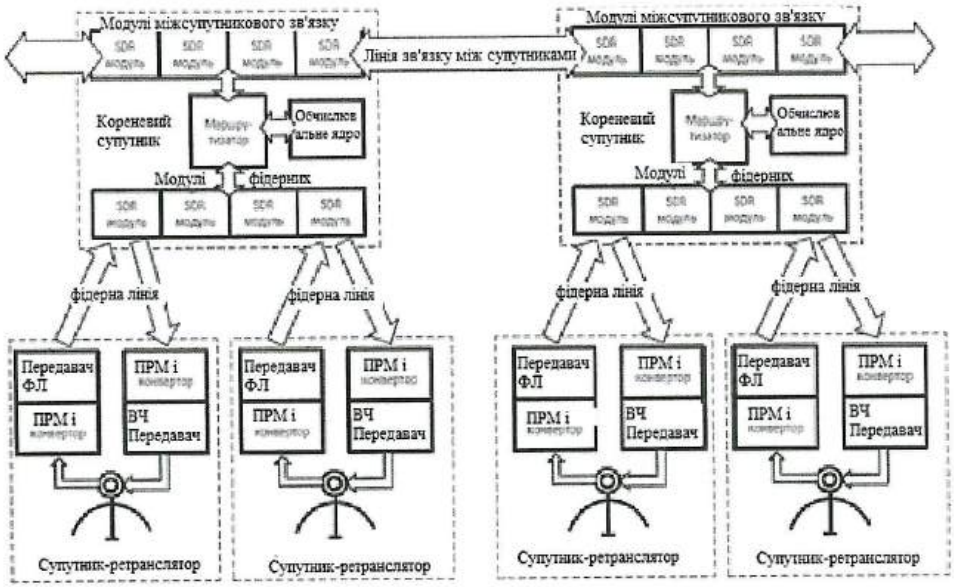


Рис. 3.5 Схема інформаційних потоків у розподіленому супутнику

На рис. 3.5 наведено схему функціонування розподіленого супутника у складі низькоорбітальної системи супутникового зв'язку (LEO-система). Космічний сегмент LEO-системи складається з декількох орбітальних площин, що мають однакову кількість розподілених супутників, однаковий спосіб, і відрізняються довготою висхідного вузла. У кожній орбітальній площині розподілені супутники рівномірно розміщені з однаковою відносною істинною аномалією.

LEO-система формує такі промені:

- промені користувачів, призначені для забезпечення зв'язку космічного сегмента з терміналами кінцевих користувачів (User's Terminal – UT);

- промені станцій сполучення (шлюзових станцій, Gate Way – GW) для забезпечення зв'язку космічного сегмента зі станціями сполучення та через їх із наземною мережею зв'язку;

- промені ліній зв'язку між супутниками, призначені для забезпечення передачі інформації між розподіленими супутниками.

Інформаційним та інтелектуальним ядром розподіленого супутника є кореневим супутником. Маршрутизатор корисного навантаження кореневого супутника забезпечує маршрутизацію інформаційних потоків відповідно до статичних та динамічних таблиць маршрутизації.

Розподілені супутники у LEO-системі пов'язані між собою лініями зв'язку між супутниками, які формують магістральну мережу LEO-системи. Кожен розподілений супутник пов'язаний з двома сусідніми розподіленими супутниками в своєї орбітальної площини та з двома найближчими розподіленими супутниками у двох сусідніх орбітальні площини - по одному в кожній орбітальній площині. У складі розподіленого супутника функції підтримки лінії зв'язку між супутниками покладені на кореневий супутник, який оснащений чотирма модулями програмно-конфігурованого радіо (SDR модуль) та відповідними високочастотними блоками приймача-передавача (ВЧ модуль). SDR-модулі забезпечують формування транспортного потоку DVB-S2x для передачі інформації в магістральній мережі LEO-системи у променях зв'язку між супутниками.

Інформаційні потоки, призначені для передачі в променях користувачів формуються маршрутизатором та передаються на інтерфейси SDR-модулі фідерних ліній. Фідерні лінії забезпечують з'єднання кореневого супутника з супутниками-ретрансляторами та призначені для передачі транспортного потоку DVB-S2, DVB-S2x до кінцевих користувачів, і потоку DVB-RCS/2 або WiMAX від кінцевих користувачів. Фідерна лінія між кореневим супутником і супутником-ретранслятором є внутрішньою лінію зв'язку між супутниками у складі розподіленого супутника. Ця лінія – комбінована радіолінія, яка забезпечує дуплексну передачу інформації, вимірювання похилої дальності та взаємного кутового положення між кореневим супутником та супутниками-ретрансляторами.

Супутник-ретранслятор формує промінь/промені користувачів із обмеженою зоною обслуговування. Сукупність променів, що формуються супутниками-ретрансляторами, становлять зону обслуговування LEO системи. Вимоги щодо інтегральної зони обслуговування LEO-системи (географічна зона обслуговування) визначають вимоги до кількості розподілених супутників у системі загалом. Супутник-ретранслятор випромінює в промені користувачів потік DVB-S2, DVB-S2x (прямий канал) та приймає потоки DVB-RCS/2 або WiMAX від кінцевих користувачів.

3.3 Реалізація LEO-системи Інтернету Речів (IoT) на основі концепції «розподіленого супутника»

Перспективи впровадження та очікуване бурхливе розвиток Інтернету Речів (Internet of Things – IoT або, як його називають, Інтернету Всього (Internet of Every sing – IoE) ставлять перед операторами та розробниками телекомунікаційних систем завдання підготовки телекомунікаційних рішень, пристосованих до особливостей IoT.

Базовою платформою інформаційної системи IoT вибрано архітектуру «туманних обчислень» (Fog Computing – FC). На відміну від архітектури "хмарних обчислень" (Cloud Computing - CC), FC-архітектура орієнтована на наближення обчислювальних потужностей якомога ближче до межі мережі, де знаходяться датчики та пристрої. Компанія Cisco, учасник консорціуму OpenFog з розробці FC-архітектури, визначила місце туманних обчислень у багаторівневій моделі (Рис. 3.6, а).

FC-обчислення виконуються на проміжних рівнях обчислень між кінцевими точками та центром обробки даних (ЦОД). В результаті аналізу обсягу трафіку багаторівневої інформаційної архітектури розробники консорціуму OpenFog дійшли висновку про скорочення обсягу даних і виконання обчислювальних операцій над ними в міру переходу на вищі ієрархічні рівні інформаційної системи. Скорочення обсягу даних і обчислювальних операцій супроводжується

збільшенням інтелектуальної складової на більш високих рівнях (див. рис. 3.6, б).

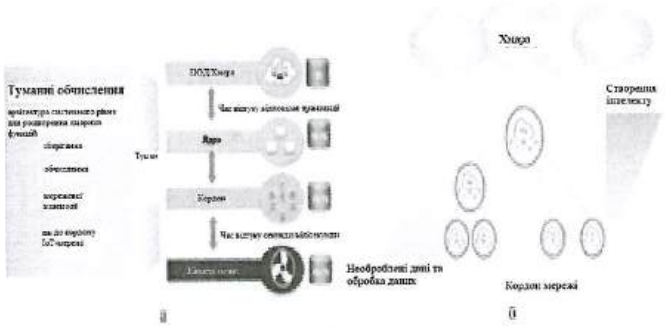


Рис. 3.6 "Туманні обчислення" в ієрархічній багаторівневій моделі обчислень IoT

Концепція «розподіленого супутника» може бути застосована при побудові супутникової системи надання послуг IoT. На рис. 3.7 наведено варіант «розподіленого супутника» з використанням тільки супутників форм-фактору куб-сат.

Як було розглянуто раніше, ядром «розподіленого супутника» є кореневий супутник. Кореневий супутник виконує функції маршрутизації та розподілу зовнішніх інформаційних потоків, що циркулюють між «розподіленими супутниками» по магістральній мережі LEO-системи, та внутрішніх інформаційних потоків усередині «розподіленого супутника» між його складовими частинами. На кореневий супутник покладено завдання управління польотом «розподіленого супутника», включаючи трансляцію командної та телеметричної інформації до та від супутників-ретрансляторів та інших елементів (в режимі штатної експлуатації), вимірювання взаємного розташування складових частин «розподіленого супутника».

Супутники-ретранслятори забезпечують передачу в променях користувачів транспортного потоку DVB-S2, DVB-S2x, та прийом потоків DVB-RCS/2, WiMAX від користувачів.

На відміну від раніше розглянутої структури, до складу корисного навантаження супутників-ретрансляторів включені SDR-модулі, призначені для формування та обробки транспортних потоків для передачі та прийому інформації до та від терміналів кінцевих користувачів. Для забезпечення зв'язку всередині

«розподіленого супутника» використовується модернізована мережа WiMAX. Основною причиною модифікації протоколу WiMAX для використання у складі «розподіленого супутника» є необхідність виконання вимірювань взаємного розташування супутників у складі «розподіленого супутника» та одночасно з вимірами передачі інформації для інформаційного обміну.

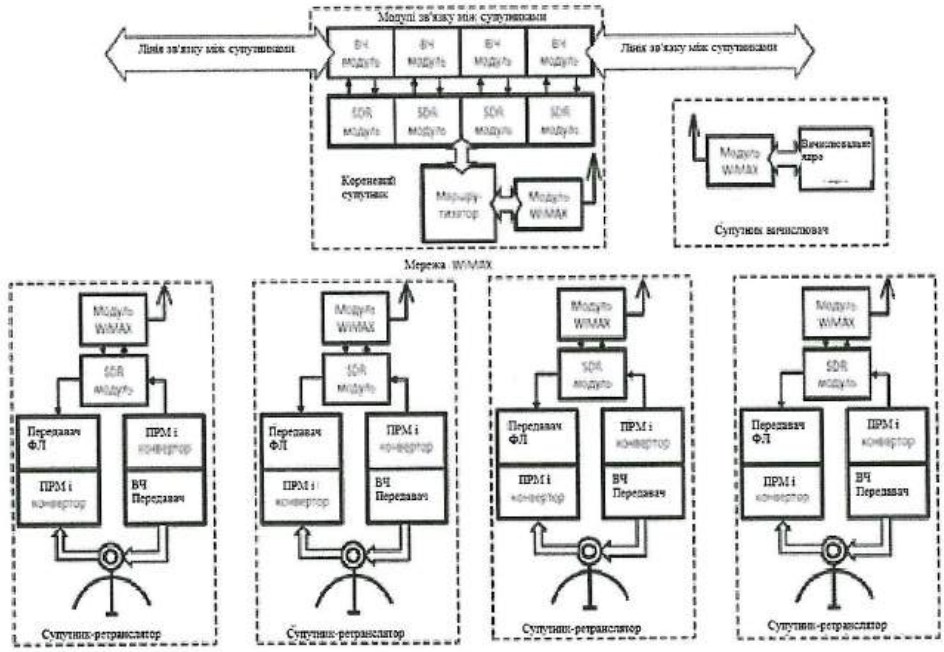


Рис. 3.7 Варіант "розподіленого супутника" для LEO-системи IoT з використанням куб-сат

Архітектура «розподіленого супутника» дозволяє реалізувати у космічному сегменті LEO-системи FC-архітектуру. Для цього до складу «розподіленого супутника» включається окремий супутник-обчислювач, завданням якого є виконання необхідних обчислень для забезпечення функціонування пристроїв IoT у межах зони обслуговування "розподіленого супутника". Корисним навантаженням куб-сата, що виконує роль супутника-обчислювача є бортовий комп'ютер. У разі недостатності обчислювальної потужності для обслуговування IoT пристроїв, можуть бути підключені обчислювальні потужності інших «розподілених супутників» з використанням ліній зв'язку між супутниками та алгоритмів розподілу обчислювального навантаження в розподіленій обчислювальній мережі.

Важливим завданням є підтримка бази даних, що містить результати обробки інформації пристроїв IoT та проведення необхідних обчислень. Дана база за природою IoT є локальною і тому має бути прив'язана до району розміщення IoT пристроїв. Враховуючи постійний рух угруповання LEO-супутників щодо поверхні Землі, у LEO-системі формується розподілена база даних із локалізацією до районів розміщення IoT-пристроїв та споживачів. Сегмент бази даних, прив'язаний до конкретного району, завантажується лініями зв'язку між супутниками на згадку супутника-обчислювача у міру наближення «розподіленого супутника» до обраного району розміщення IoT-пристроїв та споживачів IoT-послуг. При проходженні обраного району актуалізований за результатами обробки інформації та проведення обчислень для IoT-пристроїв сегмент бази даних передається по лініям зв'язку між супутниками наступного «розподіленому супутнику», який обслуговуватиме обраний район.

4. СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ НАНОСУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ

4.1 Технологічні та інженерні аспекти місій спостереження Землі наноспутниками: використання, тенденції та вдосконалення.

Одним із загальних намірів є надання багатьом країнам можливості керувати наносупутниками для місій спостереження Землі (ЕО) і ефективно використовувати дані за низькими витратами, а також розробляти та будувати орієнтовані на додатки місії [1].

І один із можливих методів для цього полягає в тому, щоб повною мірою скористатися поточними розробками ноу-хау, які призводять до додаткової мініатюризації інженерних компонентів, розвитку мікротехнологій для датчиків та інструментів, які дозволяють розробляти спеціальні, добре сфокусовані місії спостереження Землі. Тенденції технологічного прогресу в космічній сфері, важливі для боротьби зі стихійними лихами, описуються тим, що наносупутник може доставляти дані швидше, краще конкуруючи з потребами користувачів.

