

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Сергій ЖУК
«__» _____ 2024р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
“Радіотехнічні комп’ютеризовані системи”
зі спеціальності 172 **“Телекомунікації та радіотехніка”**
на тему: «Канали передачі інформації з низькоорбітальних космічних апаратів»

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи РС-21 мп

Захарченко Михайло Миколайович

(прізвище, ім’я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник: *доцент каф. радіотехнічних систем*
к.т.н., доц., Шпилька Олександр Олександрович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім’я, по батькові)

(підпис)

Рецензент: *Антипенко Руслан Володимирович*

ПІБ рецензента

доц. каф. ПРЕ., к.т.н., доц.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім’я, по батькові)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____
(підпис)

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-наукова програма «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Захарченко Михайлу Миколайовичу

1. Тема дисертації «Канали передачі інформації з низькоорбітальних космічних апаратів», науковий керівник дисертації Шпилька Олександр Олександрович, *кандидат технічних наук, доцент.*

затверджені наказом по університету від від «09» 11 2023 р. №5206-с

2. Термін подання студентом дисертації 05 січня 2024

3. Об'єкт дослідження: Передача даних з малих космічних апаратів радіотехнічними засобами в X діапазоні

4. Предмет дослідження Методи та способи передачі даних на основі CCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems) стандарту.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести огляд аналогів і обґрунтування актуальності, провести огляд стандартів космічного зв'язку та розробити відповідну структурну схему передавача, розробити схему електричну принципову однієї із функціональних частин передавача та його друковану плату, розробити модель каналу зв'язку та провести статистичне моделювання каналу, описати конструктивні особливості передавача.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація PowerPoint у вигляді слайдів.

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

9. Дата видачі завдання 14 листопада 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Огляд аналогів і обґрунтування актуальності	14.11-31.11	
	Розробка моделі передавача	01.12-16.12	
	Моделювання каналу космічного зв'язку	17.12-25.12	
	Описати конструктивні особливості передавача.	26.12-05.01	

Студент

Михайло ЗАХАРЧЕНКО

Науковий керівник

Олександр ШПИЛЬКА

АНОТАЦІЯ

Текстова частина дисертації роботи містить: 65 с., 29 рис., 2 табл., 6 джерел.

Метою роботи є Розробити передавач для каналу передачі з малих космічних апаратів в CCSDS стандарті.

Об'єкт дослідження – Передача даних з малих космічних апаратів радіотехнічними засобами в X діапазоні.

Предмет дослідження – Методи та способи передачі даних на основі CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) стандарту.

Ключові слова: Супутник, X-band, передавач, стандарти космічного зв'язку CCSDS.

Робота присвячена розробці передавача даних з малих космічних апаратів в діапазоні X-band за допомогою використання CCSDS стандарту передачі даних.

У рамках роботи розглянуті особливості побудови передавачів в різних частотних діапазонах, переглянуті способи розміщення супутників в малих космічних апаратах, розроблена модель передачі даних. Також прорахований енергетичний канал, розроблена структурна схема такого передавача.

Для реалізації моделі передачі даних був використаний програмний застосунок MatLab та написаний код з урахуванням бітових помилок та побудована діаграма сигнального сузір'я.

На основі цих даних було прийнято обрати діапазон X відповідно до цього було розроблену схему електричну принципову та зроблені креслення друкованої плати за допомогою програмного забезпечення Altium Designer. Також були зроблені висновки та надані рекомендації що до подальшого вивчення питання про передавачі в X-band діапазоні.

ABSTRACT

The text part of the dissertation contains: 65 pages, 29 figures, 2 tables, 6 sources.

Research objective: to develop a transmitter for a transmission channel from small spacecraft in the CCSDS standard.

Object of research: the transmission of data from small spacecraft by radio-technical means in the X band.

Subject of research: methods of data transmission based on the CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) standard.

Keywords: Satellite, X-band, transmitter, standard.

The work is devoted to the development of a data transmitter from small spacecraft in the X-band range using the CCSDS data transmission standard.

As part of the work, the peculiarities of building transmitters in different frequency ranges were considered, the methods of placing satellites in small spacecraft were reviewed, and a data transmission model was developed. The energy channel is also calculated, and the structural diagram of such a transmitter is developed.

To implement the data transmission model, the MatLab software application was used and the code was written taking into account bit errors and the signal constellation diagram was constructed.

Based on these data, it was decided to choose the X range, accordingly, an electrical schematic diagram was developed and printed circuit board drawings were made using the Altium Designer software. Conclusions were also made and recommendations were given for further study of the issue of transmitters in the X-band range.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Огляд аналогів і обґрунтування актуальності.....	10
1.1 Космічний зв'язок	10
1.2 Огляд аналогів	10
1.3 Розробка технічного завдання	15
1.4 Стандарт і опис фізичного рівня	16
1.5 Висновки	23
2 Розробка передавача космічного каналу зв'язку	25
2.1 Розробка структурної схеми	25
2.2 Розробка схеми електричної принципової блоку формування ПЧ....	37
2.3 Висновки	42
3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ КАНАЛУ КОСМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ В САПР MATLAB	43
3.1 Розробка програмного забезпечення для оцінки ймовірності бітових помилوک	43
3.2 Результати моделювання каналу зв'язку з низькоорбітальними космічними апаратами.....	49
3.3 Висновки	52
4 конструкторський розділ	53
4.1 Опис конструктивного стандарту CubeSat	53
4.2 Креслення плати.....	57
Висновки	59
Використані джерела	60
Додаток А. СХЕМА Структурна	61
Додаток Б. Схема електрична принципова	62

	7
Додаток В. Креслення друкованої плати	63
Додаток Г. Статті	64

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – Аналого цифровий перетворювач

МК – Мікроконтролер

ПЧ – Проміжна частота

РН – Ракета носії

ЦАП – Цифро аналоговий перетворювач

CCSDS – Consultative Committee for Space Data Systems

BER – Bit Error Rate

BPSK – Binary phase-shift keying

CSLI - CubeSat Launch Initiative

FARM – Frame Acceptance and Reporting Mechanism

FPGA – Field-Programmable Gate Array

LEO – Low Earth orbit

LDPC – Low-density parity-check code

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

QPSK – Quadrature phase-shift keying

RC – Raised cosine

SDR – Software-defined radio

SNR – Signal Noise Ratio

VCID – Virtual channel id

ВСТУП

Супутниковий зв'язок є невід'ємною частиною нашої сучасної інформаційної і комунікаційної інфраструктури. Він забезпечує надійний обмін і передачу даних на глобальному рівні, використовуючи супутники, які обертаються навколо Землі. Потужний та ефективний передавач є ключовим компонентом цієї системи, зокрема в X-band діапазоні, який відомий своєю високою пропускну здатністю та точністю передачі сигналів.

Супутникові системи X-band стають все більш важливими для додаткових застосувань, таких як телекомунікації, природний ресурсозбереження, наукові дослідження та оборонні цілі. Розробка передавача для роботи в цьому діапазоні вимагає великої уваги до деталей і передових технологій.

Метою дипломної роботи є розробка та аналіз передавача супутникового зв'язку, призначеного для X-band діапазону. У роботі будуть розглянуті ключові аспекти розробки такого передавача, включаючи архітектуру, компоненти, модуляцію та синхронізацію сигналу.

Дана дипломна робота допоможе глибше розібратися в супутниковому зв'язку в X-band діапазоні та розробці ефективних і надійних передавачів для цієї цілі. Досягнення цієї мети відіграє важливу роль у подальшому розвитку сучасних комунікаційних систем та наукових досліджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати наявні на ринку аналоги передавачів супутникового зв'язку.
- Розробити схему електричну принципову.
- Розрахувати параметри передавача.
- Впровадити протокол передачі даних CCSDS.

Дипломна робота спрямована на розробку передавача, який відповідає вимогам X-band діапазону та впроваджує передові технології для забезпечення ефективної та надійної передачі сигналів. Вивчення і розробка цього передавача матиме велике значення для подальшого розвитку супутникових комунікацій та відкриє нові можливості для використання супутників у різних галузях.

1 ОГЛЯД АНАЛОГІВ І ОБГРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ

Розробка передавача супутникового зв'язку в X-band діапазоні важлива для подальшого розвитку та удосконалення технологій зв'язку і сприяє вирішенню багатьох завдань у космосі та на Землі для військових та цивільних задач.

1.1 Космічний зв'язок

Космічний зв'язок - це форма зв'язку, що використовується для передачі і отримання інформації з космічних апаратів, супутників та космічних станцій, які перебувають у космосі. Ця технологія грає важливу роль в багатьох аспектах сучасного суспільства та досліджень космосу.

Використання космічного зв'язку дає змогу бути доступним в будь-якому місці на планеті Земля, збирати інформацію з космосу та передавати її на приймальні станції для подальшої обробки, визначати місцезнаходження на землі, робити дослідження далекого космосу та багато іншого.

Одним з головних пристроїв є передавач супутникового зв'язку, без його допомоги ми не зможемо передати сигнали на землю чи з неї, тому розробка передавача супутникового зв'язку є важливим кроком для освоєння космічних технологій.

1.2 Огляд аналогів

Огляд аналогів передавачів супутникового зв'язку в X-діапазоні може включати аналіз та порівняння різних моделей, виробників та технічних характеристик пристроїв. Одні з головних параметрів за якими відбувається порівняння це:

1) Частотний діапазон: Передавачі працюють у конкретному частотному діапазоні який обирається від необхідних умов та середовища в якому поширюється радіосигнал. Під час огляду, важливо враховувати, чи підтримує аналогічний передавач потрібний діапазон для бажаного застосування. ((З огляду технічних умов було вирішено обрати X-band діапазон (8,0 - 12,0 ГГц) тому що: проникність є більшою ніж у вищих частотах, має велику пропускну здатність, менше перешкод в порівнянні з меншими частотами які використовуються в мобільних мережах, мережах Wi-fi та Bluetooth))

2) Вихідна потужність: Потужність передавача впливає на дальність та якість зв'язку.

3) Модуляція: Різні передавачі можуть підтримувати різні методи модуляції сигналу, такі як QPSK (квадратурна фазова зміна), BPSK (бінарна фазова зміна) та інші.

4) Робоча температура: Якщо передавач буде використовуватися в умовах низьких або високих температур, важливо переконатися, що він призначений для роботи в таких умовах.

5) Споживана потужність: Ефективність споживаної потужності важлива, особливо для космічних застосувань. Врахувати споживану потужність, щоб підвищити час роботи на батареях або сонячних панелях.

6) Надійність та стійкість: Робота в космічних умовах вимагає високої надійності та стійкості до радіаційного впливу та інших факторів.

7) Інтеграція та зв'язок з іншими системами: Деякі передавачі можуть мати можливості для інтеграції з іншими космічними системами або супутниками.

8) Вартість та підтримка: Потрібно враховувати вартість обладнання та доступність підтримки від виробників

Приклади реальних передавачів супутникового зв'язку в різних діапазонах

S Band Передавач для малих супутників

Трансиверна система SLink забезпечує величезні корисні дані низхідної лінії зв'язку для мікро, нано або піко супутникові програми та перевага інтегрованої висхідної лінії передачі даних. Можливість двонаправленого зв'язку між супутниками. Супутник розроблений як високо інтегрована система трансивера діапазону S.

Цільовим терміном експлуатації є щонайменше два роки роботи на низькій навколоземній орбіті (LEO). Всі програмні коди зберігаються надлишково для забезпечення високої надійності. Радіосистему можна регулювати в діапазоні частот від 2200 до 2290 МГц для низхідної лінії зв'язку (Sat2Ground) і між супутникових каналів зв'язку (Sat2Sat) і від 2025 до 2110 МГц для висхідної лінії зв'язку. канали зв'язку (Ground2Sat), напр. для цілей телекомандування.