Ноу-хау прогресує в адресній мережі наземного сегмента, дозволяючи отримати успішний час відгуку та забезпечуючи орієнтоване на користувача керування космічним сегментом.

Тенденції в програмному сегменті економічно ефективних місій ЕО для попередження та підтримки катастроф зосереджені на нових програмах та нових продуктах даних [1].

Є деякі нові досягнення, які можуть продемонструвати суттєве покращення можливостей наносупутникових місій ЕО [1] [2]:

1) Об'єднання знань зі збору та візуалізації даних.

2) Повна утилізація нових малих ракет-носіїв і збільшення космічного туризму.

3) Розвиток менших, легших супутників з меншою потужністю, які можуть діяти як угруповання або незалежно.

Нині основні місця запуску супутників включають: 1) Куру, Французька Гвіана; 2) мис Канаверал, Флорида; 3) авіабаза Ванденберг, Каліфорнія; 4) Байконур, Казахстан; 5) Центр запуску супутників Jaquan, Китай; 6) Центр запуску супутників Тайюань, Китай; 7) Wenchang Satellite Launch Center, Китай; 8) Xichang Satellite Launch Center, Китай.

У цьому випадку слід визнати, що найбільш драматичною зміною став вихід російських, українських, китайських і малазійських систем запуску, які працювали як спільні підприємства з американськими чи європейськими компаніями. Сучасні системи запуску в усьому світі навіть починають використовувати ключові компоненти, виготовлені в інших країнах, додатково стираючи національні поділу. Сумарна доступність недорогих пускових установок і пропозиції дистриб'юторів пропонують як одиничні запуски угруповання, так і окремі корисні навантаження [3] [4].

У цьому плані велику роль відіграє система зв'язку. Система зв'язку – це окремий бортовий електронний комплекс засобів разом із наземним сегментом, який вирішує наступні завдання: низхідна лінія (до бортового прийому) та декодування бортових команд управління та числових даних, збір, зберігання, попереднє -обробка та аплінк (передача інформації на прийоми), а також траєкторні вимірювання. Антенні пристрої для висхідної та низхідної лінії зв'язку високочастотних радіосигналів є окремими системами. До складу цієї системи входять антени, коаксіальні кабелі та хвилеводи, пристрої комутації та блокування [5].

Зазвичай корисне навантаження місії наносупутника включає комунікаційне обладнання з антенами та ретранслятором, що складається з транспондерів. Інша частина супутника називається супутниковою шиною. Автобус транспортує комунікаційний корисний вантаж навколо своєї орбіти, забезпечує електрику, підтримує орбіту, спрямовує корисний вантаж, утримує супутник на станції та змінює орбіту. Підсистема теплового контролю підтримує електроніку та інші компоненти в безпечному температурному діапазоні протягом усього терміну служби наносупутника. Структура наносупутника об'єднує всі разом і захищає

компоненти під час запуску та після розгортання на орбіті. Бортовий радіомаяк передає сигнали на наземну станцію відстеження, телеметрії та командування (TT & C) (рис. 1) [6]. Бортова система телеметрії повідомляє про працездатність і статус усіх бортових систем і отримує команди для керування всіма бортовими системами для підтримки місії корисного навантаження для забезпечення безперервних послуг зв'язку для всіх користувачів. Антена Omni забезпечує зв'язок на всіх етапах місії [7].

У цих умовах антенні системи значно ускладнилися. Антени космічного сегмента: 1) забезпечують високі можливості підсилення відповідно до вимог користувача; 2) може просторово розділяти різні частини поля зору, дозволяючи використовувати існуючі смуги; 3) може зменшити перешкоди. З усіх ноу-хау, що використовуються в космічному сегменті, антенні системи найбільш різноманітні внаслідок різних робочих частот і системних вимог [6].

Отже, цілі цього дослідження такі:

1) Огляд наносупутникових систем спостереження Землі та вивчення їх основних характеристик.

2) Оцініть передумови розробки бортових антен і надайте деякі аналітичні дослідження.

3) Спроектуйте передавач і приймач квадратурної фазової маніпуляції смуги пропускання в Simulink.

4) Отримайте криві частоти бітових помилок за допомогою дизайну Simulink у поєднанні з m-файлом.

5) Згенеруйте зміщену квадратурну фазову маніпуляцію та дослідіть її характеристики.

Спостерігайте за діаграмами, сузір'ям і траєкторіями сигналу квадратурної фазової маніпуляції.



Рис. 4.1 Наносупутникове відстеження, телеметрія, управління та моніторинг (TTC & M) [6].

4.2 Наносупутникова система спостереження Землі

У наш час цивільні програми ЕО стали цінними засобами для тих, хто приймає рішення, у багатьох моментах [1]. Зразки таких осіб, які приймають рішення, включають менеджерів ресурсів, міських і регіональних планувальників, сільськогосподарських виробників і перших служб реагування на стихійні лиха. Дані ЕО можуть бути особливо цінними для малих країн і регіонів у підтримці їх майбутнього зростання.

Під час програми літньої сесії в 2006 році ми всі працювали над проектом SOL (Systeme d'Observation Locale або локальна система спостереження) [8]. Вибірка була врегульована за допомогою трьох тестів, які виявили зацікавленість у розвитку програми ЕО: Каталонія, Іспанія; Ельзас, Франція; і острів Маврикій. Запланований ланцюжок платежів для організацій ЕО на основі техніки структурної оптимізації, безпосередньо від отримувача ЕО до кінцевих користувачів як досягнення цієї інформації, показано на рисунку 2. Основні ідеї,

корисні для ланцюжка створення вартості, це проекти ЕО, що аналізуються, методи оцінки вартості та варіанти фінансування [1].

Після того, як невелика країна чи регіон розробляє власні програми ЕО, національну та міжнародну політику та законодавчу базу для космосу слід також розглянути разом із напрямком наукового розвитку та пакетним фінансуванням. За допомогою кооперативної моделі малі країни та регіони можуть подолати труднощі та розвивати програми ЕО, які відповідають детальним вимогам для будь-якого з регіонів. Проект SOL охоплює всі функції ЕО, щоб знайти найкращі рішення для малих країн або регіонів.

Приклад Каталонії, незалежної спільноти Іспанії, є одним із найбільш підходящих прикладів серед досліджуваних тестів, щоб довести важливість технології SmallSat у малих країнах і регіонах [1]. ЕО може бути цінним у Каталонії для виноградарства, картографування, екологічного моніторингу, ліквідації наслідків стихійних лих та гуманітарної допомоги. Відомо, що зараз Каталонія використовує дані ЕО для деяких застосувань, але регіон може додатково скористатися технологією ЕО та наростити потенціал у розробці системи ЕО.

Аналіз щільності та міцності пологу виноградної лози є важливим інструментом для оцінки врожаю та класу вина. Для досягнення такої позначки необхідна мінімальна просторова роздільна здатність щонайменше 2,0 м, незалежно від часових і радіометричних обмежень визначення. Що стосується екологічних застосувань, існує безліч застосувань ЕО, які можна спробувати застосувати за допомогою різних рішень (космічних, бортових або наземних) і в межах набору бюджетних обмежень.

Іншим варіантом було б використання бортових систем, об'єднаних із наземними спостереженнями на місці. Можливе космічне рішення може базуватися на використанні мікросупутника з датчиками середньої та високої роздільної здатності. Прикладом такого застосування може бути використання відповідної платформи, об'єднаної в угруповання DMC-2, з датчиком CHRIS, що забезпечує просторову роздільну здатність близько 17 м [1] [2].



Рис. 4.2 Ланцюжок створення вартості ЕО [1].

Це нове розширення є дуже надихаючим для бізнесу наносупутників SmallSat в Іспанії та пов'язане з наступним важливим застосуванням у Каталонії, як боротьба зі стихійними лихами. Повернемося до часів нижче, ніж один або два дні, як очікується, для належного управління річковими паводками, а також для підтвердження ідентичності поточного стану інфраструктури за властивостями будь-якого природного лиха короткочасного періоду. Тому будь-який новий супутник повинен бути інтегрований у вже існуюче угруповання, наприклад DMC.

Визнаний розрив між даними провайдерів ЕО та осіб, які приймають рішення, щодо систем ЕО, а також припущення, що кожен регіон чи країна має особливі потреби, скерували групу до створення зразка програмного забезпечення під назвою SOL Selection Tool (SOLST) [1].

Запропоновано в Пос. [1] Інструмент, такий як SOLST, може допомогти користувачам позначити відповідні рішення наборів даних для конкретного застосування. Системна архітектура цього інструменту складається з баз даних, електронного інтерфейсу та зв'язків між базами даних та інтерфейсом. Бази даних включають детальну інформацію про програми ЕО, типи даних і готовність, оцінку вартості системи та даних. Результати допомагають як варіанти для системи ЕО та/або даних, які є необов'язковими для регіону та програми, що перевіряється.

Як уже згадувалося раніше, співпраця часто є найбільш надійним і точним методом для невеликих країн і регіонів отримати доступ до даних ЕО, і це, здається, позитивно впливає і на наносупутник. посилання [1] зазначив, що Surrey Satellite Technology Limited є гарним прикладом спільного підприємства, яке призвело до розробки, виробництва, тестування та запуску кількох ідентичних наносупутників. Інший інструмент допоможе подолати обмеження таких супутників, підкресливши можливі компроміси. Для невеликих країн або регіонів критичними факторами є бюджет, технічні можливості та людські ресурси.

У посиланні [9] оцінив, що партнерство розробляється для виробництва,

складання та розгортання наносупутників у космосі. Деякі космічні виробничі компанії, як-от Made in Space, і постачальник послуг на низькій навколоземній орбіті NanoRacks співпрацюють із творцями CubeSat. Цей сервіс називається Stash & Deploy. Він постачатиме різноманітні стандартні та спеціальні компоненти на борту платформи для розгортання супутників, як-от Міжнародна космічна станція. Ці компоненти будуть використовуватися для швидкого виготовлення наносупутників.

Дослідження показують, що ринки нано- та мікросупутників зростуть із $702,4 млн у 2019 році до $1887,1 млн у 2024 році. Крім того, такі стартапи, як Spire і Black Sky Global, зібрали десятки мільйонів венчурних грошей від Bessemer Venture Partners, Lemnos. Labs, RRE Ventures і Vulcan Capital. Інший стартап, Skybox Imaging, залучив близько 91 мільйона доларів венчурного капіталу для супутників ЕО. Компанію розробив технологічний гігант Google за 500 мільйонів доларів у 2019 році. Після придбання компанія Google тепер перейменувала компанію на Terra Bella, щоб підкреслити, що компанія не лише виведе на орбіту невеликі супутники для обробки зображень, а й проаналізує успіх зображення для ЕО [9].

Посилання [9] показує, що дослідження Northern Sky Research показало, що ЕО є основним фактором зростання заборгованості в цій галузі. Це тому, що ринок ЕО страждає від браку даних у багатьох сферах, як-от сільське господарство, боротьба з надзвичайними ситуаціями, лісове господарство та дика природа. «Зараз роздільна здатність наших супутників становить 1 метр. Наша справа полягає в тому, щоб дати людям змогу дивитися на світову економіку, і 1 метр є критично необхідною роздільною здатністю для цього. Ми не маємо наміру переходити на великі супутники з роздільною здатністю 30 см. «Ми вважаємо, що вся справа в кількості повторних відвідувань і наполегливості; тому ми залишатимемося оптимізованими навколо цього простору рішень», – каже президент Planet Labs Роббі Шінглер.

4.3 Дизайн фону

З посилання [7] ми можемо оцінити, що комерційні системи ЕО налаштовані для обслуговування певних сегментів ринку та плануються, щоб забезпечити якомога більшу пропускну здатність системи від запропонованого розподілу частот. Ці занепокоєння призводять до проектів систем, які мають відносно фіксоване покриття та методи розширення пропускної здатності системи шляхом повторного використання тих самих частотних спектрів.

Як зазначає R. Dybdal у Ref. [7], проектування є ітераційним процесом, і кількість ітерацій буде зростати в міру ускладнення системи, а кількість користувачів буде рости. Процес проектування системи, показаний на малюнку 3, визначає ітераційну природу, на яку повинні звернути увагу розробники системи. На найвищому рівні цілі системного рівня окреслюють вимоги до передачі та обробки даних користувача, розподіл частоти, який буде використовуватися, і попередні оцінки обмежень G/T і ERP (ефективна випромінювана потужність) як для космічного, так і для користувацького сегментів. Ці вимоги використовуються для розробки концепцій проектування системи на основі попередніх оцінок продуктивності можливостей для простору та сегментів користувачів. Найважливішою та фундаментальною частиною визначення системи є аналіз і розуміння впливу системних вимог.

Концепції проектування системи порівнюються з обмеженнями ракети-носія для космічного сегменту та порівнюються з витратами на виробництво для сегменту користувачів [7].



Рис. 4.3 Процес проектування системи [7].

За цих обставин антенна технологія для забезпечення опису та розробки системи відіграє головну роль у плануванні практичних проектів систем. Ця технологічна база антени зробила важливий внесок у існуючі можливості системи.

На низькій навколоземній орбіті (LEO) лінії зв'язку Земля-супутник набагато коротші, що призводить до незначних втрат на трасі, що призводить до меншої потужності та менших антенних систем. У цьому випадку затримка поширення також менша через коротші відстані шляху. Але, в той же час, основним недоліком наносупутника LEO є його обмежений період роботи, оскільки супутник не знаходиться у фіксованому місці в небі, а натомість згинається по небу лише на 8-10 хвилин від фіксованого розташування на землі. Якщо потрібне безперервне глобальне або широке покриття території, необхідна група з кількох супутників LEO із зв'язками між супутниками для забезпечення зв'язку «точка-точка» [6].

На рисунку 4.4 показано бортовий транспондер обробки, який також називають регенеративним ретранслятором або «розумним супутником». Сигнал висхідної лінії зв'язку на fup демодулюється в базову смугу, fbaseban. Як зазначається у Пов. [6], базовий сигнал доступний для обробки на борту, включаючи переформатування та виправлення помилок. Потім інформація основного діапазону повторно модулюється в несучу низхідної лінії зв'язку на fdown, можливо, у форматі модуляції, відмінному від формату висхідної лінії зв'язку, і після остаточного посилення передається на землю. Процес демодуляції/ремодуляції усуває шум висхідної лінії зв'язку та перешкоди від низхідної лінії зв'язку, одночасно дозволяючи виконати додаткову вбудовану обробку. Таким чином, висхідні та низхідні канали зв'язку є незалежними щодо оцінки загальної продуктивності каналу зв'язку, на відміну від транспондера трансляції частоти, де погіршення висхідної лінії зв'язку взаємозалежні, як стверджувалося раніше.

Наносупутники бортової обробки, як правило, складніші та дорожчі, ніж трансляція частоти. Однак вони пропонують значні переваги в продуктивності, особливо для невеликих користувачів терміналів або для великих різноманітних мереж.

Найбільш часто використовувані антени на космічних апаратах LEO [10]: 1) N-Turn Helix; 2) 1/2 хвиля Quadrifilar Helix; 3) повна хвиля Quadrifilar Helix; 4) латка; 5) рупор (у СВЧ); 6) страва (переважно в мікрохвильовці).

Спіральні антени дуже поширені для багатьох різних видів використання космічних апаратів, і вони можуть досягати підсилення приблизно до 15 дБ. Антену також можна стиснути (як пружину), щоб в упакованій конфігурації вона займала мало місця. Під час орбіти витки антени відпускаються, щоб спіраль розгорнулася до проектної довжини. Гнучкі лінії, пов'язані між послідовними витками, гарантують, що розгорнута антена має проектну довжину. Наприклад, посилення антени для 2,5-обертової спіралі становило приблизно 5,5 дБ.

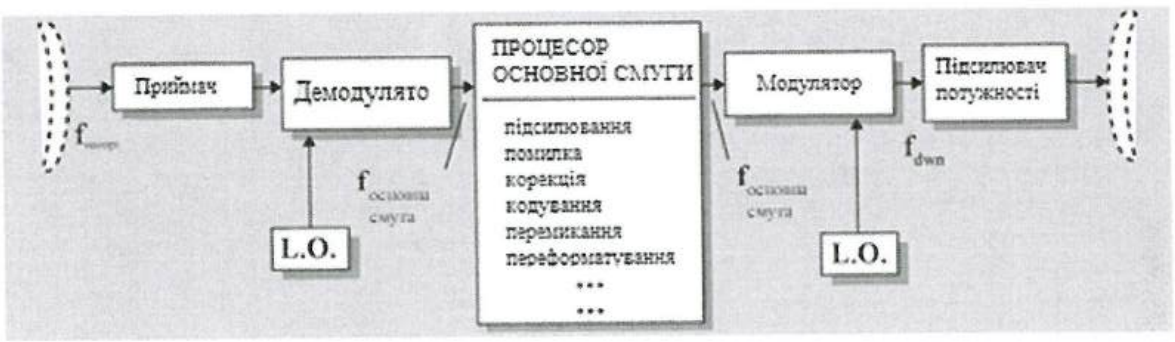


Рис. 4.4 Транспондер бортової обробки [6].

Напівхвильова чотиризасічна антена має смугу пропускання 1 ГГц і пікове посилення антени приблизно 4 дБ. Зазвичай він забезпечує покриття Землі від LEO. Повнохвильовий чотиризасічник має покращене підсилення, але він використовується головним чином тому, що його діаграма спрямованості досягає максимуму на 60° (30° вниз від горизонталі космічного корабля). Це кут горизонту приблизно з 600 км. Крім того, посилення антени є компактним у найнижчій точці, що краще відповідає втратам на трасі похилого діапазону [11]. Залежність межі зв'язку від кута підйому показано на малюнку 5.

Турнікетна антена добре підходить для забезпечення покриття Землі з круговою поляризацією для супутників на відстані приблизно до 800 км. Ця антена невелика (в S-діапазоні приблизно 2 дюйма × 2") і міцна [11]. Він легко витримує навантаження ракети-носія (рис. 6).

Наносупутникам дозволено передавати та приймати лише у виділених діапазонах. З посилання [11]: частоти VHF підходять для додатків із низькою швидкістю передачі даних. Антени наносупутників через їхні розміри зазвичай всенаправлені і зазвичай некеровані (рис. 7). Антени часто повинні бути упаковані через їх розгорнутий розмір і звільнені, коли вони на орбіті. Оскільки радіочастотні перешкоди на землі підвищують радіочастотний шум наземної станції вище рівня шуму КТВ більш ніж на 10 дБ, для ефективного зв'язку потрібна або достатня потужність передавача наносупутника, або антени наземної станції з високим коефіцієнтом посилення.

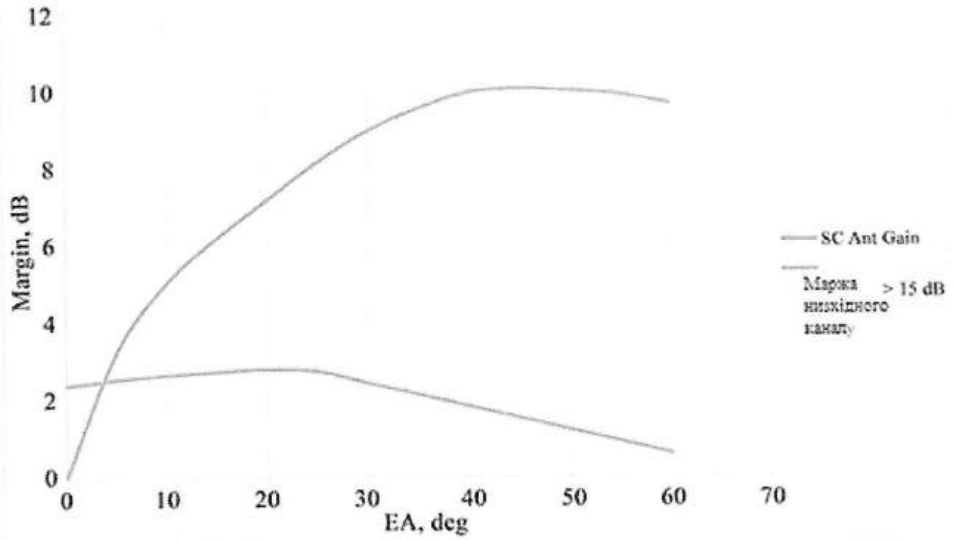


Рис. 4.5 Покращення запасу лінії зв'язку з низьким тиском завдяки використанню повнохвильової чотиризасічної антени (низхідна лінія з 200 км LEO, 10 км SC FSK Xmitter на 2,25 ГГц, наземна антена 2,4 м (посилення 32 дБ), 3 дБ NF 3,9 ГГц і промінь антени ширина).

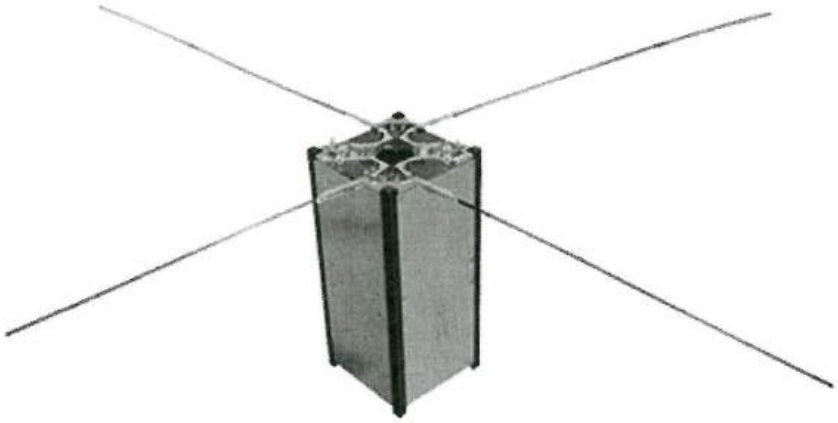
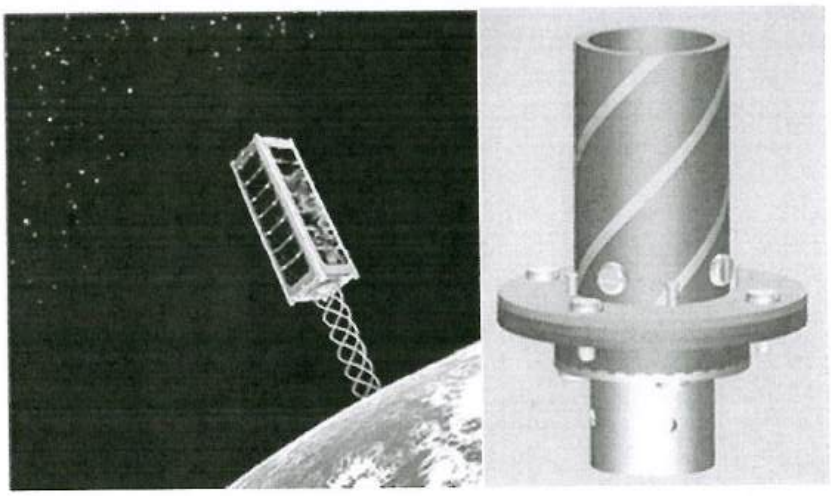
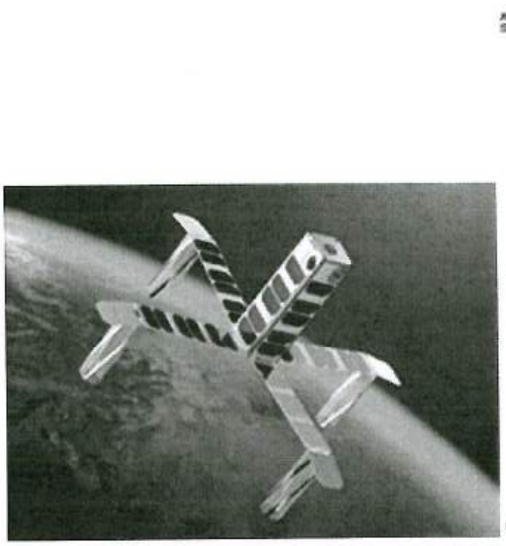
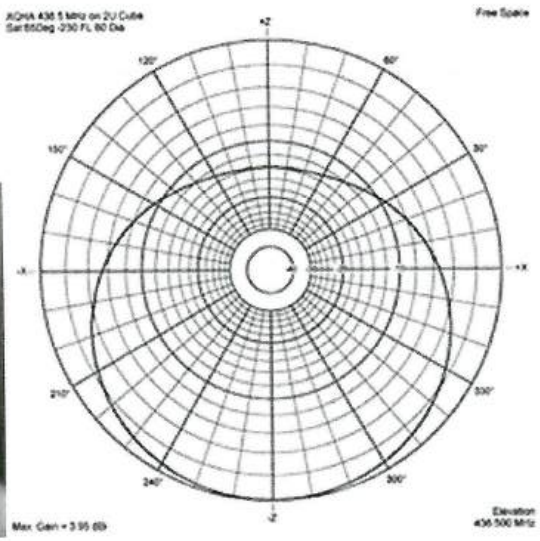


Рис. 4.6 Турнікетна антена в CubeSat [12].