- Високошвидкісні канали передачі даних від/до LEO
- Використання мікро-, нано- чи піко-супутників
- Можливість налаштування для різних режимів: Sat2Ground, Ground2Sat і Sat2Sat
- двонаправлені канали зв'язку

Особливості:

- Повнофункціональний трансивер діапазону S
- Конструкція перевірена на льотний рівень
- Компактний корпус і низьке енергоспоживання
- Універсальні параметри конфігурації
- Низька вартість дизайну COTS
- Короткий термін доставки (зазвичай 6 місяців)

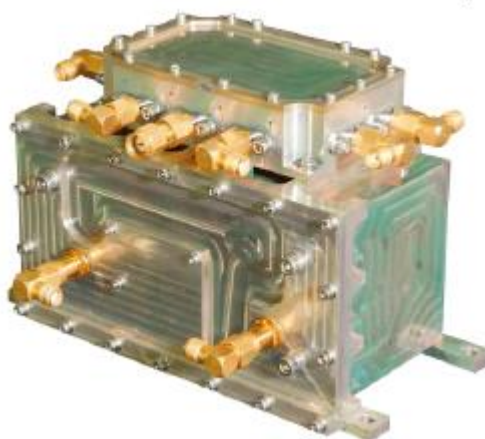


Рисунок 1.1 – S-band передавач супутникового зв'язку

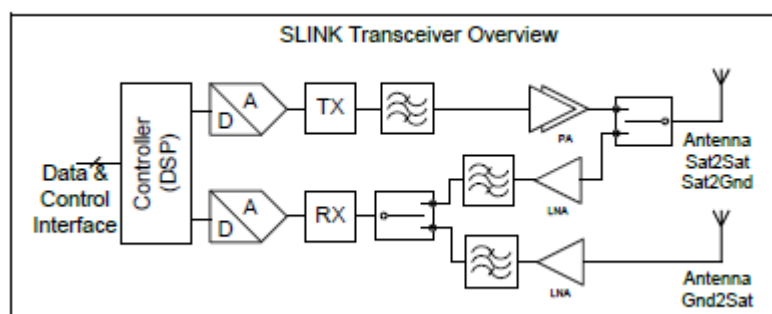


Рисунок 1.2 – Структурна схема S-band передавача супутникового зв'язку

X Band Передавач для малих супутників

XLink — це передова система прийомопередавача (Software Defined Radio - SDR) для каналів зв'язку X-діапазону малих супутників у середовищі LEO. Механічні розміри підходять для 1U CubeSat, а також для більших супутників.

Радіо інтерфейс і протокол розроблені відповідно до стандартних протоколів CCSDS. Буде можлива швидкість передачі даних із чистою швидкістю корисного навантаження 25 Мбіт/с. Підтримувані схеми модуляції включають BPSK, QPSK і типи модуляції вищого порядку з відповідними схемами кодування FEC. Виходячи із загальної концепції, можуть бути можливими навіть вищі швидкості передачі даних понад 100 Мбіт/с.

Особливості:

- Повнофункціональний і прозорий двонаправлений трансивер діапазону X (SDR)
- CCSDS сумісний
- Конструкція перевірена на льотний рівень
- Компактний корпус і низьке енергоспоживання
- надзвичайно плоска конструкція антени, що відповідає вимогам замовника
- Низька вартість дизайну COTS
- Короткі терміни доставки

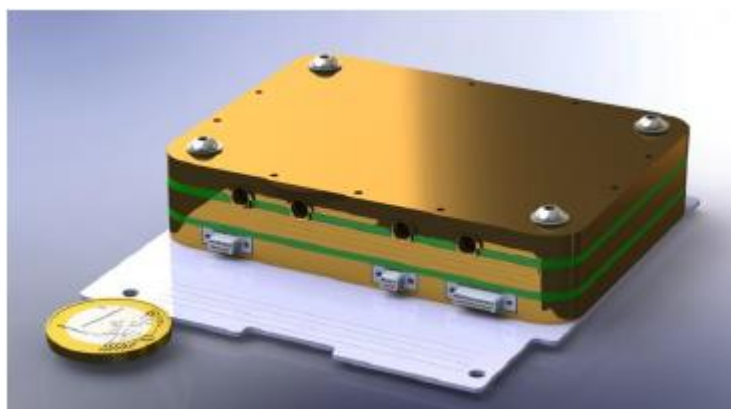


Рисунок 1.3 – X-band передавач супутникового зв'язку

Високошвидкісний передавач X-діапазону для аерокосмічного застосування XBC-200

Високошвидкісний передавач X-діапазону низхідної лінії зв'язку XBC-200 для мікро супутників, Cubesat, ракет-носіїв і бортових операцій є проривним рішенням для місій наступного покоління. XBC-200, призначений для наступаючої епохи NewSpace, вирішує проблему великої кількості даних на борту космічного корабля. Крім того, він забезпечує трансляцію відео 4K/HD у реальному часі з ракет-носіїв або бортових систем.

Особливості:

- Визначене користувачем кодування даних
- Широкий діапазон вхідної напруги постійного струму 9-36 В
- Несуча радіочастота, програмована під час польоту
- Низький фазовий шум і паразитні/гармонічні
- Наднизький дрейф частоти несучої радіочастоти
- Найсучасніша технологія GaN
- Увімкнути радіочастотну передачу лише програмним забезпеченням
- Простий протокол OBC (ASCII+CRC)
- Послідовний домашній інтерфейс RS-485/422
- Телеметричні дані домашнього господарства
- Синхронний інтерфейс даних + годинник LVDS

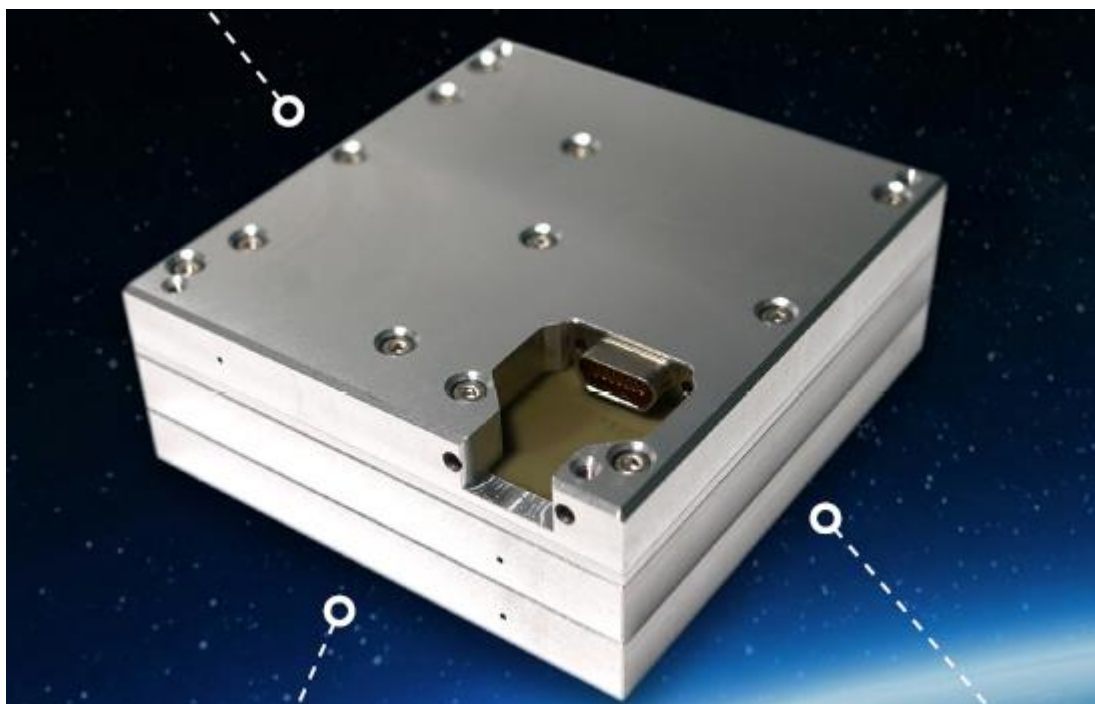


Рисунок 1.4 – X-band передавач супутникового зв'язку

Таблиця 1.1 – Таблиця порівняння параметрів передавачів

Параметри	S - Band	X- Band	XBC - 200
Робоча частота, МГц	2025-2300	7145 - 8500	7800-8400
Вихідна потужність, Вт	0.5	1	2
Вхідна напруга, В	7-18	7-18	9-36
Швидкість передачі, Мбіт/с	4	25	200
Вага, г	420	200<	400
Споживання потужності	12	15	35

Конструктивні особливості передавачів.

Однією з основних конструктивних особливостей будуть описані в розділі 4. Вирішено було обрати Cubesat стандарт.

Близько половини всіх місій CSLI (CubeSat Launch Initiative) проводять наукові дослідження, найбільше дослідження космічної погоди та науки про Землю. Спеціальні галузі наукових досліджень включають: біологічні науки, вивчення навколоземних об'єктів, зміни клімату, снігового/льодового покриття, орбітального сміття, планетознавства, космічної астрономії та геліофізики. Шістдесят шість відсотків усіх місій CSLI проводять розробку технологій або демонстрації. Зв'язок, рух, навігація та контроль, а також радіаційні випробування ведуть теми в цій галузі. Іншими відомими технологіями є сонячні вітрила, адитивне виробництво, фемтосупутники та супутники для смартфонів. Низька вартість розробки CubeSat дозволяє виконувати дії з підвищеним ризиком, які були б неможливі під час великомасштабних місій NASA.

1.3 Розробка технічного завдання

Після проведення аналізу пункту 1.2 та таблиці 1.1 можна обрати параметри передавача опираючись на реально існуючі передавачі.

- Робочу частоту обрати в діапазоні 7800 МГц - 8400 МГц.
- Вихідну потужність до 2 Вт.
- Швидкість передачі даних 100 Мбіт/с.
- Типи модуляції BPSK/QPSK/QAM8/QAM16.

- Інтеграція з CCSDS стандартом.

Габаритні параметри передавача:

Вага до 400г.

Також є необхідність визначення умов роботи передавача таких як:

- Дальність приймальної станції 800 Км.
- Втрати потужності в навколишньому середовищі 16 дБВт.

1.4 Стандарт і опис фізичного рівня

Фізичний рівень в мережах зв'язку визначає, як дані кодуються і передаються через фізичні канали передачі, такі як кабелі, волоконно-оптичні лінії чи бездротові інтерфейси. Цей рівень визначає характеристики електричних, оптичних, механічних і електромагнітних інтерфейсів, які використовуються для передачі даних між пристроями.

Стандарти фізичного рівня визначають, які типи кабелів, коннекторів, модуляції сигналу, частоти і інші параметри використовуються для передачі даних.

Опис CCSDS стандарту передачі космічного зв'язку.

Декілька причин вибору даного стандарту для виконання магістерської дисертації.

- 1) Розробляють даний стандарт великі організації які мають досвід в плануванні великих космічних місій.
- 2) Даний стандарт широко розповсюджений та підтримується багатьма виробниками обладнання.
- 3) Велика кількість довідкових матеріалів.

Архітектура стандарту CCSDS

Стандарт являє собою звичайну модель OSI розділену тільки на канальному рівні на потоки вверх та вниз.

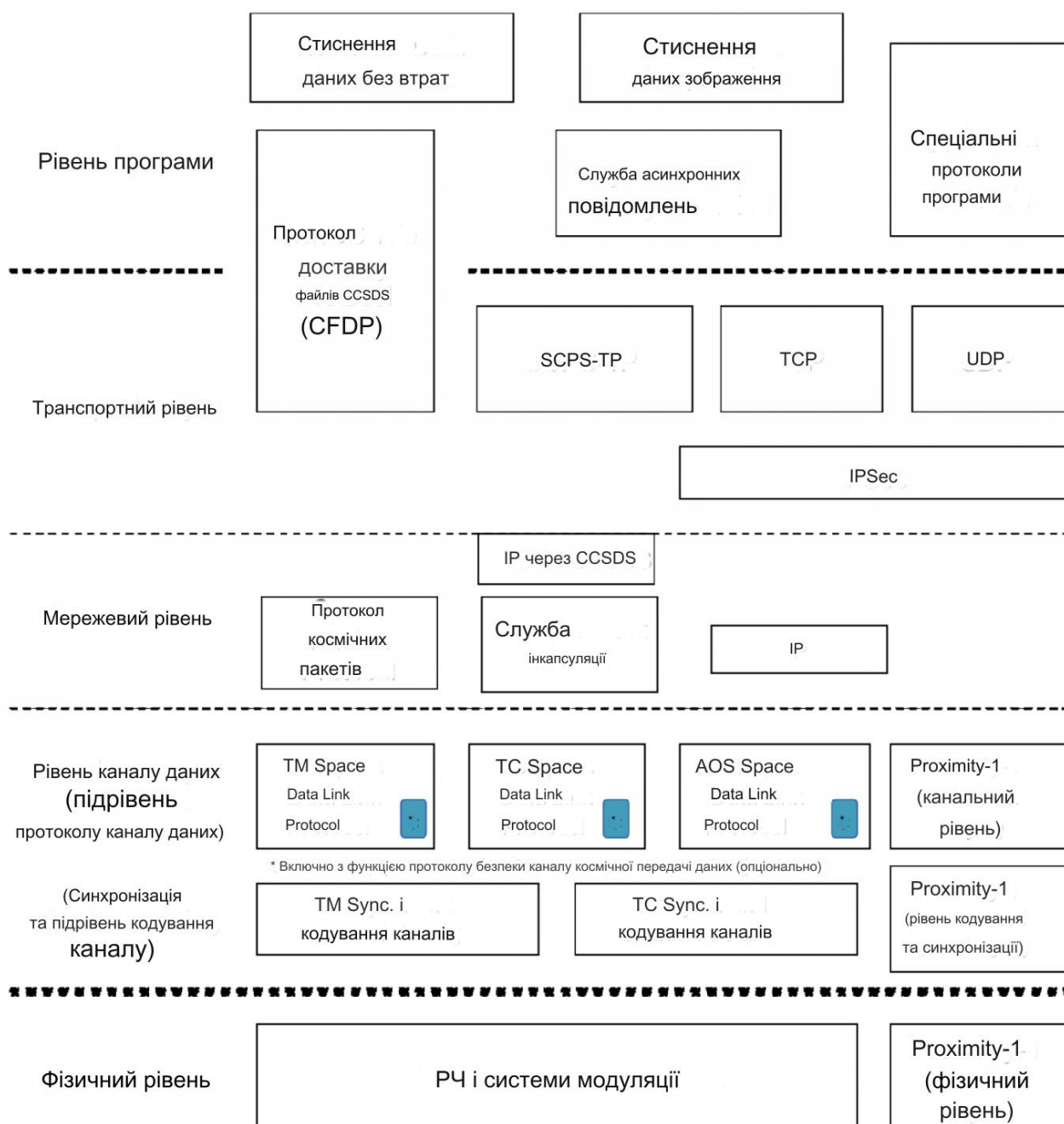


Рисунок 1.5 – модель OSI для стандарту CCSDS

Розглянемо рівні OSI

Фізичний рівень:

На цьому рівні відбувається перетворення модольованого сигналу в бітовий потік даних. Задача CCSDS на цьому рівні визначити типи модуляції (BPSK, QPSK, QAM8, QAM16)

Рівень синхронізації і кодування:

На цьому рівні відбувається перетворення бітових потоків в кадри. Тут виконується кадрова синхронізація.



Рисунок 1.6 – Шлях проходження даних на рівні синхронізації і кодування.

Канальний рівень:

Канальний рівень складається з двох підрозділів Телеметрія (ТМ) та Телекоманди (ТС)

Телеметрія – це ті дані які отримує наземна станція від передавача. Вся інформація ділиться на невеликі фрагменти фіксованої довжини – кадри в яких знаходиться дані і службові поля.

Структура кадру

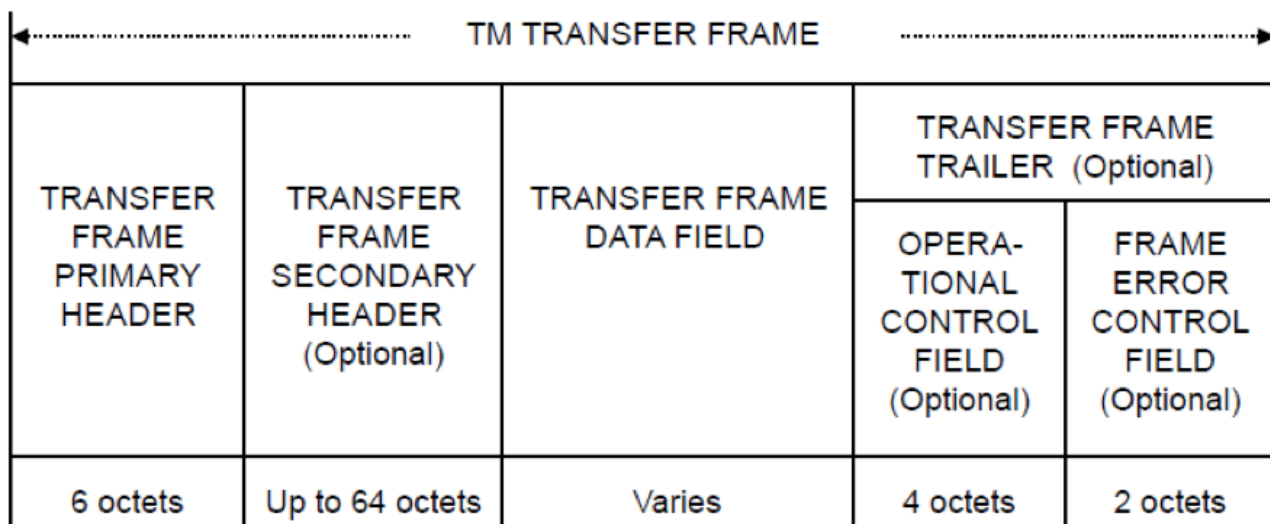


Рисунок 1.7 – Структура кадру

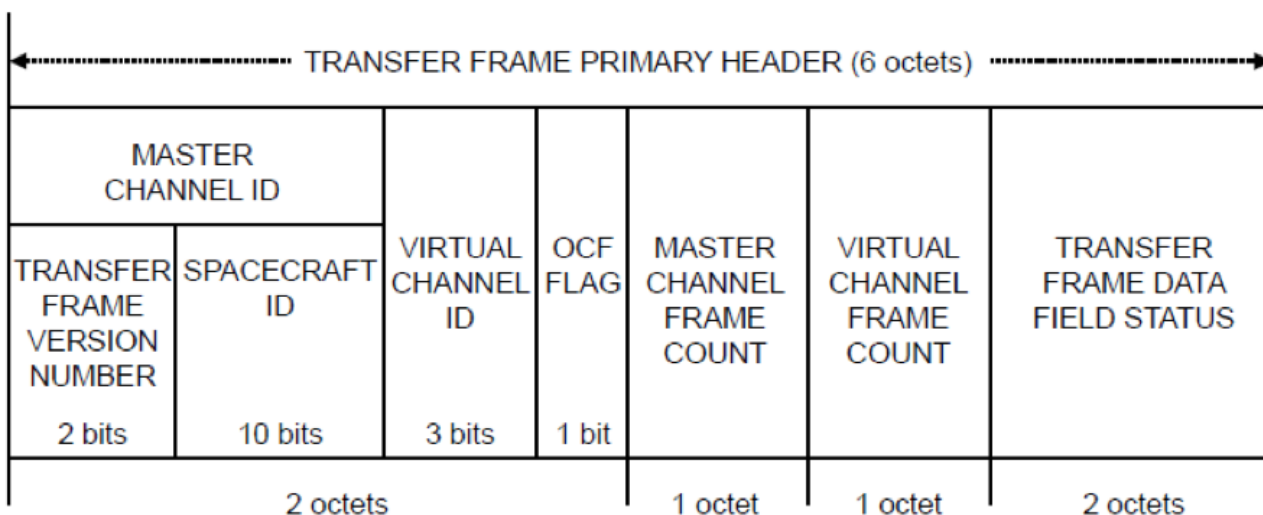


Рисунок 1.8 – Структура заголовку

По стандарту CCSDS кожен кадр повинен мати свій унікальний ідентифікатор по якому можна визначити передавач. Номер версії кадру допомагає визначити версію стандарту яка використовується щоб вірно прочитати кадр.

В полі віртуального каналу (Virtual Channel ID) повинен бути VCID того каналу з якого був отриманий пакет. Обмежень на цей канал немає. Механізм віртуальних каналів існує для мультиплексування.

Поле Operational Control створене для підтримання зворотного зв'язку.

Лічильники кадрів головного і віртуального каналу – це поля які збільшуються на 1 при відправці кожного кадру, служать індикатором того що жоден кадр не був втрачений.

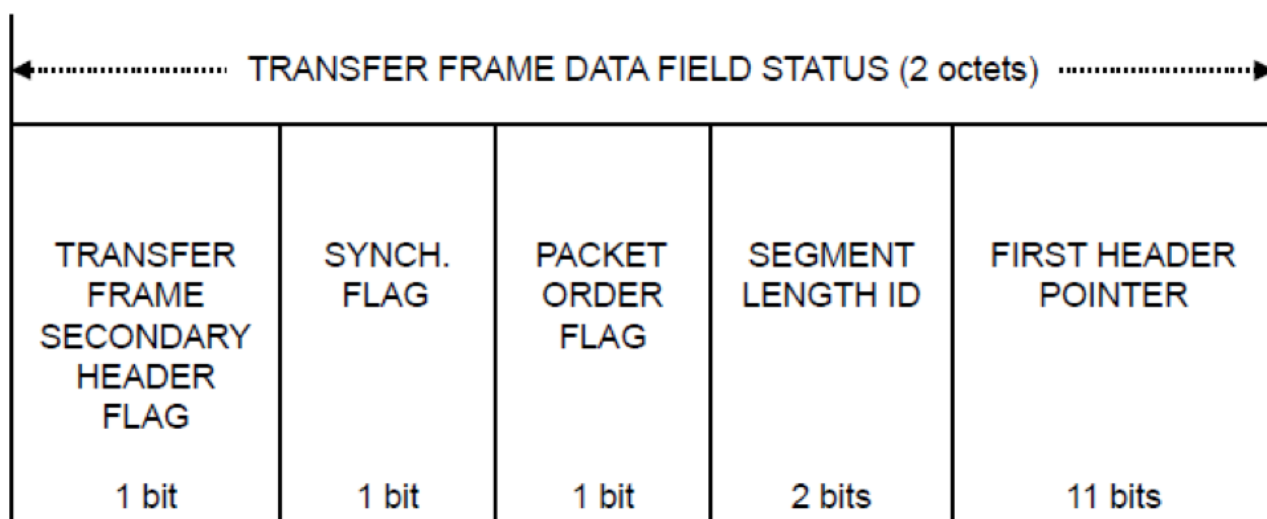


Рисунок 1.9 – Кадр даних

Поле флагу додаткового заголовку (рисунок 1.9) повинно бути індикатором наявності чи відсутності кадру даних.

Поле вказівника на перший заголовок (First Header Pointer) при значенні флагу синхронізації 1 повинен в бінарному вигляді показувати позицію першого октету першого пакету в полі даних (Data Field) кадру телеметрії. Позиція вираховується з 0 у зростаючому порядку від початку поля даних.

Телекоманди маю декілька відмінностей.

- 1) Інша структура заголовків
- 2) Динамічна довжина
- 3) Гарантія доставки пакетів