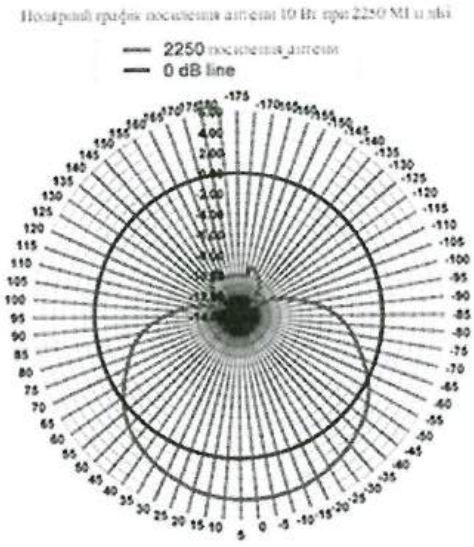


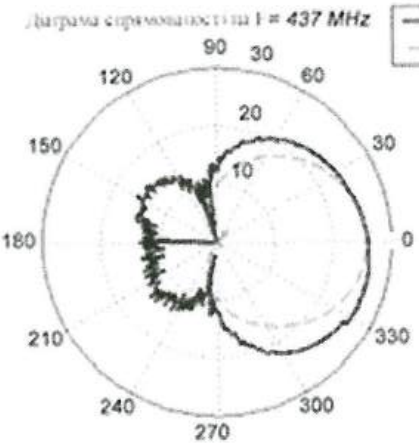
а



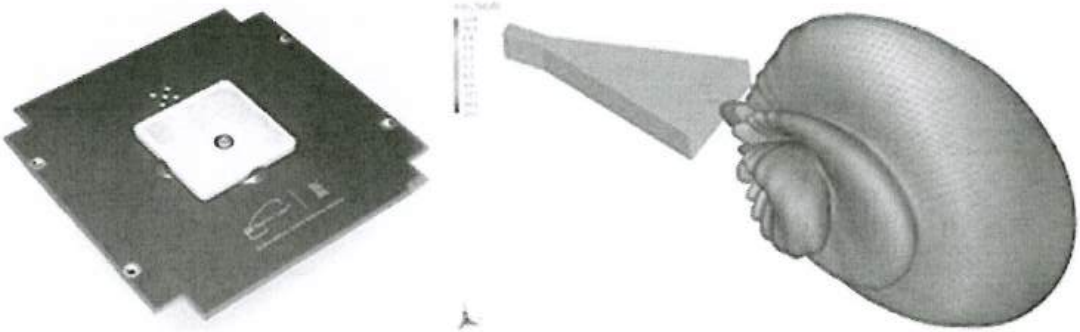

Free Space
Elevation
436.500 MHz

б

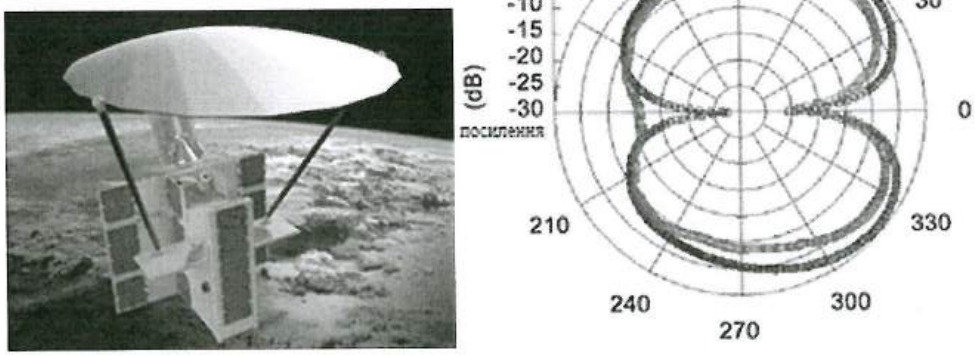

2250
0 dB line


90
30
120
60
20
150
30
10
180
0
210
330
240
300
270

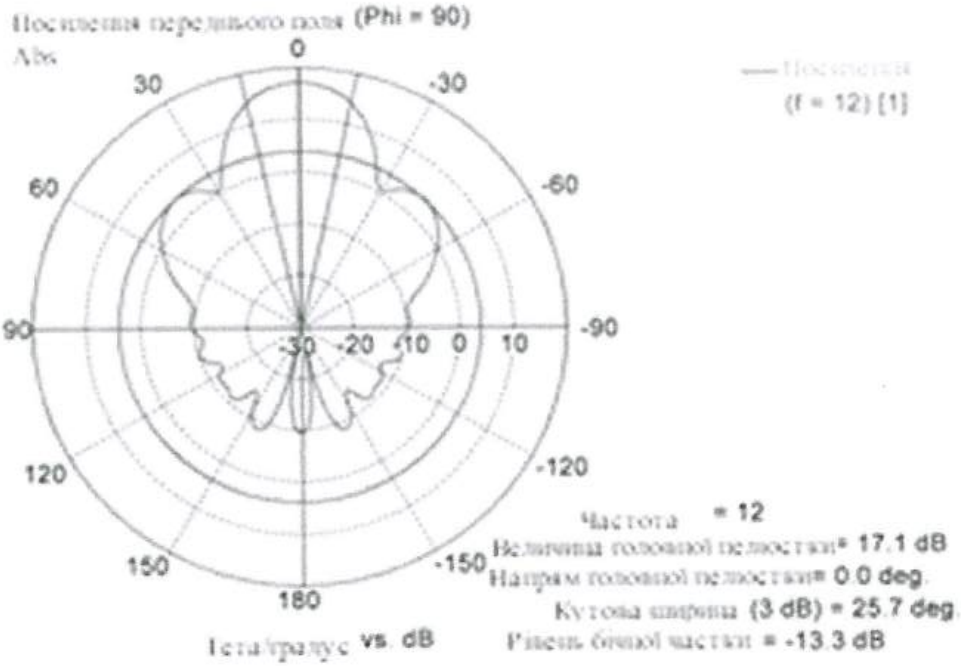
в



Г


моделювання
вимірювання
90
120
60
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
(dB)
посилення
30
0
210
330
240
300
270

Д


Посилення передільного поля (Phi = 90)
Abs
0
30
-30
60
-60
90
-90
120
-120
150
-150
180
-30 -20 -10 0 10
Посилення
(f = 12) [1]
Частота = 12
Величина головної пелюстки= 17.1 dB
Напрям головної пелюстки= 0.0 deg.
Кутова ширина (3 dB) = 25.7 deg.
Рівень бічної частки = -13.3 dB
Тета/градус vs. dB



ж

Рис. 4.7 Підсилення для різних антен: (а) спіральна; (б) 1/2 хвиля Quadrifilar Helix; (в) повнохвильова чотиринитка спіраль; (г) латка; (д) рупор (у мікрохвильових печах); (ж) блюдо [13] - [19].

УВЧ-частоти так само використовуються для додатків із низькою швидкістю передачі даних. Однак наносупутникові антени менші. Наземний шум, хоч і більший, ніж КТВ, менший, ніж на УКХ, а наземні станції з більшим підсиленням антени мають менший розмір (рис. 7). Усі ці фактори дозволяють працювати з більшими обсягами даних (зазвичай сотні Кбіт/с).

Зв'язок від і до наносупутника використовує цифрові дані та один із деяких типів модуляції. Найбільш часто використовувані види модуляції та їх загальні характеристики наведені в таблиці 1 [11].

Попередньо можна спроектувати канали зв'язку та визначити необхідний умовний сигнал/шум, слід оцінити наявність різних методів модуляції. Існує велика кількість різних кодів усунення помилок із різноманітними активами. З посилання [11] видно, що представлення FEC має важливий вплив на зниження Eb/No, необхідного для даного BER. Це видно зі зведення, наведеного в таблиці 2, де показано Eb/No, необхідне для BER в діапазоні від 10-5 до 10-7.

Порівняно невелика довжина проходу наносупутника LEO SmallSat над наземною станцією та низький максимальний коефіцієнт посилення антени для покриття Землі різко обмежують кількість даних, які можна передати з супутника

під час проходу. На рисунку 8 показана довжина проходу від супутника з висотою орбіти 600 км до наземної станції в різних просторах CPA від наземної траси наносупутника.

Таблиця 4.1

Деякі види модуляції та їх характеристики, що використовуються в наносупутниках [11].

Тип модуляції	Опис	Коментарі
FSK (Некогерентна)	Несуча частота перемикається між 2 значеннями	Модуляція спадщини, проста, нечутлива доплерівська, індекс модуляції становить 0,3
FSK (когерентний)	Несуча частота змінюється з безперервним зсувом фази	Потрібне менше S/N для того самого BER
GMSK (Гаусів Мінімальна маніпуляція зсувом)	Двійкові дані спочатку округлюються за Гауссом перед застосуванням до FSK	Схожий на FSK, за винятком Спектр більш обмежений
PSK (фазова маніпуляція)	Фаза несучої змінюється на ±90°	Покращена продуктивність BER
BPSK (двофазова маніпуляція)	Несуча модульована сигнал +1 або −1	Ефективний, але чутливий до доплера
QPSK (квадратурний фазова маніпуляція)	Несуча фаза змінена до однієї з чотирьох фаз	Покращена спектральна ефективність. Два біти на крок. Зміни фази відбуваються для кожних двох бітів інформації
O-QPSK (Зсув QPSK)	Одна з двох змін фази затримується на один біт	Покращена спектральна ефективність. Зміни фаз відбуваються щоразу

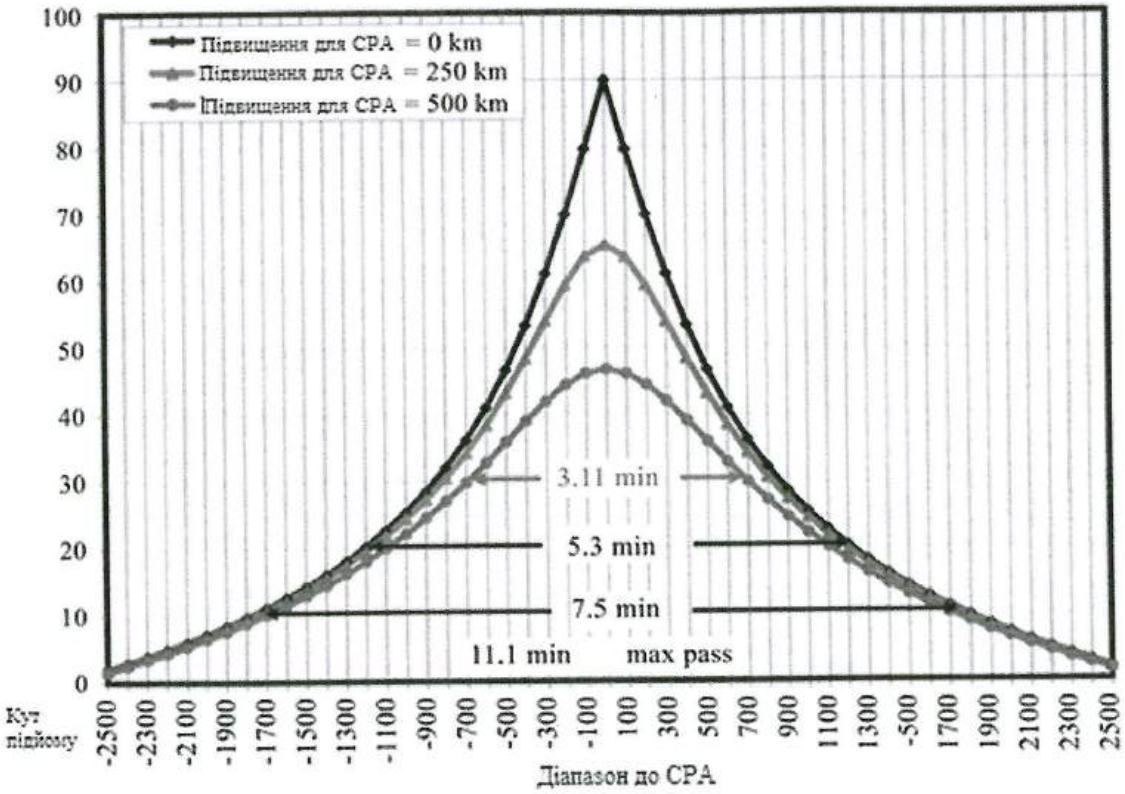


Рис. 4.8 Залежність кута підйому від наземної дальності та тривалості проходу під час зв'язку з наземною станцією при заданому CPA із супутникової наземної траси [11].

CPA від землі космічного корабля до наземної станції зростає, довжина проходу стає меншою, а максимальні кути місця стають незначними. Наприклад, при CPA 250 км і куті підйому понад 20° прохід триває лише близько 3 хвилин. З антеною космічного корабля покриття Землі та великою (2,4 метри) антеною наземної станції, що працює зі швидкістю передачі даних 1 Мбіт/с, максимальний обсяг даних, який можна передати за один проход, становить приблизно 300 Мбіт або 37,5 Мбайт [11].

CPA від землі космічного корабля до наземної станції зростає, довжина проходу стає меншою, а максимальні кути місця стають незначними. Наприклад, при CPA 250 км і куті підйому понад 20° прохід триває лише близько 3 хвилин. З антеною космічного корабля покриття Землі та великою (2,4 метри) антеною наземної станції, що працює зі швидкістю передачі даних 1 Мбіт/с, максимальний обсяг даних, який можна передати за один проход, становить приблизно 300 Мбіт

або 37,5 Мбайт [11].

Таблиця 4.2

Зведені вимоги Eb/No для різних модуляцій і BER.

Модуляція	Приблизний Eb/No (дБ), необхідний для		
	BER = 10^{-5}	BER = 10^{-6}	BER = 10^{-7}
FSK (некогерентний)	13.2	14.2	14.8
BPSK або QPSK	9.8	10.6	11.7
FSK з FEC*	7.8	9.0	9.6
QPSK з FEC*	4.5	5.6	5.9

*FEC – швидкість Вітербі 1/2 з k = 7.

Крім того, керована супутникова антена, яка відстежує наземну станцію, може забезпечити достатньо великий коефіцієнт посилення антени, щоб збільшити кількість даних, які можна передати вниз, у 10 разів більше, ніж антена космічного корабля, що охоплює Землю [10]. Додаткові підходи до збільшення спроможності наносупутників передавати великі обсяги даних по низхідній лінії зв'язку: 1) кілька наземних станцій; 2) наземні станції на високій широті, де кількість орбіт, видимих за день, більша (принаймні для сильно нахилених орбіт); 3) геостаціонарний супутник-ретранслятор.

Типова радіочастотна підсистема LEO NanoSat і SmallSat показана на малюнку 8 [11]. Цей проект передбачає, що пакетування, рандомізація для збалансування потоку даних для компонента 0 DC, пряме виправлення помилок і шифрування виконуються як цифровим апаратним забезпеченням, так і програмним забезпеченням комп'ютера C & DH. Повний потік даних для передачі надходить у 10-ватний передавач S-діапазону, де він модулюється QPSK. Ці дані можуть бути телеметричними (TTM) або даними корисного навантаження.

У розробці передбачено основну антену з надірним виглядом і вторинну антену з надірним виглядом, щоб гарантувати, що TTM може бути надіслано на землю, навіть якщо наносупутник зашкодить аномалії керування орієнтацією, або якщо супутник щойно був відключений від ракети-носія та скорочення. Через те,

що обсяг даних ТТМ дуже незначний порівняно зі швидкістю передачі даних основного корисного навантаження місії, для передачі більшої частини потужності в основну антену використовується розподільник потужності, і лише невелика кількість енергії подається на анти-антену. Надірна патч-антена. У цьому прикладі дані зі швидкістю 1 Мбіт/с подаються на головну антену, а ТТМ становить лише 9,6 Кбіт/с. Таким чином, коли наносупутник перевернутий, передачі ТТМ досягають землі з тією ж щільністю потужності, що й основні дані, коли супутник спрямований у найнижчу точку [11].

4.4 Антени на борту супутників: визначення, класифікація та вимоги до напрямленості.

Давайте розпочнемо з основних визначень для радіомоста "борт-Земля", необхідних для уточнення вимог до антен на борту. Припустимо, що в деякій прямокутній системі координат, жорстко пов'язаній із супутником, напрямок від наносупутника до станції ТТ & С характеризується кутами φ1 та φ2. Більше того, ці кути вибираються так, що вони можуть визначити довільне положення станції ТТ & С відносно вказаної системи. Тоді потужність випромінювання, створену випромінюючою антеною, можна записати наступним виразом:

$$N_1 = HF(\varphi_1, \varphi_2), \quad (4.1)$$

де $F(\phi1,\phi2)$ — неперервна функція кутів $\phi1$ та $\phi2$, а H — коефіцієнт, незалежний від вхідних кутів.

Функція $F(\phi1,\phi2)$ характеризує діаграму напрямленості антени. Прямісний коефіцієнт або коефіцієнт направленості D антени в заданому напрямку, що характеризується кутами $\phi10,\phi20$, є відношенням потужності, яку антена випромінює в цьому напрямку, до середньої потужності в усіх напрямках.

Згідно з визначенням та формулою

$$D = \frac{4\pi F(\varphi_{10},\varphi_{20})}{\int_S F(\varphi_{10},\varphi_{20})\mathrm{d}S},$$

де інтегруємо по всій сфері одиничного радіусу з центром в початку координат. Якщо D=1 для всіх кутів $\phi 10,\phi 20$, то це антена ненаправлена.

Коефіцієнт ефективності антени ηa називається відношенням

$$\eta_a = \frac{P_\Sigma}{P_0},$$

де $P\Sigma$ — загальна потужність, випромінена в усі напрямки, а $P0$ — потужність, подана на антену.

Коефіцієнт підсилення антени в напрямку Kg є відношенням потужності, поданої на ненаправлену антену, до потужності, поданої на задану антену. Це вірно за умови, що магнітна напруга в місці прийому однакова для обох антен, і ефективність гіпотетичної ненаправленої антени дорівнює одиниці.

Очевидно, що підсилення залежить від конкретних значень кутів $\phi 1,\phi 2$ та характеристики підсилення потужності, поданої на антену. На відміну від цього, значення підсилення D враховують ефективність антени. Ці значення пов'язані наступним виразом:

$$Kg=D\cdot\eta a.$$

Антени на борту супутників з точки зору вимог, які вони накладають на системи приладів, можна розділити на три класи: 1) всенаправлені; 2) однонаправлені; та 3) високонаправлені. Всенаправлені антени характеризуються діаграмою напрямленості, в якій немає достатньо вираженого максимуму, і також відсутні довгі спади кута та глибокі вглиблення. Коефіцієнт напрямленості таких антен знаходиться в діапазоні від 0.01 до 0.1. Оскільки точний розрахунок діаграми випромінювання таких антен — це досить часоємний процес, місце встановлення та її конструкцію остаточно перевіряють на спеціальному макеті антени для невеликих супутників.

Однонаправлені антени мають діаграму випромінювання, закриту лише в частині простору. Зазвичай їхні діаграми менше заглиблені (Рисунок 7). Однонаправлені антени потребують, щоб наносупутник був орієнтований в космосі принаймні однією осі, оскільки поза робочими кутами коефіцієнт напрямленості близький до нуля (Рисунок 9).

Такі антени використовуються на орбітальних відсіках міжпланетних автоматичних апаратів із плоским стаціонарним сонячним акумулятором, нормаль до якого N_S (Рисунок 10) протягом всієї місії постійно орієнтований до сонця з певною максимальною похибкою δS. Це типово, оскільки під час прийому сигналів змінюються як робочі кути антен, так і відстань від землі до супутника.

Припустимо, що положення інших осей наносупутника є довільними, тобто можливим обертанням навколо нормалі N_S. В такому випадку природно вимагати, щоб діаграма напрямленості антени була близькою до обертового тіла з віссю симетрії, паралельною нормалі N_S. Перетин діаграми напрямленості площиною, яка проходить через вісь симетрії, характеризується залежністю $K_R(\gamma)$, де γ — кут між віссю симетрії і напрямком до точки прийому.

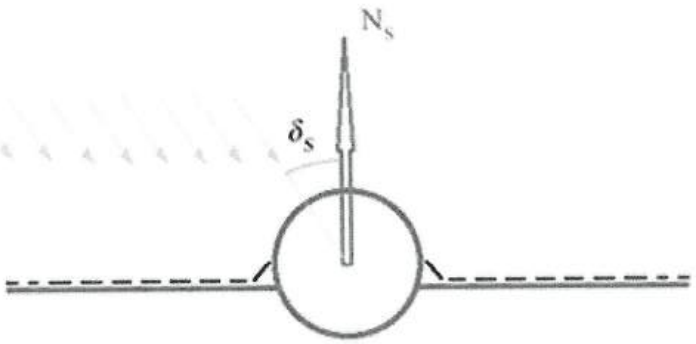


Рис. 4.9 Схема нерухомої планарної антени, конструктивно поєднаної з сонячними батареями.

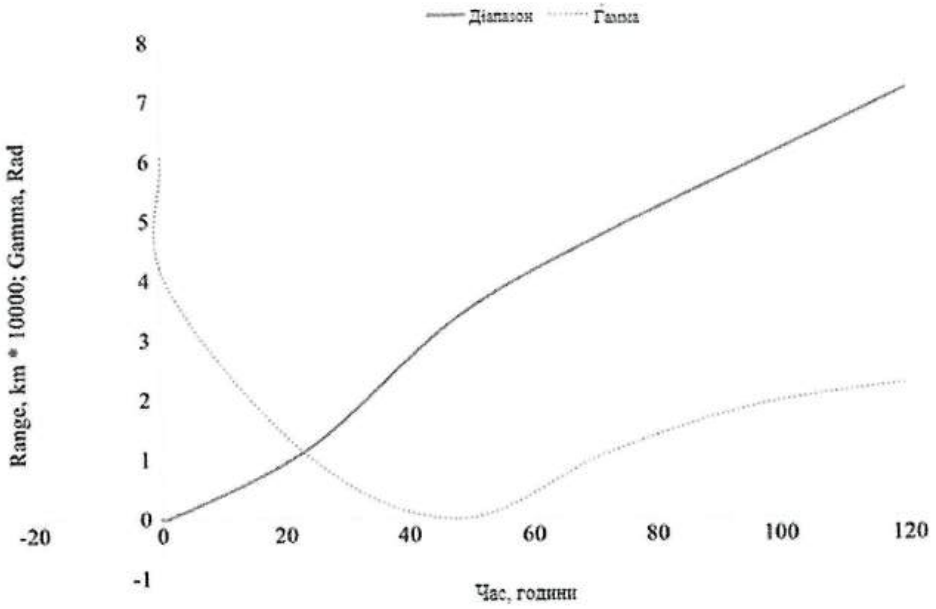


Рис. 4.10 Залежність дальності L і кута γ Сонце-наносупутник-Земля від часу місії.

$$K_{R_0} = \frac{g\left(\frac{P_0}{P_1}\right)_{void} L^2}{BAP} C_0, \quad (4.2)$$

де C_0 — швидкість передачі даних, яку бажано мати протягом місії або на окремих ділянках місії; g—коефіцієнт міцності.

Якщо $K_{R0}(\gamma_0)$ побудувати в декартових координатах і застосувати ці графічні діаграми різних спрямованостей антени, можна перевірити придатність конкретного варіанту здійснення. Іноді може статися, що дана швидкість інформації C_0 не може бути реалізована в деяких частинах місії, тобто $K_R<K_{R0}$. Оскільки швидкість передачі інформації пропорційна посиленню С, реалізована швидкість передачі даних визначається як:

$$C = C_0 \frac{K_R}{K_{R_0}}. \quad (4.3)$$

Високоспрямована антена — це антена з чітким піком напівпотужності не більше кількох градусів. Для цих антен потрібна вісь орієнтації через точку прийому електричної антени. Коефіцієнт спрямованості таких антен становить від кількох десятків до десятків тисяч. Існує високоспрямована діаграма спрямованості антени, яка завжди орієнтована відносно структурної основи антени, і багатоелементна антена електрично керована. Нарешті, максимум діаграми спрямованості можна орієнтувати на точку прийому, не змінюючи орієнтації SmallSat і не повертаючи антену відносно корпусу.

4.5 Характеристики сигналів квадратурного фазового зрушення

Одним із основних методів для поліпшення характеристик антени та зв'язку є структурна та параметрична оптимізація.

Паспортний сигнал квадратурного фазового зрушення (QPSK), який не має форми імпульсу, може бути виражений як [18]:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_S}{T_S}} \cos(\omega_C t - \phi_i), \; 0 \le t \le T_S; \; i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.4)$$

де *Es* — енергія; *Ts* — тривалість; ϕi — фаза.

Значення ϕi визначається згідно з двома бітами даних b_I та b_Q, які формують

один кватерній символ, як показано в Таблиці 3 [20].

Нехай дві ортонормальні базові функції будуть $\psi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}}\cos\omega_C t$ та $\psi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}}\sin\omega_C t$. Таким чином, сигнал QPSK $si(t)$ може бути виражений через базові функції наступним чином:

$$s_i(t) = \sqrt{E_S}\cos\phi_i\psi_i + \sqrt{E_S}\sin\phi_i\psi_i,\ i = 1,2,3,4. \quad (4.5)$$

Далі давайте перетворимо $s_i(t)$ у точку у двовимірному (2-Д) векторному просторі, який зайнятий ортонормальними базовими функціями $\psi_1(t)$ та $\psi_2(t)$. І, отримавши результати, можливо визначити координати x, y для $s_1(t),\ldots,s_4(t)$ у цьому векторному просторі.

Зазвичай М-фазовий сигнал квадратурного зрушення виражається як $s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_S}{T_S}}\cos\left(\omega_C t - \frac{2\pi(i-1)}{M}\right)$, i=1,2,⋯,M, де Es позначає енергію на один М-арний символ.

Після останнього виразу та підстановки значень ϕi з Таблиці 3 ми можемо виразити $s_i(t)$ у вигляді

$$s_i(t)=x(t)+y(t), \quad (4.6)$$

де

$$x(t) = \begin{cases} \sqrt{E_b}\psi_i, \\ -\sqrt{E_b}\psi_i, \end{cases} \text{якщо } b1=1, \text{ якщо } b1=0. \quad (4.7)$$

Відповідно до рівняння (7), x(t) і y(t) можна розглядати наступним чином:

Таблиця 4.3

Фазово-бітове відображення для 4-х символів [20].

4-арний індекс символу i	b_1b_Q	ϕ_i
1	11	π/4
2	10	−π/4
3	01	3π/4
4	00	−3π/4

1. x(t) представляє собою сигнал двійкового фазового зрушення з антиподальним кодуванням, який передає біт b_I за допомогою базисної функції $\psi_1(t)$ — розмір вздовж вісі x;
2. y(t) представляє собою сигнал двійкового фазового зрушення з антиподальним кодуванням, який передає біт b_Q за допомогою базисної функції $\psi_2(t)$ — розмір вздовж вісі y.

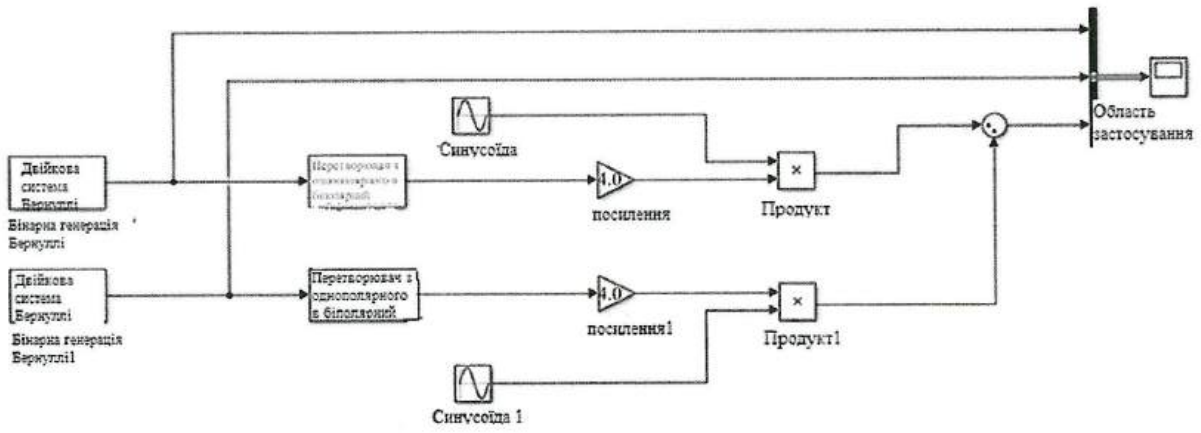
Отже, сигнали QPSK i(t) можна розглядати як суму двох незалежних сигналів двійкового фазового зрушення, один з яких несе b_I, а інший — b_Q.