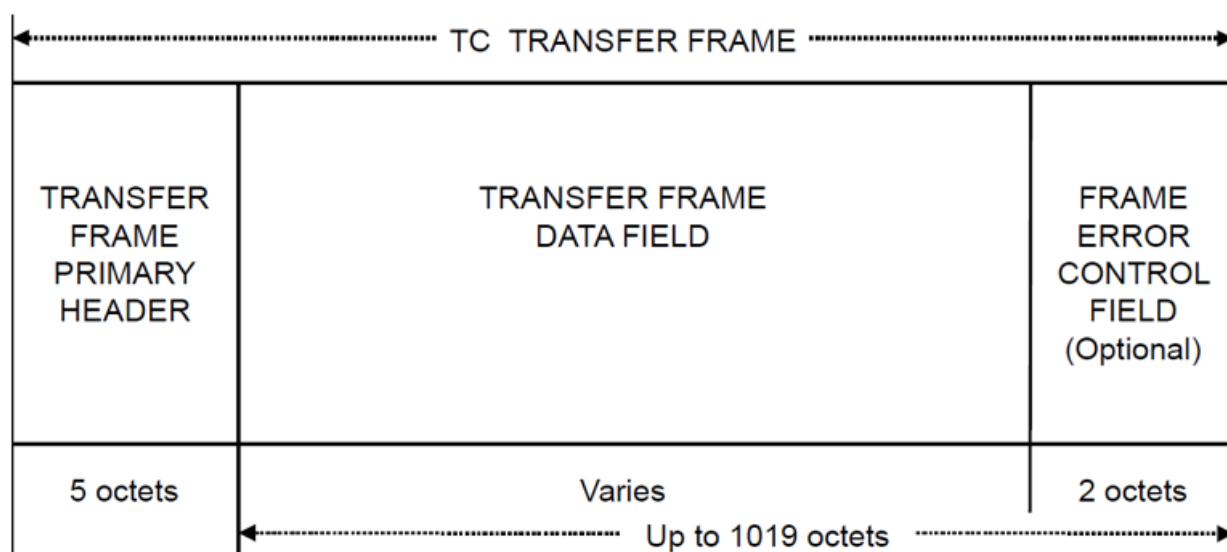


Рисунок 1.10 – Кадр даних телеметрії

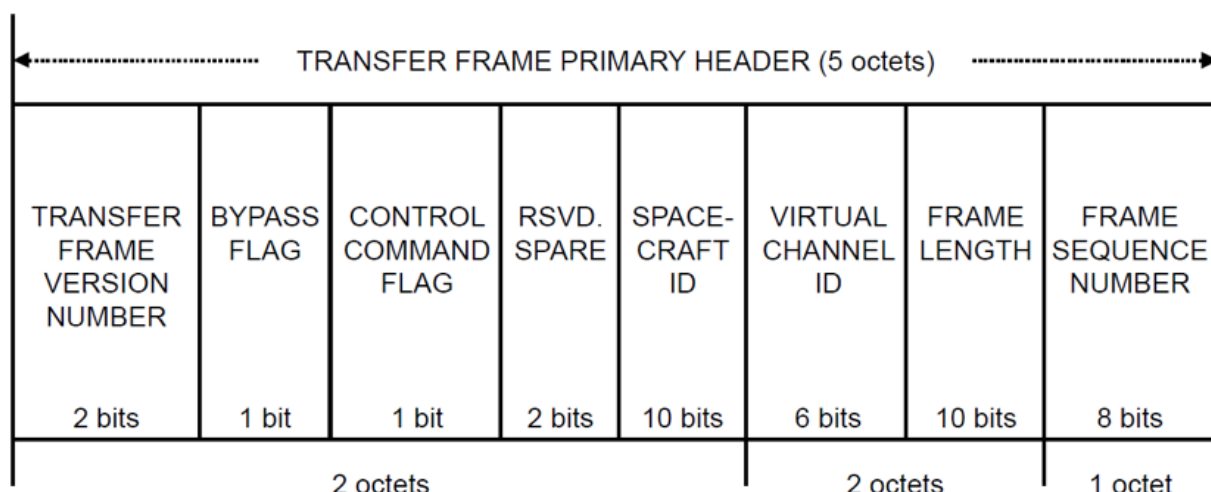


Рисунок 1.11 – Кадр заголовку телеметрії

Деякі поля збігаються з полями телекоманд. Тому розглядаються нові поля.

Один біт флагу повинен вказувати що кадр є кадром типу А і перевірка його повинна бути згідно FARM (Frame Acceptance and Reporting Mechanism).

RSVD. SPARE – зарезервовані Біти

Поля довжини кадрів повинно бути після заголовка і мати ціле число октетів з максимальною довжиною 1019 октетів.

Блок даних кадру повинен містити в собі:

Цілу кількість октетів даних користувача

Заголовок сегмента і наступні за ним цілу кількість октетів даних користувача.

Якщо заголовок представлений, блок даних повинен містити в собі Пакет, безліч Пакетів або його частина. Блок даних без заголовка не може містити частини Пакетів, але може містити блоки даних приватного формату. З цього випливає, що заголовок потрібно тоді, коли переданий блок даних не вміщається в один кадр. Блок даних, що має заголовок, називається сегментом.

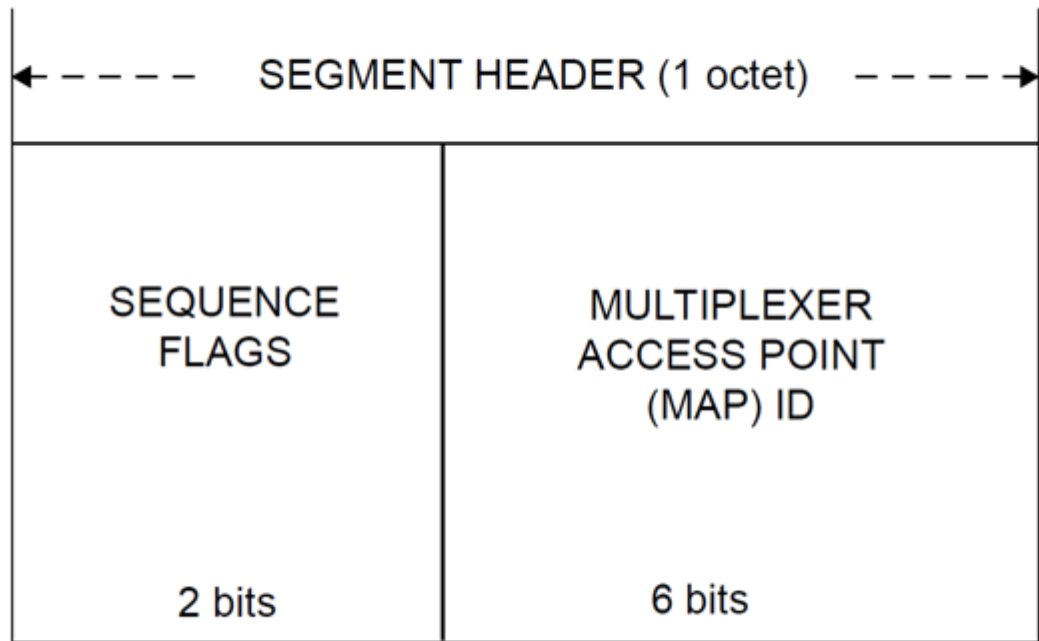


Рисунок 1.12 – Сегмент заголовку

Поле розміром 2 біта повинно мати:

01 – якщо перша частина знаходиться в блоці даних

00 – якщо середня частина знаходиться блоці даних

10 – якщо останя частина знаходиться блоці даних

11 – якщо ділення немає

Поле MAP повинно мати 0 якщо MAP канали не використовуються

Мережевий рівень:

Тут можливо використати два варіанти, користуватися стандартом CCSDS або інший стандарт інкапсулювати в пакет CCSDS.

Розглядається 2-й варіант

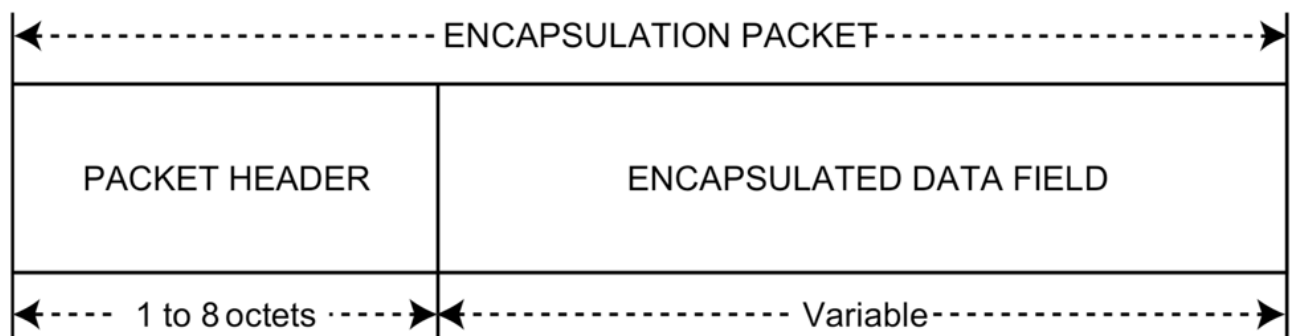


Рисунок 1.13 – Інкапсульований пакет

Заголовок має різні значення в залежності від довжини протокола.

ENCAPSULATION PACKET HEADER						
PACKET VERSION NUMBER 3 bits	PROTOCOL ID 3 bits	LENGTH OF LENGTH 2 bits	USER DEFINED FIELD 0 or 4 bits	PROTOCOL ID EXTENSION 0 or 4 bits	CCSDS DEFINED FIELD 0 or 2 octets	PACKET LENGTH 0 to 4 octets
'111'	'XXX'	'00'	0 bits	0 bits	0 octets	0 octets
'111'	'XXX'	'01'	0 bits	0 bits	0 octets	1 octet
'111'	'XXX'	'10'	4 bits	4 bits	0 octets	2 octets
'111'	'XXX'	'11'	4 bits	4 bits	2 octets	4 octets

Рисунок 1.14 – Інкапсульований пакет

Тут основне поле довжина-довжини. Від 0-4 байт.

Кожне поле заголовку має свою важливу роль тому ігнорування деяких, призведе до неочікуваних результатів.

1.5 Висновки

У цьому розділі було проведено аналіз існуючих аналогів передавачів для супутникового зв'язку в X-band діапазоні, а також обґрунтовано актуальність подальшого розроблення такого передавача. Здобуті в цьому розділі знання є ключовими для розуміння контексту і обґрунтування необхідності розробки передавача з використанням технологій X-band.

Аналіз аналогів свідчить про те, що на сучасному ринку існують певні розробки, які використовують X-band діапазон для супутникового зв'язку. Однак існуючі аналоги мають обмеження, які включають в себе несуттєвий діапазон частот, обмежену потужність передачі, а також вимоги до антен і фізичних розмірів. Такі обмеження створюють певні труднощі для задоволення потреб сучасного супутникового зв'язку.

З огляду на зазначені обмеження із існуючими аналогами і швидко зростаючу потребу у більш потужних та універсальних засобах передачі в X-band діапазоні.

Актуальність цього проекту полягає в тому, що він відповідає сучасним вимогам до надійності і продуктивності супутникового зв'язку та відкриває нові

можливості для використання X-band діапазону в різних сферах, включаючи наукові дослідження, комерційний зв'язок і оборонні системи.

2 РОЗРОБКА ПЕРЕДАВАЧА КОСМІЧНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

У цьому розділі була проведена розробка моделі передавача супутникового зв'язку в X-band діапазоні. Модель була розроблена з урахуванням вимог до потужності передачі, діапазону частот, антен і інших ключових характеристик. Проведені дослідження та розробка моделі сприяли досягненню наступних важливих результатів:

1) Розробка функціональної моделі: Була створена функціональна модель передавача супутникового зв'язку, яка включає в себе основні елементи і блоки обробки сигналу.

2) Аналіз ключових параметрів: Був проведений детальний аналіз ключових параметрів, включаючи потужність передачі, частотний діапазон, антени та інші характеристики, які впливають на ефективність передавача.

3) Валідація моделі: Проведені експерименти та валідація моделі дозволили встановити, що розроблена модель відповідає основним вимогам та може бути використана для подальших досліджень.

Результати розділу 2 підкреслюють важливість розробки моделі передавача супутникового зв'язку в X-band діапазоні. Ця модель є ключовою для подальших досліджень та розробки сучасних передавачів, які відповідають вимогам сучасного супутникового зв'язку.

2.1 Розробка структурної схеми

У цьому розділі надається детальний опис структурної схеми розробленого передавача супутникового зв'язку в X-band діапазоні. Структурна схема визначає ключові компоненти та їх взаємозв'язки для забезпечення ефективної передачі сигналів у визначеному діапазоні частот.

Розглядаючи структурну схему передавача супутникового зв'язку, можна визначити її ключові компоненти та їх взаємозв'язки. Вивчення цієї схеми є важливим для розуміння принципів роботи передавача та його здатності виконувати вимоги сучасних стандартів супутникового зв'язку в X-band діапазоні.

2.1.1 Блок цифрового формування сигналу

Структурна схема передавача включає блок обробки сигналу, який відповідає за підготовку для подальшої передачі. Цей блок включає в себе FPGA який буде формувати вихідний сигнал згідно поставленої задачі.

В FPGA входить декілька структурних елементів таких як Stream forming, RC, Interleaving, LDPC control, M-PSK modulator, ЦФ RC.

Згідно технічної документації стандарту CCSDS [1] можна проаналізувати кожен структурний елемент.

Опис структурних елементів:

1) *Stream forming*

Stream Forming - це метод в радіотехніці та передавальних системах, який використовується для комбінування (чи згортання) даних або символів з різних джерел в один потік даних для передачі по каналу зв'язку. Це особливо корисно в сучасних бездротових комунікаційних системах, де ефективність передачі даних є критичною.

Stream Forming може бути використане для об'єднання кількох сигналів унікальних кодів (або символів) для передачі через один канал зв'язку, збільшуючи тим самим пропускну здатність каналу та поліпшуючи ефективність передачі даних. Це може бути важливою стратегією для забезпечення оптимального використання спектру та підвищення надійності передавання сигналів в умовах обмеженого спектру або шумів.

Під час Stream Forming кожен сигнал (або символ) від джерела даних представляється унікальним кодом або символом, і потім ці коди/символи комбінуються в один потік даних для передачі через канал зв'язку. При отриманні цього потоку на приймачі відбувається процес декодування, де вихідний потік розбивається на окремі сигнали/символи, які відповідають вихідним джерелам даних.

2) *Reed-Solomon code*

Коди Ріда-Соломона (Reed-Solomon) є видом циклічних кодів, які використовуються для корекції помилок у передачі даних через ненадійні канали

зв'язку, такі як цифрові телекомунікації, зберігання даних на носіях, таких як CD, DVD, а також в бездротових та супутникових зв'язках.