Основні параметри модулятора встановлені наступним чином:

1. Тривалість символу QPSK $t_s = 1$ с;
2. Частота несучої $f_c = \omega c/2\pi = 30$ Гц;
3. Бітова енергія $E_b = 16$;
4. Кількість вибірок на символ у смуговому QPSK сигналі дорівнює 256.

На основі рівнянь (6) та (7) ми можемо створити файл mdl/slx для передавача QPSK (рисунок 11). Після ідентифікації блоків, виходи яких відповідають b_I, b_Q, $\psi_1(t)$, $\psi_2(t)$, x(t), y(t) та $s_i(t)$ відповідно рівнянням (6) та (7), були встановлені параметри, представлені в Таблиці 4.

Під час наступного етапу був створений i(t), який складається з 20 символів QPSK. На цьому етапі був розроблений приймач QPSK, який оцінює b_I та b_Q з $s_i(t)$. Завдяки ортогональності між каналами I та Q, приймач QPSK ефективно є структурно двома приймачами BPSK, які працюють паралельно [20].



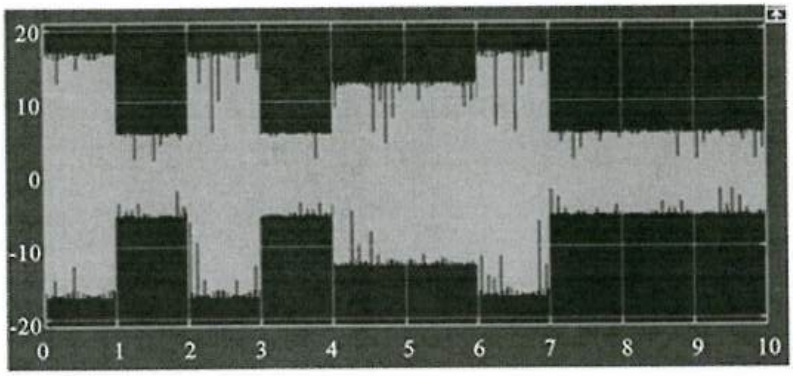


Рис. 4.11 Моделювання передавача QPSK.

Таблиця 4.4

Параметр налаштування для конструкції передавача QPSK [19].

Блок	Налаштування параметрів	Причина
Бінарний генератор Бернуллі	Час вибірки = 1	Тривалість символу QPSK Ts = 1
Бінарний генератор Бернуллі 1	Тип вихідних даних = Boolean	Для перетворення в логічний тип
Бінарний генератор Бернуллі	Початкове насіння = 1234	
Бінарний генератор Бернуллі 1	Початкове початкове значення = за замовчуванням налаштування (не змінювати)	
Перетворювач з однополярного в біполярний	М-ічне число = 1	
Перетворювач з однополярного в біполярний 1	М-ічне число = 2	
Приріст, Приріст 1	Прибуток = 4	
Амплітуда = sqrt(2)		
Синусоїда, Синусоїда 1	Частота (рад) = 60 * пі	
Час вибірки = 1/256		

Рисунок 4.12 ілюструє етап кореляції між $s_i(t)$ та $\psi_1(t)$, який використовується

для вилучення параметричних поліпшень в компоненті інфазності.

4.6 Проектування приймача QPSK

Для наступних операцій використовувалася техніка, запропонована у Ref. [20]. Заверште файл mdl/slx для вилучення квадратурної компоненти. Далі можна завершити весь приймач, який параметрично демодулюватиме як інфазну, так і квадратурну компоненти.

У цьому випадку ми можемо створити дві базові функції $\psi_1(t)$ та $\psi_2(t)$. Підсистема Simulink QPSK_TX, створена в 2D, має два блоки Sinusoidal Sine Wave та Sinusoidal Sine Wave1, які генерують дві базові функції. Оскільки приймачу потрібна та сама пара базових функцій, ви можете скопіювати ці два блоки для приймача або створити нові блоки, але встановити їхні параметри так само, як і у цих двох блоках.

Далі використовуйте два блоки множення Product та два блоки інтегрування та вивантаження Integrate and dump, один для інфазної компоненти і один для квадратурної компоненти, є ідентичними. Інтервал інтеграції повинен дорівнювати тривалості біта. Встановіть внутрішній параметр Період інтеграції (Кількість вибірок) для двох блоків Інтегрувати та скинути на 256. Час симуляції - 20 секунд.

Результат у 3D повинен показати, що в порівнянні з переданою формою хвилі виявлений, але потік затримується на тривалість одного біта.

Подібно до діаграми ока, діаграма сузір'я [20], яка надає візуальний інсайт у характеристики, також є важливою діаграмою для систем цифрового зв'язку. Щоб спостерігати діаграму сузір'я отриманих символів QPSK, вам потрібно внести зміни у файл mdl/slx, як показано на рисунку 13. Основні зміни полягають в тому, що ми додали блок Real-Image to Complex та блок Constellation Diagram до виходів блоку Integrate and dump як для каналів I, так і Q. Параметр Symbols to display дорівнює 1000. У вікні проектування mdl/slx було встановлено час зупинки симуляції на 2000.

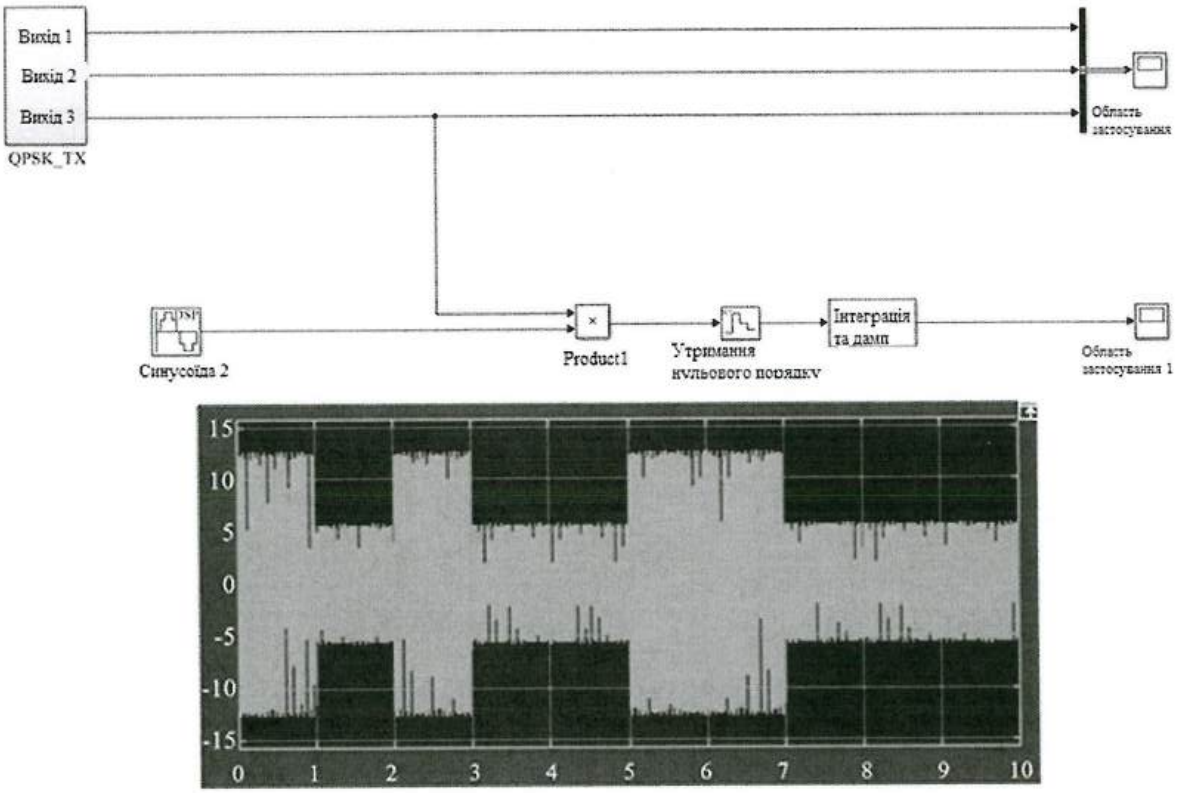


Рис. 4.12 Крок кореляції для виділення синфазної складової.

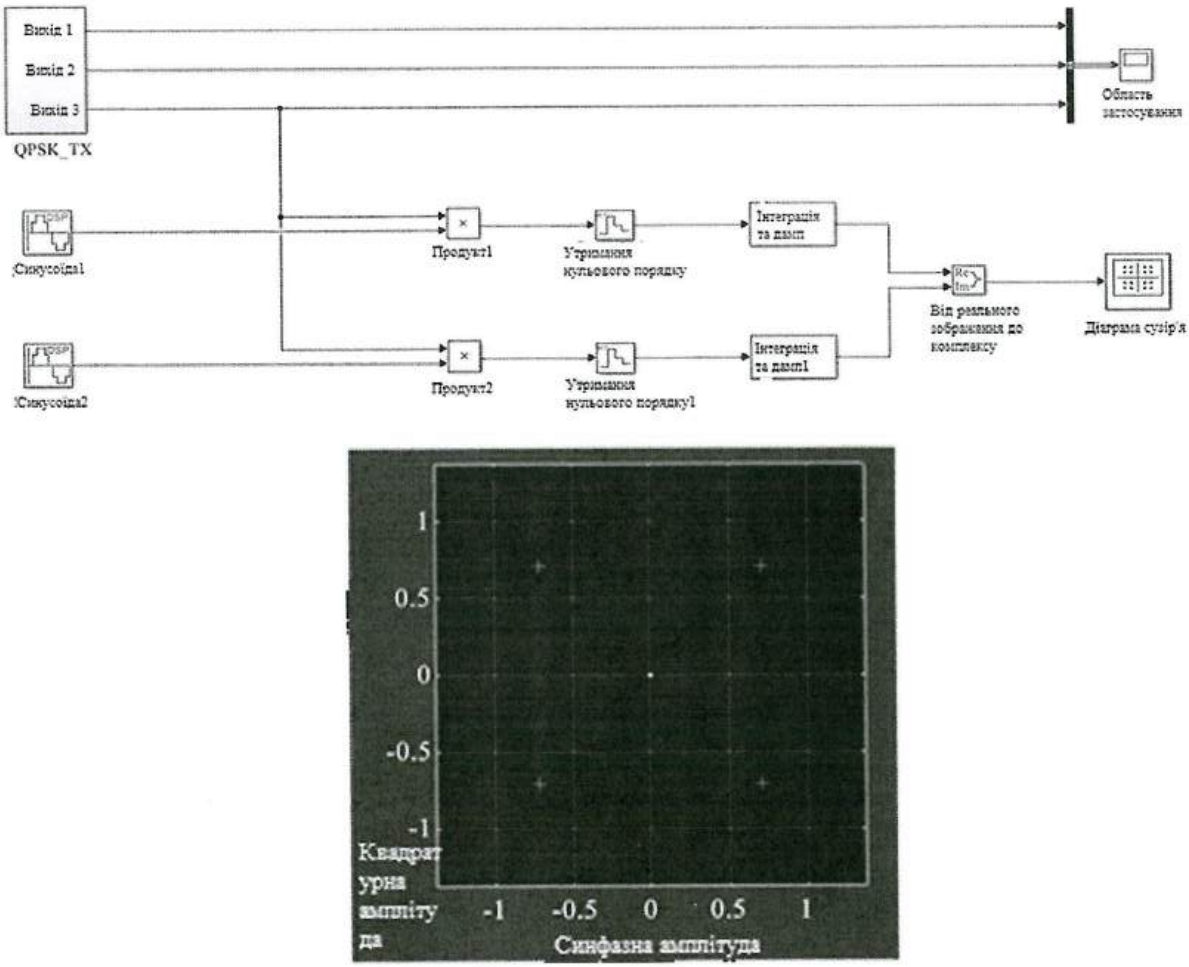


Рис. 4.13 Конструкція приймача QPSK з діапазоном діаграми сузір'я.

4.7 Діаграма сузір'я та Помилка фази

На цьому етапі відкриємо підсистему QPSK TX та вставимо блок генератора гауссівського шуму, підключений, як показано на рисунку 14, і встановимо його параметр Sample time на 1/256.

Наступна процедура дозволяє перевірити та структурно та параметрично оптимізувати параметр Variance блока генератора гауссівського шуму, припускаючи Eb/N0=13 dB в запропонованому експерименті:

• Переведіть Eb/N0 [dB] у лінійне значення масштабу.

• Знайдіть N0 з Eb/N0 та поточного Eb, встановленого у файлі mdl/slx.

• Підставте N0 в вираз для встановлення дисперсії шуму, тобто дисперсія вибірки шуму = N0/(2tstep). Параметр 2tstep позначає інтервал вибірки дискретизованих форм хвиль. Таким чином, він встановлений рівним 1/256, як було зазначено раніше.

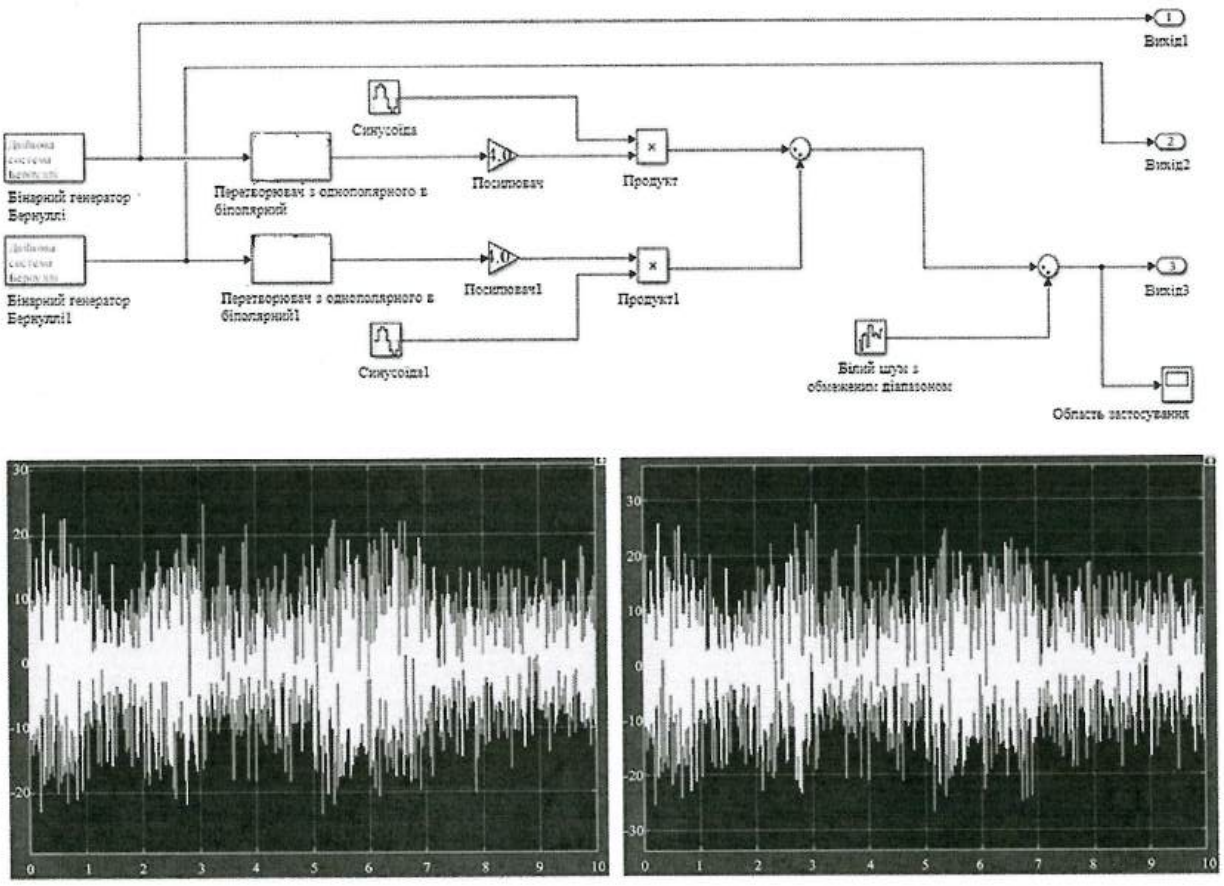


Рис. 4.14 Моделювання отриманого сигналу QPSK по каналу AWGN

(Eb/N0=13 і = 30 дБ).

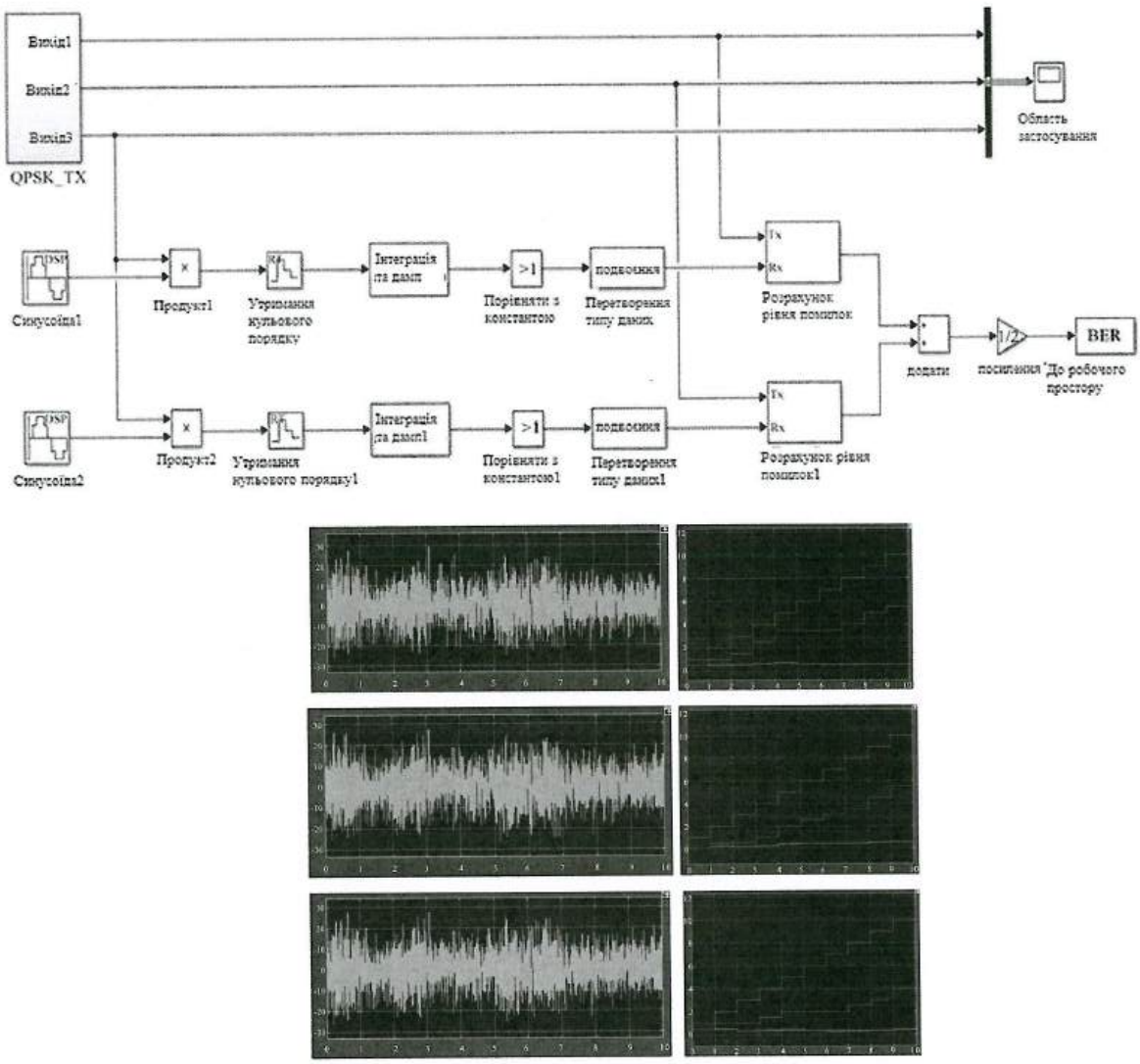
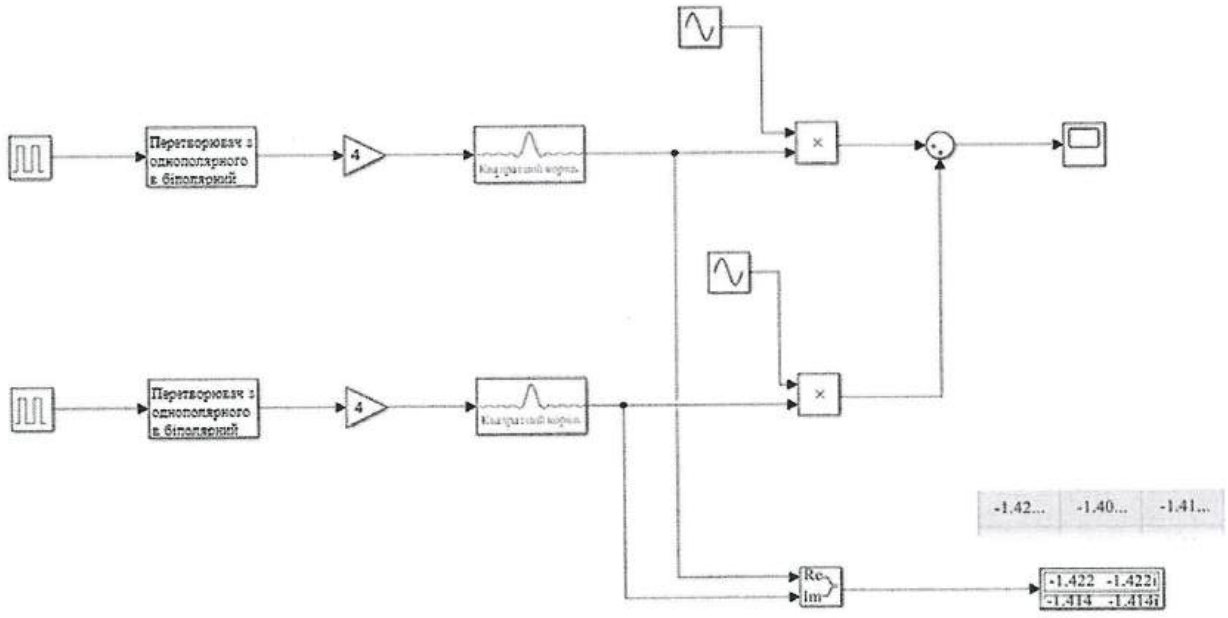


Рис. 4.15 Завершений файл mdl/slx для моделювання QPSK BER.



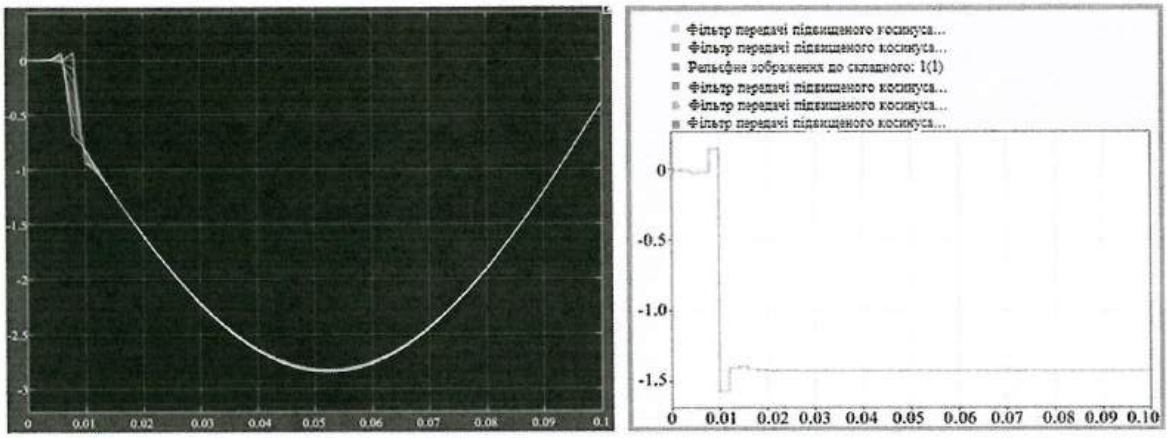


Рис. 4.16 Імпульсна система QPSK з траєкторією сигналу.

Після цього зафіксуємо вікно відображення діаграми сузір'я, і перед цим виберемо опцію автоматичного масштабування вісі у меню вікна відображення.

На цьому підетапі ми спостерігаємо діаграму сузір'я при наявності помилки фази. Для цього потрібно встановити параметр Variance блока Band-Limited White Noise в 0 для імітації випадку безшумності. Потім відкрити вікна встановлення параметрів блоків Sine Wave та SineWave1 та додати pi/4 до поточного значення їхнього параметра Phase (rad). Після цього давайте запустимо симуляцію і зафіксуємо вікно відображення діаграми сузір'я (рисунок 15).

У кінці повторювалося для помилок фаз 150, 300 та 600 та обґрунтовувалися результати, отримані в симуляції (рисунок 4.15).

4.8 Формування Імпульсу та Вивчення Миттєвого Амплітудного Сигналу

На цьому етапі слід зауважити, що базовий сигнал, помножений на вихід Sine Wave, стає параметричним сигналом у пропускній смузі, чия спектр сконцентрований на несучій частоті 30 Гц. Таким чином, виходи Gain та Gain1 структурно відповідають базовим сигналам каналів I та Q відповідно. Тут ми досліджуємо форму імпульсу базових сигналів у поточному дизайні. Підключено виходи Gain та Gain1 до Scope і запущено симуляцію на 10 секунд. Потім зафіксовано вікно відображення Scope.

Прямокутний імпульс у часовому домені відповідає функції sinc у частотному домені. Таким чином, формування імпульсу за допомогою прямокутного імпульсу є неефективним з точки зору ширини смуги. Давайте проведемо формування імпульсу за допомогою піднятого косинусного імпульсу.

Для цього був вставлений блок Raised cosine Transmit Filter між блоками Gain та Product та ще один між блоками Gain1 та Product1. Пізніше були встановлені параметри симуляції MathWorks наступним чином (рисунок 16):

- Коефіцієнт вимкнення: 0.75;
- Вихідні вибірки на символ: 256;
- Обробка входу: Element as channels (sample-based).

ВИСНОВКИ

У цій магістерській роботі пропонується техніка попереднього проектування системи зв'язку для наносупутникового екологічного моніторингу. Дані щодо моніторингу Землі є корисними інструментами для управління та поліпшення різних аспектів регіональних та національних ресурсів. Оскільки наносупутники є одними з найбільш доступних систем для розробки та запуску, це часто буде вибраною опцією для невеликих країн і регіонів, і вибір також ймовірно принесе вигоди для промисловості невеликих супутників. Отже, екологічний моніторинг є потужним інструментом з великим потенціалом для управління навколишнім середовищем та іншими важливими сферами застосування для невеликих країн та регіонів.