Ці коди особливо ефективні в умовах передачі даних, де можлива велика кількість помилок, наприклад, при передачі даних на великі відстані або через канали з високим рівнем шуму чи перешкод.

Однією з особливостей кодів Ріда-Соломона є їхні можливості корекції помилок. Вони можуть виявляти і виправляти помилки в переданих даних, навіть якщо кілька бітів відомих даних втрачені чи зіпсовані під час передачі. Це робить їх особливо корисними в системах передачі даних, де важлива надійність передачі.

Коди Ріда-Соломона використовуються в багатьох різних застосунках, включаючи комунікаційні системи, зберігання даних на носіях, канали передачі даних з великим рівнем шуму та інші сфери, де надійність передачі даних має високе значення. [2]

3) *Interleaving*

Інтерлівінг - це техніка, що використовується для перемішування частин інформації перед їхнім кодуванням або передачею. Це робить дані більш стійкими до помилок та сприяє кращій корекції помилок на стороні отримувача.

Під час інтерлівінгу вхідні дані розділяються на блоки або частини, і ці блоки розміщуються у специфічному порядку або зсуві, перш ніж вони будуть кодовані або передані. Інтерлівінг може бути здійснений у різних формах, таких як блочний, символний чи бітовий.

Основна мета інтерлівінгу - знизити вплив великих груп помилок на приймання даних. Коли дані передаються через канали з великою ймовірністю помилок (такі як бездротові канали чи канали із шумом), помилки можуть бути груповими або концентрованими у певних ділянках даних. Інтерлівінг розсіює ці помилки по всьому потоку даних, що дозволяє більш ефективно виявляти та виправляти помилки при прийманні.

Ця техніка широко використовується у різних системах передачі даних, таких як бездротові комунікації, супутникові зв'язки, цифрові передачі і зберігання даних.

4) LDPC

Коди з низькою щільністю перевірки паритету (LDPC) - це клас ефективних лінійних блочних кодів помилок, які використовуються для виправлення та виявлення помилок при передачі даних через шумні або збурені канали зв'язку.

Основна ідея LDPC полягає в застосуванні розріджених матриць перевірки паритету. Ці матриці мають велику розмірність, але велика більшість елементів у них є нулями. Вони використовуються для кодування інформації шляхом введення перевірки паритету в набір даних, які потім відправляються через канал зв'язку.

Один з основних переваг LDPC-кодів - їх висока корекційна спроможність та відносно низька складність декодування. Вони здатні досягати результатів, близьких до оптимальних за алгоритмічною складністю декодування.

Ці коди застосовуються у різних сферах, включаючи цифрові телекомунікаційні системи, супутниковий зв'язок, бездротові комунікації, жорсткі диски, оптичні зв'язки тощо. LDPC-коди стали популярними через їхню високу ефективність та можливість застосування в різноманітних областях передачі та збереження даних.

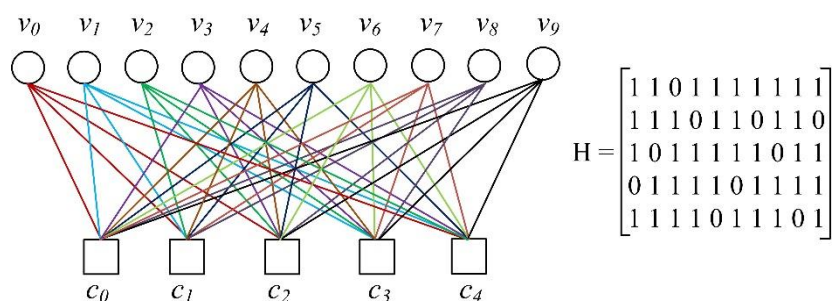


Рисунок 2.1 – Приклад формування LDPC [3]

5) M-PSK Modulator

M-PSK (M-ary Phase Shift Keying) є методом модуляції сигналу, де фаза сигналу використовується для кодування символів. У модуляції M-PSK існують різні значення фази для кожного символу, які можуть бути розміщені рівномірно на колі у фазовій діаграмі.

Основні компоненти M-PSK модулятора включають:

- Блок генерації символів: Генерує послідовність символів, які потрібно передати.

- Кодер: Перетворює послідовність символів на фазові значення, що відповідають кожному символу.
- Фазовий модулятор: Застосовує фазовий зсув до сигналу для кодування символів, передаючи їх через відповідний канал зв'язку.
- Фільтр та підсилювач: Фільтр та підсилювач можуть бути використані для підсилення сигналу та підготовки його до передачі через канал зв'язку.
- Модуляційна схема: У випадку M-PSK, схема модуляції використовується для встановлення фазових значень для кожного символу згідно визначеного набору фаз.
- Модуляційний інтерфейс: Це інтерфейс, через який передається модульований сигнал до каналу зв'язку.

M-PSK може бути використана в багатьох радіотехнічних системах для передачі даних, особливо у телекомунікаціях, де ефективність каналу та спектральна ефективність є важливими факторами.

б) Цифровий фільтр припіднятого косинусу

Цифровий фільтр припіднятого косинусу (Raised Cosine Filter, ФПК) є цифровим сигнальним фільтром, який використовується для передачі цифрових даних через канали з обмеженою пропускну здатністю (наприклад, у каналах з обмеженням спектра). Цей тип фільтрації широко застосовується у системах передачі даних для зменшення міжсимвольного перешкодження (Inter-Symbol Interference - ISI) та сприяє кращій стійкості до шумів та спотворень сигналу.

Фільтр припіднятого косинусу має особливу форму функції відгуку на вхідний сигнал, яка дозволяє уникнути проблем, пов'язаних з ISI. Він спрямований на обмеження спектра сигналу передачі, зменшення взаємного впливу символів на кожному кроці передачі та забезпечення кращої зручності декодування.

Фільтр припіднятого косинусу використовує косинусної форми для створення передавального сигналу з меншими перехресними між символами. Його параметри включають коефіцієнт припіднятості, який контролює рівень урізання сигналу, і фактор форми, що впливає на ширину спектру сигналу.

Цей фільтр є важливою складовою при проектуванні систем цифрової комунікації, оскільки дозволяє ефективніше передавати та отримувати цифрові дані через обмежені канали передачі.

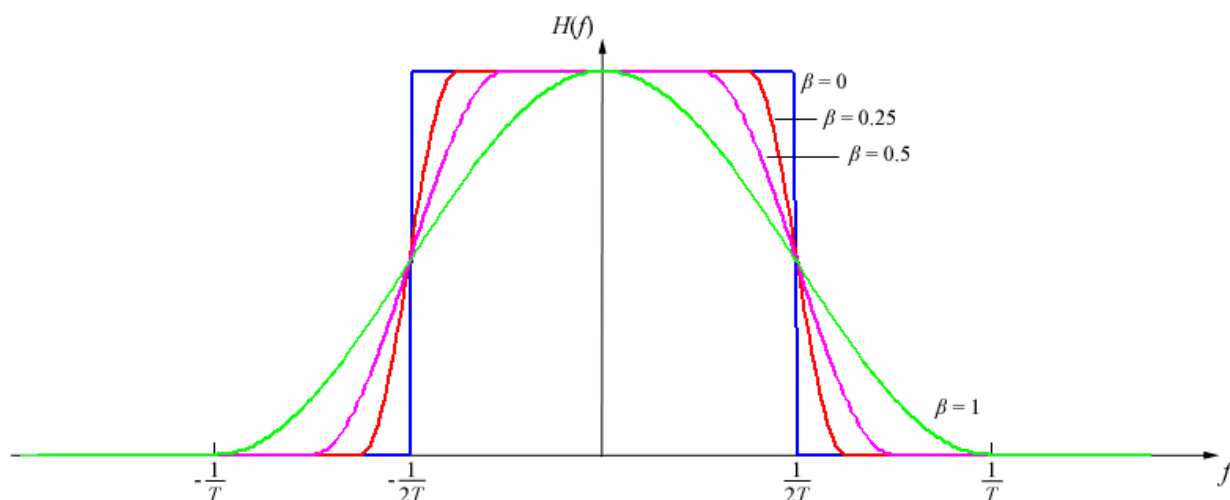


Рисунок 2.2 – АЧХ ФПК при різних коефіцієнтах згладжування [4]

2.1.2 Розрахунок Link Budget

Цей розділ присвячено розрахунку бюджету ланцюга зв'язку для передавача в X-band діапазоні, що включає в себе аналіз різних параметрів, що впливають на передачу сигналу в космічних та земних умовах.

Огляд та цілі

Перед початком розрахунків бюджету ланцюга зв'язку важливо оглянути основні компоненти, які впливають на передачу сигналу через космічний простір. Ці компоненти включають потужність передавача, антенну систему, ефективність збору та прийому сигналу, атмосферні втрати, затухання та шуми.

Ціллю цього розділу є визначення мінімальних параметрів та характеристик для забезпечення оптимальної передачі сигналу в X-band діапазоні з урахуванням всіх можливих перешкод і факторів.

Методика розрахунку

В цьому розділі будуть представлені методики розрахунку бюджету ланцюга зв'язку, включаючи визначення потужності сигналу, розрахунок атмосферних втрат та впливу шуму на сигнал, оцінку затухання та втрат сигналу на відстані.

Важливість розділу

Визначення бюджету ланцюга зв'язку відіграє критичну роль у забезпеченні надійної передачі сигналу в космосі. Правильні розрахунки дають змогу визначити оптимальні параметри передавача та антенної системи, необхідні для забезпечення ефективної комунікації.

Розрахунок відношення Сигнал/Шум на вході приймача.

Рівень бітових помилок на виході демодулятор згідно з ТЗ:

$$BER = 10^{-4}$$

Згідно графіку відношення рисунок 2.3:

$$\frac{E_b}{N_0} = 8.5 \text{ дБ} = 7.08$$

Швидкість передачі даних згідно ТЗ:

$$f_{bit} = 100 \text{ Mbit/s}$$

Спектральна ефективність для QPSK як для найгіршого випадку по потужності:

$$\gamma_{QPSK} = 2$$

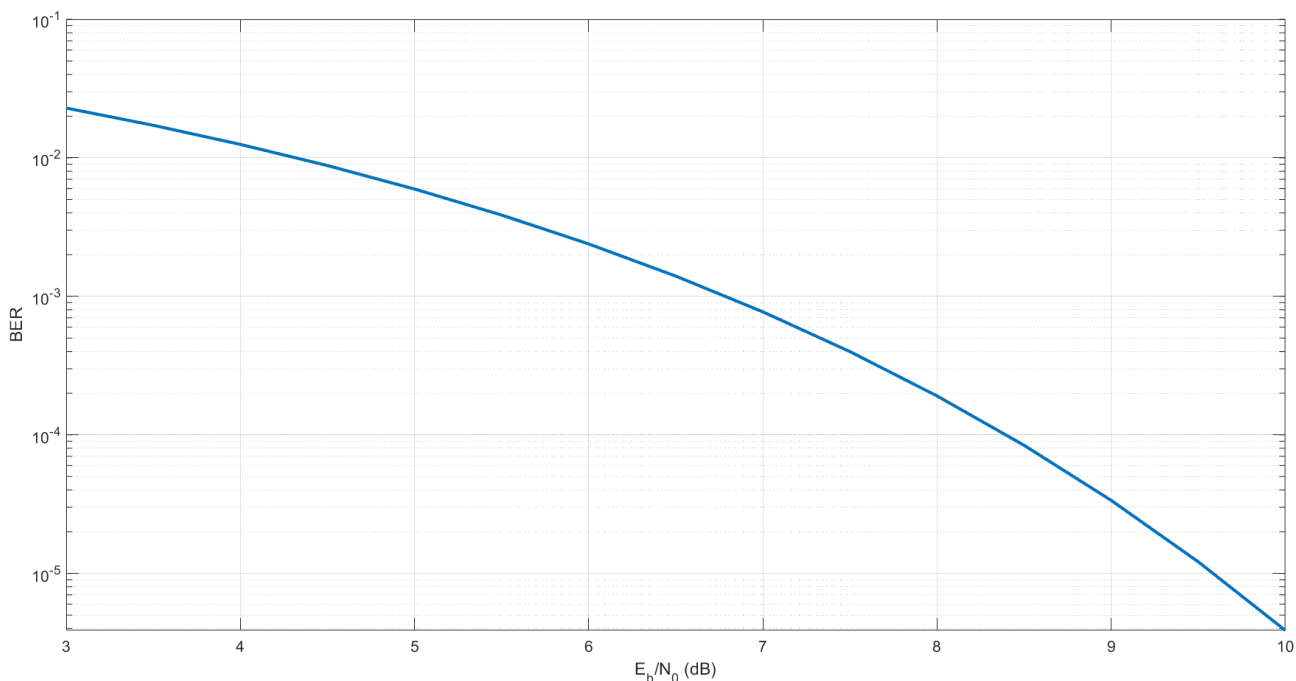


Рисунок 2.3 – Графік залежності Bit Error Rate (BER) від відношення несучої до спектрального шуму при QPSK

Для розрахунку полоси пропускання потрібно взяти коефіцієнт запаса який дасть змогу зменшити вплив похибок.

Коефіцієнт запаса:

$$k = 1.2$$

Взаємозв'язок швидкості передачі даних та смуги пропускання каналу при заданій модуляції описується формулою:

$$f_{bit} = \frac{B}{\gamma_{QPSK}} \cdot k \quad (2.1)$$

З формули (2.1) необхідне значення смуги пропускання:

$$B = \frac{f_{bit}}{\gamma_{QPSK}} \cdot k = \frac{120}{2} = 60 \text{ MHz} \quad (2.2)$$

Наступним кроком буде знаходження значення SNR(Signal Noise Ratio) для забезпечення необхідної ймовірності помилки при модуляції QPSK:

$$SNR = \frac{P_c}{P_{ш}} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{f_{bit}}{B} = 7.08 \cdot \frac{100}{60} = 11.8 = 10.7 \text{ дБ} \quad (2.3)$$

Формула розрахунку потужності шуму:

$$P_{ш} = k \cdot T_0 \cdot B \quad (2.4)$$

k – стала Больцмана

T_0 – шумова температура, К

Шумову температуру оберемо як кімнатну температуру 20° С що дорівнює 293.15° К

$$P_{ш} = 1.380649 \cdot 10^{-23} \cdot 293.15 \cdot 30 = 1.214 \cdot 10^{-13} = -129.2 \text{ дБВт}$$

Потужність сигналу на вході приймача, для забезпечення необхідного рівня.

$$P_c = SNR \cdot P_{ш} \quad (2.5)$$

$$P_c = -129.2 \text{ дБВт} + 10.7 \text{ дБ} = -118 \text{ дБВт} = 1.41 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$$

Формула розрахунку затухання в вакуумі:

$$P_c = P_{п} \cdot G_{ап} \cdot G_{апр} \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \cdot L_{atm} \quad (2.6)$$

$$P_c = P_{п} + G_{ап} + G_{апр} + 20 \lg(\lambda) - 20 \lg(4\pi R) + L_{atm}$$

$P_{п}$ – Потужність передавача, Вт

P_c – Потужність приймача, Вт

G_{Π} – Коефіцієнт підсилення передавальної антени

G_{ap} – Коефіцієнт підсилення приймальної антени

λ – довжина хвилі

R – відстань між антенами

L_{atm} – затухання сигналу в атмосфері

G_{ap} , $G_{ap\pi}$ візьмемо значення з вимог ТЗ до коефіцієнтів підсилення антени.

$$G_{ap} = 20 \text{ дБ}$$

$$G_{ap\pi} = 50 \text{ дБ}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{8.4 \cdot 10^9} = 0.03571 \text{ м}$$

Відстань R між супутником та прийомною антеною, згідно ТЗ, 800 км для запасу та можливості зв'язку під кутом візьмемо відстань 1000 км, Таким чином потужність сигналу на виході передавача штучного супутника повинна бути:

$$P_{\Pi} = P_c - G_{ap} - G_{ap\pi} - 20 \lg(\lambda) + 20 \lg(4\pi R) + L_{atm}$$

$$P_{\Pi} = -118 - 20 - 50 + 30 + 142 + 16 = 0 \text{ дБВт}$$

$$P_{\Pi} = 1 \text{ Вт}$$

Отже з розрахунків видно що на вхід антени потрібно подати сигнал потужністю 0 дБВт для забезпечення мінімальних вимог на приймальній стороні.

2.1.3 Блок формування проміжної частоти передачі сигналу

Також блок передачі сигналу, який відповідає за підготовку для подальшої передачі. Цей блок включає в себе дві мікросхеми ЦАП та модулятор проміжної частоти на 2.4 ГГц, гетеродин (Local Oscillator), смуговий фільтр, підсилювач та антену.

Принцип роботи мікросхеми, на вхід подається два цифрові сигнали IQ які переходять на проміжну частоту, модулюються та переходять в аналогову форму.

Наступним кроком сигнал проміжної частоти переноситься на потрібну частоту за допомогою гетеродинна, фільтрується, підсилюється та передається на антену.

На рисунку 2.4 наведено структурну схему передавача який здатен обробити сигнал та направити його на передавальну антену.

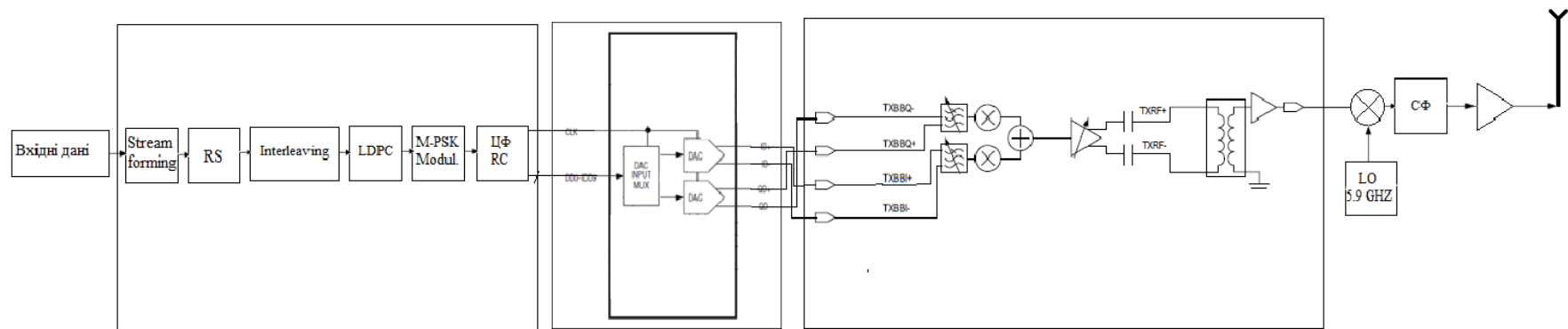


Рисунок 2.4 – Структурна схема передавача

2.1.4 RF Модулятор

В цьому розділі буде описані конкретні аспекти побудови RF модулятора та його функціонування. Наприклад методи модуляції, характеристики компонентів, компоненти підсилення та фільтрації сигналу, а також можливі шляхи управління параметрами сигналу для досягнення певних вимог щодо передачі даних. Зі структурної схеми будуть розглянуті такі компоненти як: смуговий фільтр, підсилювач, суматор, генератор SHF діапазону та антену.

Частотний генератор – використовується для генерування частоти яка в подальшому використовується для сумування з інформаційним сигналом, наприклад SZHUASHI YJM5820B.

Суматор частоти (Frequency Mixer або Frequency Summation) - це електронний пристрій, що використовується для комбінування або сумування двох або більше вхідних сигналів з різними частотами для створення нового вихідного сигналу. Головна функція суматора частоти полягає у виробленні сигналу, частота якого дорівнює сумі або різниці частот вхідних сигналів.

Цей пристрій застосовується в різних галузях, зокрема в бездротовому зв'язку, радіозв'язку, радіолокації, медичному обладнанні та багатьох інших технологічних сферах. Суматори частоти часто використовуються в сучасних радіоприймачах, передавачах та радіосистемах для обробки сигналів і перемикання між різними частотами для отримання потрібного сигналу на виході.

Смуговий фільтр - це пристрій або система, яка пропускає чи блокує певний діапазон частот у сигналі. Використовується для виділення або підсилення певних частот у сигналі, а також для приглушення частот, які знаходяться поза визначеним діапазоном.

Його основна функція - це відсів небажаних частот, забезпечення передачі сигналу у визначеному діапазоні або виділення певних частот для подальшої обробки. Це може бути досягнуто за допомогою різних методів фільтрації, таких як активна або пасивна фільтрація, ізоляція частот, амплітудна або частотна селекція тощо.

Смугові фільтри використовуються в різних галузях, таких як телекомунікації, радіо, аудіо, медична техніка, радіолокація, супутникові зв'язки та багато інших, де потрібно обробляти чи передавати сигнали в певних частотних діапазонах.

В дипломній роботі використовується смуговий фільтр на частотах 8.4 GHz зі смугою пропускання вказаною в ТЗ. Також смуговим фільтром відсікається дзеркальна частота яка з'являється в наслідок переносу частоти на робочий діапазон.

Підсилювач високої частоти - призначений для підсилення або посилення сигналів високої частоти. Він зазвичай використовується для підсилення радіочастотних сигналів (RF) або сигналів мікрохвильового діапазону.

Зазвичай підсилювачі високої частоти мають велику смугу пропускання і високу ефективність на високих частотах, що дозволяє їм ефективно підсилювати сигнали, які знаходяться в цих діапазонах. Крім того, вони можуть використовуватися як одиничні пристрої або як частина складних систем, що включають кілька підсилювачів і фільтрів для досягнення потрібних параметрів сигналу.

Анени – для X-діапазону існують різноманітні типи антен, кожен з яких має свої переваги і можливості залежно від конкретного застосування та вимог до сигналу. Найпоширенішими є фазовані антенні решітки, параболічні антени, патч антени, рупорні антени.

2.2 Розробка схеми електричної принципової блоку формування ПЧ

Цей розділ присвячений детальній розробці електричної принципової схеми розробленого передавача супутникового зв'язку в X-band діапазоні. Електрична принципова схема визначає всі електричні компоненти, їх зв'язки та функції у системі.

Для обробки вхідних даних було вирішено обрати ПЛІС LPC4337JBD144E який має достатню обчислювальну потужність для обробки сигналу. LPC435X — це мікроконтролери на основі ARM Cortex-M4 із модулем з плаваючою точкою (FPU) для вбудованих додатків, які включають співпроцесор ARM Cortex-M0, до 1

МБ флеш-пам'яті та 136 КБ вбудованої пам'яті SRAM, 16 КБ пам'яті EEPROM, два високошвидкісні контролери USB, Ethernet, РК-дисплей, контролер зовнішньої пам'яті, інтерфейс флеш-пам'яті Quad SPI (SPIFI), який підтримує виконання на місці, периферійні пристрої з розширеною конфігурацією, такі як таймер із можливістю налаштування стану (SCTimer/PWM) і послідовний порт загального призначення Інтерфейс вводу/виводу (SGPIO) і кілька цифрових і аналогових периферійних пристроїв. LPC435X_3X_2X_1X працює на частотах процесора до 204 МГц.

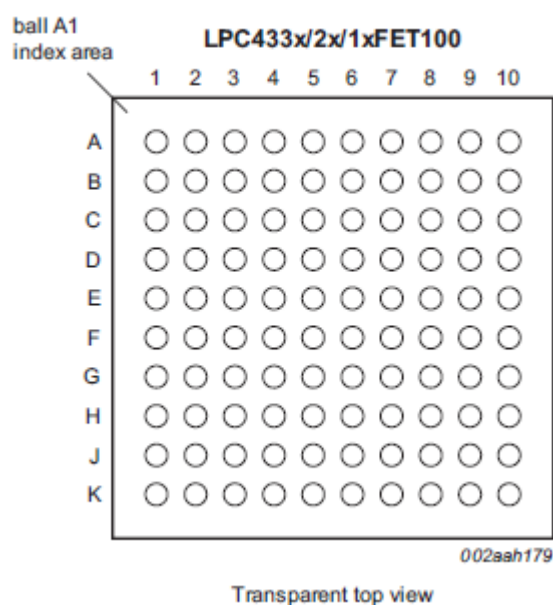


Рисунок 2.5 – Розпінування мікросхеми LPC4337JBD144E

Наступним кроком я обрав мікросхему MAX2837. Радіочастотний трансивер MAX2837 з нульовою ПЧ прямого перетворення розроблено спеціально для бездротового зв'язку 2,3–2,7 ГГц широкосмугові системи. MAX2837 повністю інтегрується усі схеми, необхідні для впровадження радіочастотного трансивера функція, що забезпечує тракт прийому RF; і канал передачі основної смуги частот, VCO, синтезатор частоти, кварцевий генератор і інтерфейс основної смуги/контролю. В схемі задіяні порти вводу та виводу для передачі сигналу під номером 45,43,10,11. Живлення мікросхеми знаходиться в діапазоні від 2.7 В до 3.6 В що в свою чергу зменшує потребу в потужних блоках живлення.