Були оцінені процеси проектування систем для наносупутників на низькій земної орбіті, а також досліджено найбільш поширені антени космічного сегменту. Це дозволило визначити наступні цілі дослідження:

1. Були розглянуті системи екологічного моніторингу Землі на наносупутниках та досліджені їхні основні характеристики.
2. Оцінено фонди проектування антен на борту та надані деякі аналітичні дослідження.
3. Розроблений передавач та приймач квадратурного ключування фаз для пропускної смуги та проведена симуляція в Simulink.
4. Отримані криві бітових помилок за допомогою дизайну в Simulink в поєднанні з m-файлом.
5. Згенеровано зміщений період квадратурного ключування фаз та досліджено його характеристики.
6. Спостерігали діаграми, сузір'я та траєкторії сигналу квадратурного ключування фаз.

Під час аналізу ланцюга значущої вартості системи моніторингу Землі на наносупутнику були оцінені транспондерні функції обробки на борту та запропоновано. В результаті структурної та параметричної оптимізації побудовано процес проектування системи для антен орбітальних. Моделювання MathWorks дозволяє знаходити характеристики сигналів квадратурного ключування фаз. Були проведені моделювання формування імпульсу та миттєвої амплітуди сигналу, і були знайдені інноваційні параметри дизайну.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sandau, R., Röser, H.P. and Valenzuela, A. (2008) Small Satellites for Earth Observation: Selected Contributions. Springer, Berlin, 399.

2. Zosimovych, N. (2020) 1U CubeSat Platform Design. International Journal of Aerospace Sciences, 8, 1-7.

3. Zosimovych, N. (2016) Commercial Launch Vehicle Design. LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 184.

4. Zosimovych, N. (2020) Sounding Rockets Scattering Factors and Their Influence on Motion Accuracy. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 887, Article ID: 012018.

5. Zosimovych, N. and Chen, Z. (2018) 3D Printing CubeSat: A Low-Cost Mode of Space Exploration. Aeronautics and Aerospace, 2, 320-324.

6. Ippolito, L.J. (2017) Satellite Communications Systems Engineering. 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, 458.

7. Welti, C.R. (2012) Satellite Basics for Everyone. iUniverse, Bloomington, 142, 212.

8. Dybdal, R. (2009) Communication Satellite Antennas: System Architecture, Technology, and Evaluation. The McGraw-Hill Companies, London, 344.

9. The Future of Earth Observation Is in Small Satellites, 2016.

10. The International Space University, SOL, Strasbourg, 2006.

11. Sebestyen, G., Fujikawa, S., Galassi, N. and Chuchra, A. (2018) Low Earth Orbit Satellite Design. Microcosm Press and Springer, Berlin, 320.

12. Turnstile Antenna.
https://www.google.com/search?q=Turnstile+antenna+for+satellite+pictures&tbm

13. Helical Antenna in Satellite.

14. https://www.google.com/search?q=Quadrifilar+Helix+spacecraft+antenna+radiation+pattern+pictures&tbm

15. O'Neill, G. (2015) Benefits for Deployable Quadrifilar Helical Antenna Modules for Small Satellites. Helical Communication Technologies, Rockledge.

16. SpringerLink Spacecraft Communications.
https://www.google.com/search?q=1%2F2+wave+Quadrifilar+Helix+spacecraft+antenna+pictures&tbm

17. Wiley Online Library Miniaturized Dual-Band PCB Inverted F/L Antenna for Nano-Satellite.
https://www.google.com/search?q=full+wave+Quadrifilar+Helix+smallsat+antenna+radiation+gain+pictures&tbm

18. NanoAvionics CubeSat GPS Patch Antenna.
https://www.google.com/search?q=patch+smallsat+antenna+pictures&tbm

19. Design and Analysis of Parabolic Reflector Using MATLAB.
https://www.google.com/search?q=dish+smallsat+antenna+radiation+gain+pictures&tbm

20. Satnews Publishers: Daily Satellite News.
https://www.google.com/search?q=dish+smallsat+antenna+pictures&tbm

21. Proakis, J.G. and Salehi, M. (2001) Digital Communications. 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 1170.

22. Jonas Eneberg - Inmarsat - Satellite Role in 5G. 2017. [Online]. Available:

23. https: //www .slideshare.net/TechUK/j onas - eneberg-inmarsat-satellite-role-in-5g. Accessed on: May 18, 2017.

24. Т.М. Наритник, В.Г. Сайко, Г.Л. Авдєєнко, В.Я. Казіміренко, С.В. Сарапулов, " Система низькоорбіталь-ного супутникового зв'язку", Н 04 В 7/185. патент 134409 Україна, травень 10, 2019.

25. 5G white paper | NGMN. Next generation mobile networks, Alliance 2017.[Online]. Available: https://www.ngmn.org/work-program- mer/5g-white-paper.html. Accessed on: May 19, 2017.

26. [A. Mukherjee, and D. G. Roy "A Power and Latency Aware Cloudlet Selection Strategy for Multi-Cloudlet Environment," IEEE Transactions on Cloud Computing Mag., vol. 3, pp.44-48, July 2016.

27. D. Szabo, A.Gulyas, F. Fitzek, and D. Lucani, "Towards the tactile internet: Decreasing communication lateen-cy with network coding and software defined networking," In European Wireless 2015. 21th European Wireless Conference, May 2015. pp. 1-6.

28. V. Saiko, S. Toliupa, V. Nakonechnyi, and Dakov Serhii, "The method for reducing probability of incorrect data reception in radio channels of terahertz frequency range," 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Feb. 2018.

29. В.Г.Сайко, та Т.М. Наритник, Безпроводові системи зв'язку терагерцо-вого діапазону: монографія. Deutsch: Видавництво "LAP LAMBERT Academic Publishing ", 2019.

30. G. Avdeetiko, "Simulation of a terahertz band wireless telecommunication system based on the use of IR-UWB signals," Telecommunications and Radio Engineering, vol.78 (10), pp. 891 - 909, 2019.

31. M. Giordani and M. Zorzi, "Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities," IEEE Network, pp. 12–19, 2020.

32. J. Loughran, "Starlink launches 60 more satellites but commercial service faces delays," Engineering and Technology (IET), Nov. 2020. [Online]. Available: https://eandt.theiet.org/content/articles/2020/11/starlink-launches-60-more-satellites-but-commercial-service-faces-delays/

33. Кременецька Я. А., Макаренко А. О., Руденко Н. В., Березнюк А. В., Лазебний С. Г., Яковець В. П. Багаторівнева модель наземних і неземних телекомунікацій із застосуванням технологій оптичного безпроводового зв'язку // Зв'язок, – 2021. – № 3 (151). – С. 3-11.

34. Я. А. Кременецька, А. О. Макаренко, Н. В. Руденко, В. И. Кравченко, К. Д. Бутолін, "Методи підвищення інформаційної ємності сигналів з використанням поляризаційних ефектів для систем зв'язку в оптичному і радіо- діапазонах" Зв'язок, – 2021. – № 5(153).

35. Сивик О. С., Олійник Н. О., Сподарцев І. М., Сидоренко О. В., Яковець В. П., Кременецька Я. А. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій // Зв'язок, – 2021, – № 3 (151), – С. 17-21.

36. A. Kanno, K. Inagaki, I. Morohashi, T. Sakamoto, T. Kuri, I. Hosako, T. Kawanishi, Y. Yoshida, K. Kitayama, "20-Gb/s QPSK W-band (75–110GHz) wireless link in free space using radio-over-fiber technique", IEICE Electron. Exp., vol. 8, no. 8, pp. 612-617, 2011.

37. A. Kanno, K. Inagaki, I. Morohashi, T. Sakamoto, T. Kuri, I. Hosako, T. Kawanishi, Y. Yoshida, K. Kitayama, "40 Gb/s W-band (75–110 GHz) 16-QAM radio-over-fiber signal generation and its wireless transmission", Opt. Exp., vol. 19, no. 26, pp. B56-B63, 2011.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут
телекомунікацій

Методи використання платформ мікро та нано супутників в низькоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних мережах

ДОПОВІДАЧ:
студент групи АРДМ-62
Сюрвасєв Владислав Валерійович
Керівник Дакова Л.В.

Мета роботи – аналіз системи зв'язку для наносупутникового спостереження землі, що дозволяє використовувати супутники класу мікросупутник та наносупутник (куб-сат) для створення складних інформаційно-телекомунікаційних систем космічного базування.

Об'єкт дослідження – архітектура низькоорбітальних космічних мереж.

Актуальність роботи – обрана тема актуальна в наші дні, так як застосування низькоорбітальних супутникових мереж буде сприяти характеристикам глобальності, збільшення можливостей послуг 5G і вирішення проблем, пов'язаних з підтримкою зростання мультимедійного трафіку, повсюдного покриття, між машинного зв'язку і критично важливих телекомунікаційних місій.

Роль неназемних мереж

Сприяти розгортанню послуги 5G в необслуговуваних районах

Підвищити надійність послуги 5G

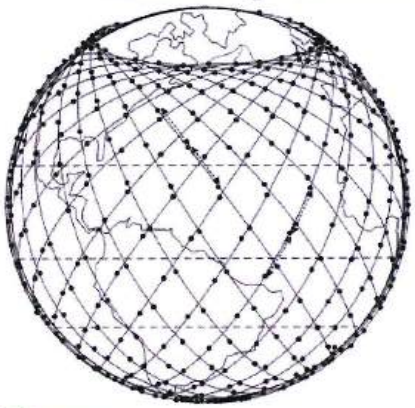
Запровадити масштабованість мережі 5G

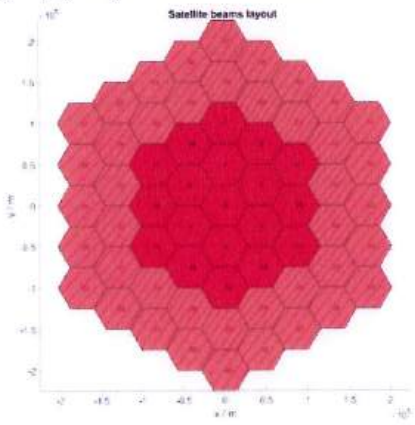
Резервне з'єднання

Розвантаження даних

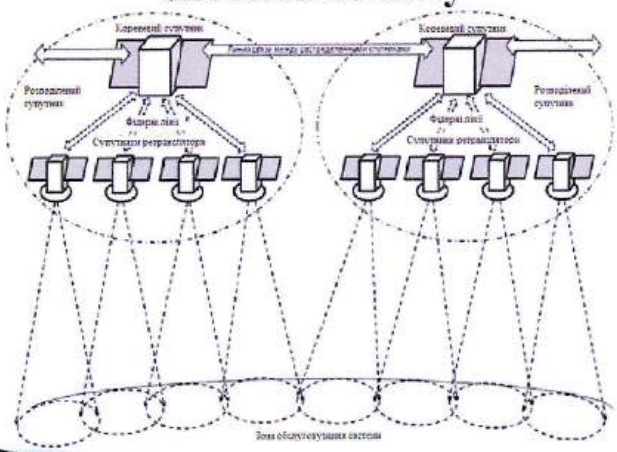
Паралельні незалежні канали

Розгортання NTN за допомогою низькоорбітальних угрупувань LEO





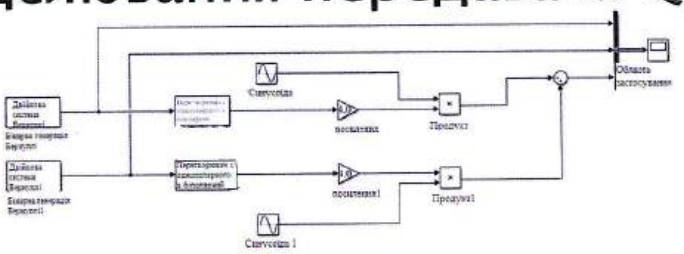
Архітектура низькоорбітальної супутникової системи зв'язку

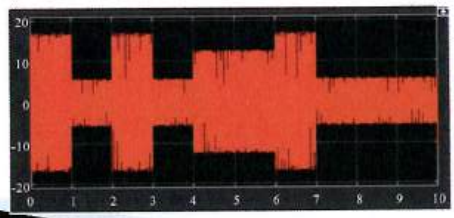


Процес проектування системи



Моделювання передавача QPSK





Висновки

1) Архітектура «розподіленого супутника» дозволяє використовувати супутники класу мікросупутник та наносупутник (куб-сат) для створення складних інформаційно-телекомунікаційних систем космічного базування, зокрема систем дистанційного зондування Землі.

2) Дані щодо моніторингу Землі є корисними інструментами для управління та поліпшення різних аспектів регіональних та національних ресурсів. Оскільки наносупутники є одними з найбільш доступних систем для розробки та запуску, це часто буде вибраною опцією для невеликих країн і регіонів, і вибір також ймовірно принесе вигоди для промисловості невеликих супутників. Отже, екологічний моніторинг є потужним інструментом з великим потенціалом для управління навколишнім середовищем та іншими важливими сферами застосування для невеликих країн та регіонів.

Дякую за увагу!



ПЕРЕВІРЕНО

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

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

Автор: Владислав Сюрвасєв

Назва: Методи використання платформ мікро та нано-супутників в низькоорбітальних інформаційно-телекомунікаційних мережах

Координатор: Лариса Дакова

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:1.7

Коефіцієнт подібності 2:0.4

Тривога: 266

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

....

Дата *Підпис Наукового керівника*