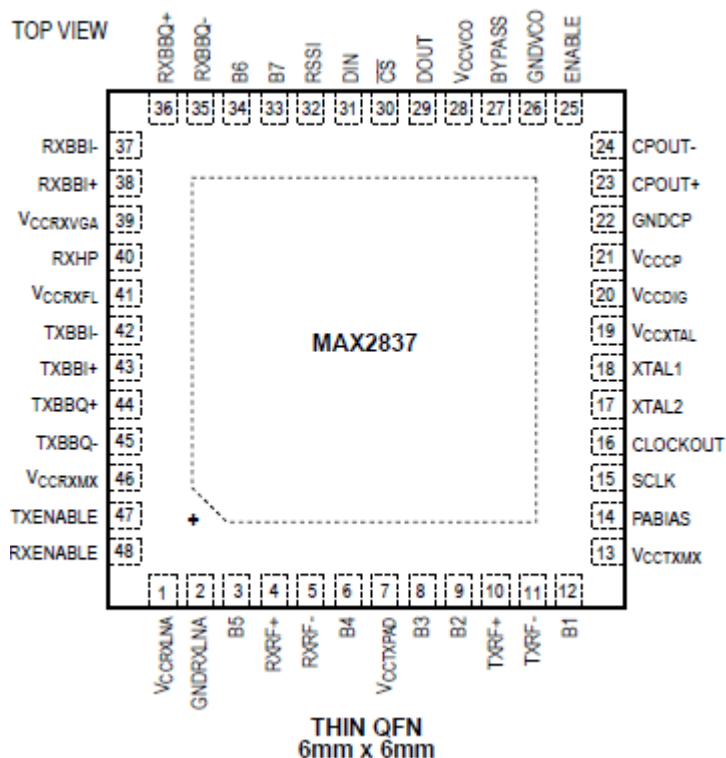


Рисунок 2.6 – Розпінування мікросхеми MAX2837

На рисунку 2.7 представлена структура чіпу MAX2837. З огляду структурних елементів бачимо що передавальний каскад має в собі фільтри на які подається IQ дані. Після цього сигнал модулюється. В кінці, модульований сигнал підсилюється та подається на вихід мікросхеми.

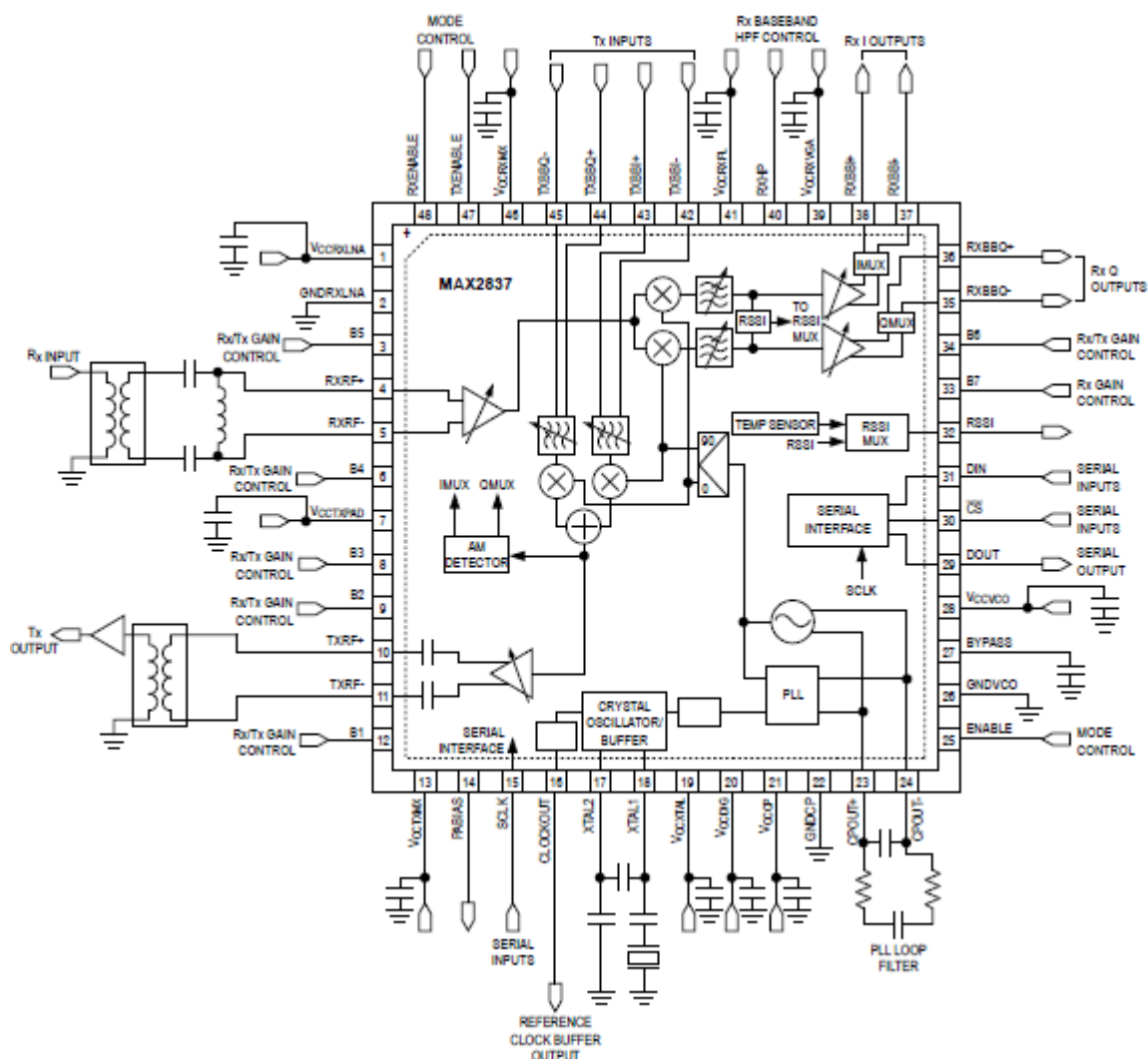


Рисунок 2.7 – Структура чіпу MAX2837

MAX5864 з наднизьким енергоспоживанням, високоінтегрованим аналоговим інтерфейсом ідеально підходить для портативного комунікаційного обладнання, такого як телефони, ком'ютери, WLAN і бездротові термінали 3G. MAX5864 інтегрує подвійний 8-розрядний прийомний АЦП і подвійний 10-розрядний передавальний ЦАП, забезпечуючи при цьому найвищу динамічну продуктивність при наднизькій потужності. Аналогові вхідні підсилювачі I-Q АЦП повністю диференціальні та приймають повномасштабні сигнали 1VP-P. Типове узгодження фази каналу I-Q становить $\pm 0,1^\circ$, а узгодження амплітуди — $\pm 0,03$ дБ.

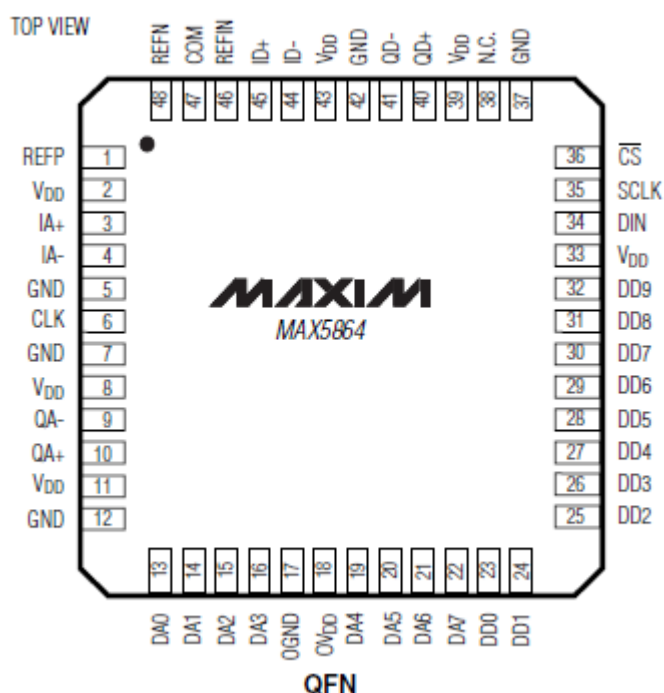


Рисунок 2.7 – Розпінування мікросхеми MAX5864

На рисунку 2.8 представлена структура чіпу MAX5864 з якої видно що мікросхема може працювати в двонаправленому режимі АЦП та ЦАП. На вхід подається сигнал CLK для синхронізування та шина даних з ПЛІС. Дана структура задовольняє потреби висунуті в технічному завданні. MAX5864 інтегрує подвійний 8-розрядний прийомний АЦП і подвійний 10-розрядний передавальний ЦАП, забезпечуючи при цьому наднизьку потужність і найвищу динамічну продуктивність зі швидкістю перетворення 22 Мб/с. Підсилювачі аналогового входу АЦП повністю диференціальні та приймають повномасштабні сигнали 1VP-P. Аналогові виходи ЦАП є повністю диференціальними з повномасштабним діапазоном вихідного сигналу ± 400 мВ при загальному режимі 1,4 В.

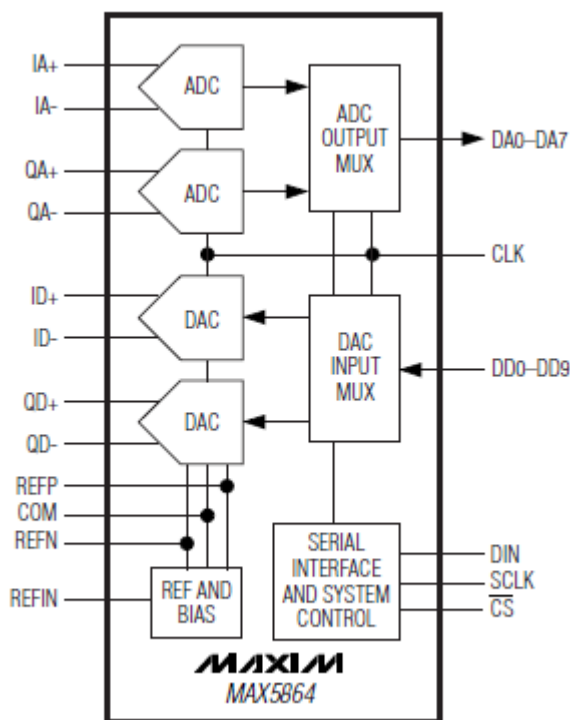


Рисунок 2.8 – Розпінування мікросхеми MAX5864

На основі цих компонентів та документація по елементам була розроблена схема електрична принципова додаток Б.

2.3 Висновки

У розділі 2.1 "Розробка моделі" була проведена ретельна робота над визначенням параметрів та характеристик майбутнього передавача супутникового зв'язку в X-band діапазоні. Також були розглянуті мікросхеми які можуть бути застосовані в проектуванні такого передавача по параметрам з ТЗ. Розглянуті аспекти включають в себе генерацію сигналу, його модуляцію, управління потужністю та антенну систему.

В результаті цього дослідження були визначені ключові елементи системи та їх параметри, необхідні для досягнення високої ефективності передачі сигналу. Модель враховує високочастотні особливості X-band діапазону, забезпечуючи відповідність між частотою сигналу та характеристиками антени.

Отже, цей розділ визначає теоретичний фундамент для реалізації фізичного пристрою, який буде досліджено та вдосконалено в подальших розділах.

3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ КАНАЛУ КОСМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ В САПР MATLAB

Даний розділ включає в себе аналіз, математичні обчислення та розробку програмного забезпечення, спрямованих на вивчення та оцінку характеристик передавання сигналу через космічний канал. Розглядається процес розрахунків параметрів, таких як швидкість передачі даних, шум та спектральні характеристики сигналу, які впливають на ефективність та надійність передачі інформації через канали з низькоорбітальних космічних апаратів для оцінки його параметрів та ефективності в умовах космічного середовища.

3.1 Розробка програмного забезпечення для оцінки ймовірності бітових помилок

Схему модуляції квадратурного зміщення фаз (QPSK) для генерації та прийому сигналу, а також схему кодування з випадковими конволюційними кодами з відношенням 1/2 для кодування каналу. Цей приклад показує весь ланцюжок від початку до кінця, який також може використовуватися для схем кодування каналу: коди Ріда-Соломона (RS) та конкатеновані коди. Для конволюційних та конкатенованих кодів цей приклад підтримує коефіцієнти 1/2 та 2/3, а також формат модуляції імпульсного коду (PCM). Підтримувані схеми модуляції в цьому прикладі - це бінарне зміщення фази (BPSK) та QPSK.

```
seeConstellation = true;      % перемикач візуалізації сузір'я
channelCoding = "convolutional"; % Схема кодування каналів
transferFrameLength = 1115;   % У байтах, що відповідають
modScheme = "QPSK";          % Схема модуляції
alpha = 0.35;                 % Коефіцієнт спаду коріння косинусного фільтра
sps = 8;                      % Відліки на символ
```

Встановлення частоти, яка використовується для генерації сигналу, і значення радіочастотного погіршення.

```
fSym = 2e6; % Символ рейт
cfo = 2e5;  % Гц
```

Ініціалізація відношення енергії на біт до потужності шуму (E_b/N_0), яке використовується для обчислення SNR за допомогою системних параметрів.

```
EbN0 = 10;
```

Встановлення параметрів встановлено малі значення, щоб отримати швидкі результати. Збільште значення цих параметрів, щоб отримати більш гладку криву BER.

```
maxNumErrors = 1e2; % Зупинка після максимуму помилок
maxNumBits = 1e5;   % Зупинка після максимуму бітів
maxFramesLost = 1e2; % Зупинка після максимуму втрати фреймів
```

Створення генератора сигналів CCSDS із цими параметрами за допомогою системного об'єкта `ccsdsTMWaveformGenerator`, та відображення властивостей об'єкта:

```
tmWaveGen = ccsdsTMWaveformGenerator("ChannelCoding",channelCoding, ...
    "NumBytesInTransferFrame",transferFrameLength, ...
    "Modulation",modScheme, ...
    "RolloffFactor",alpha, ...
    "SamplesPerSymbol",sps);
disp(tmWaveGen)
```

`ccsdsTMWaveformGenerator` налаштування:

```
WaveformSource: "synchronization and channel coding"
NumBytesInTransferFrame: 1115
HasRandomizer: true
HasASM: true
PCMFormat: "NRZ-L"

Channel coding
ChannelCoding: "convolutional"
ConvolutionalCodeRate: "1/2"
InvertCCPath2: true

Digital modulation and filter
Modulation: "QPSK"
PulseShapingFilter: "root raised cosine"
RolloffFactor: 0.3500
FilterSpanInSymbols: 10
SamplesPerSymbol: 8
```

Оскільки потужність сигналу масштабується до одиниці під час введення шуму, то Значення SNR має бути зменшено на коефіцієнт SPS, який описує кількість семплів сигналу на один символ. Розрахунок відношення сигнал/шум виконується наступним кодом:

```
rate = tmWaveGen.info.ActualCodeRate;
M = tmWaveGen.info.NumBitsPerSymbol;
numBitsInTF = tmWaveGen.NumInputBits;
snr = EbN0 + 10*log10(rate) + ...
    10*log10(M) - 10*log10(sps); %
```

```

                                %
numSNR = length(snr);
ber = zeros(numSNR,1);          % Задання BER
bercalc = comm.ErrorRate;

```

Фільтр припіднятого косинуса для формування спектральних характеристик сигналу, отримується за допомогою системного об'єкта `comm.RaisedCosineReceiveFilter`.

```

b = rcosdesign(alpha,tmWaveGen.FilterSpanInSymbols,sps);
Gain = sum(b);
rxFilterDecimationFactor = sps/2;
rxfilter = comm.RaisedCosineReceiveFilter( ...
    "DecimationFactor",rxFilterDecimationFactor, ...
    "InputSamplesPerSymbol",sps, ...
    "RolloffFactor",alpha, ...
    "Gain",Gain);

```

Моделювання зміщення частоти та фази за допомогою системного об'єкта `comm.PhaseFrequencyOffset`. Компенсування зміщення частоти та фази на приймачі в два етапи.

Компенсування грубого зміщення частоти за допомогою системного об'єкта `comm.CoarseFrequencyCompensator`.

Компенсування тонкого зсуву частоти та зсуву фази за допомогою системного об'єкта `comm.CarrierSynchronizer`.

```

phaseOffset = pi/8;
fqyoffsetobj = comm.PhaseFrequencyOffset( ...
    "FrequencyOffset",cfo, ...
    "PhaseOffset",phaseOffset, ...
    "SampleRate",sps*fSym);
coarseFreqSync = comm.CoarseFrequencyCompensator( ...
    "Modulation",modScheme, ...
    "FrequencyResolution",100, ...
    "SampleRate",sps*fSym);
fineFreqSync = comm.CarrierSynchronizer("DampingFactor",1/sqrt(2), ...
    "NormalizedLoopBandwidth",0.0007, ...
    "SamplesPerSymbol",1, ...
    "Modulation",modScheme);

```

Створення змінного об'єкта дробової затримки за допомогою системного об'єкта `dsp.VariableFractionalDelay`, який вводить часткову затримку в передану форму сигналу. Створіть об'єкт синхронізації символів за допомогою системного об'єкта `comm.SymbolSynchronizer`, який виконує синхронізацію символів.

```

varDelay = dsp.VariableFractionalDelay("InterpolationMethod","Farrow");
fixedDelayVal = 10.2;
Kp = 1/(pi*(1-((alpha^2)/4)))*cos(pi*alpha/2);
symsyncobj = comm.SymbolSynchronizer( ...
    "DampingFactor",1/sqrt(2), ...
    "DetectorGain",Kp, ...
    "TimingErrorDetector","Gardner (non-data-aided)", ...
    "Modulation","PAM/PSK/QAM", ...
    "NormalizedLoopBandwidth",0.0001, ...
    "SamplesPerSymbol",sps/rxFILTERDecimationFactor);

```

Демодулювання та декодування отриманого сигналу за допомогою допоміжних файлів HelperCCSDSTMDemodulator і HelperCCSDSTMDecoder відповідно. Відображення властивостей отриманих об'єктів.

```

demodobj =
HelperCCSDSTMDemodulator("Modulation",modScheme,"ChannelCoding",channelCoding)
demodobj =
    HelperCCSDSTMDemodulator налаштування:

        Modulation: "QPSK"
        PCMFormat: "NRZ-L"
        ChannelCoding: "convolutional"

decoderobj = HelperCCSDSTMDecoder("ChannelCoding",channelCoding, ...
    "NumBytesInTransferFrame",transferFrameLength, ...
    "Modulation",modScheme)
decoderobj =
    HelperCCSDSTMDecoder with properties:

        ChannelCoding: "convolutional"
        HasRandomizer: true
        HasASM: true
        DisableFrameSynchronization: 0
        DisablePhaseAmbiguityResolution: 0
        NumBytesInTransferFrame: 1115
        ConvolutionalCodeRate: "1/2"
        ViterbiTraceBackDepth: 60
        ViterbiTrellis: [1x1 struct]
        ViterbiWordLength: 8
        Modulation: "QPSK"
        PCMFormat: "NRZ-L"

```

Створення об'єкту діаграми сузір'я за допомогою системного об'єкта comm.ConstellationDiagram, щоб візуалізувати, як розвивається сузір'я в міру зближення синхронізаторів.

```

costellationobj = comm.ConstellationDiagram; % Стандартний вид QPSK
if strcmp(modScheme,'BPSK')
    costellationobj.ReferenceConstellation = [1, -1]
end

```

Пошаговий алгоритм роботи

Щоб провести моделювання і оцінити BER системи CCSDS необхідно виконати такі дії.

- 1) Генерувати випадкові біти для формування TF.
- 2) Згенерувати сигнал, передавши TF через системний об'єкт `ccsdsTMWaveformGenerator`.
- 3) Ввести радіочастотні порушення, такі як CFO та затримка символу.
- 4) Додати AWGN до радіочастотного сигналу. Цей шумовий сигнал вважається отриманим сигналом.
- 5) Пропустити отриманий сигнал через грубу частотну корекцію, яка виконує початкову грубу синхронізацію несучої частоти. Груба оцінка частоти виконується за допомогою алгоритму "на основі ШПФ".
- 6) Використати узгоджений фільтр (косинусний фільтр) з тією ж конфігурацією, що застосована на кінці передавача. Оскільки модуль синхронізації символів працює з частотою дискретизації, яка є вищою за швидкість символів, вибірки комплексної основної смуги не знижуються до частоти символів після фільтрації. Це низька вибірка таким чином, що існує принаймні 2 вибірки на символ.
- 7) Виконати синхронізацію символів за допомогою детектора помилок синхронізації Гарднера (TED), щоб видалити зсув синхронізації, який присутній у сигналі.
- 8) Виконайти відстеження несучої частоти та фази за допомогою системного об'єкта `comm.CarrierSynchronizer`, який має фазовий автопідстроюваний цикл типу 2 (PLL). Цей системний об'єкт може відстежувати зсув стаціонарної несучої частоти. Об'єкт `System` також створює фазову неоднозначність, яку потім усуває модуль кадрової синхронізації.
- 9) Відобразити сузір'я після завершення синхронізації символів і несучої частоти. Спостерігайте, як сузір'я розвивається протягом кількох ітерацій.
- 10) Демодулювати отриманий сигнал і переконатись, що сигнал відповідає символній швидкості (тобто вибірка на символ дорівнює 1).

11) Виконати кадрову синхронізацію та канальне декодування, щоб вирішити фазову неоднозначність, синхронізувати кадр до початку ASM, а потім декодувати синхронізований кадр, щоб відновити TF.

```

numBitsForBER = 8; % детектування який фрейм синхронізований
numMessagesInBlock = 2^numBitsForBER;
for isnr = 1:numSNR
    rng default;
    reset(bercalc);
    berinfor = bercalc(int8(1), int8(1));
    tfidx = 1;
    numFramesLost = 0;
    prevdectfidx = 0;
    inputBuffer = zeros(numBitsInTF, 256,"int8");
    while((berinfo(2) < maxNumErrors) && ...
        (berinfo(3) < maxNumBits) && ...
        (numFramesLost < maxFramesLost))
        seed = randi([0 2^32-1],1,1); % Початковий код для повторюваної симуляції
        bits = int8(randi([0 1],numBitsInTF-numBitsForBER,1));
        msg = [de2bi(mod(tfidx-1,numMessagesInBlock),numBitsForBER,"left-
msb").';bits];
        inputBuffer(:,mod(tfidx-1,numMessagesInBlock)+1) = msg;
        tx = tmWaveGen(msg);

        cfoInroduced = fcyoffsetobj(tx);
        delayed = varDelay(cfoInroduced,fixedDelayVal); % Зміщення часу
        rx = awgn(delayed, snr(isnr),'measured',seed); % AWGN

        coarseSynced = coarseFreqSync(rx);
        filtered = rxfilter(coarseSynced);
        TimeSynced = symsyncobj(filtered);
        fineSynced = fineFreqSync(TimeSynced); % Відслідковування фази і частоти

        if seeConstellation
            costellationobj(fineSynced(1:1000));
        end

        demodData = demodobj(fineSynced); % Демодуляція
        decoded = decoderobj(demodData); % Фазова неоднозначність
        dectfidx = bi2de(double(decoded(1:8).'), ...
            "left-msb")+1; % значення перших 8 бітів
        if tfidx > 30
            if dectfidx - prevdectfidx ~= 1
                numFramesLost = numFramesLost + 1;
                disp(['Frame lost at tfidx: ' num2str(tfidx) ...
                    '. Total frames lost: ' num2str(numFramesLost)]);
            else
                berinfor = bercalc(inputBuffer(:,dectfidx),decoded);
                if nnz(inputBuffer(:,dectfidx)-decoded)
                    disp(['Errors occurred at tfidx: ' num2str(tfidx) ...

```

```

                                '. Num errors: ' num2str(nnz(inputBuffer(:,dectfidx) -
decoded)))])
                                end
                                end
                                end
                                prevdectfidx = dectfidx;

                                tfidx = tfidx + 1;
                                end
                                fprintf("\n");
                                currentBer = berinfo(1);
                                ber(isnr) = currentBer;
                                disp(['Eb/N0: ' num2str(EbN0(isnr)) '. BER: ' num2str(currentBer) ...
                                '. Num frames lost: ' num2str(numFramesLost)]);
                                reset(tmWaveGen);
                                reset(fqyoffsetobj);
                                reset(varDelay);
                                reset(coarseFreqSync);
                                reset(rxfilter);
                                reset(symsyncobj);
                                reset(fineFreqSync);
                                reset(demodobj);
                                reset(decoderobj);
                                end

```

3.2 Результати моделювання каналу зв'язку з низькоорбітальними космічними апаратами

На рисунку 3.1 зображена діаграма сигнального сузір'я яка відображає коректність змодельованого коду.

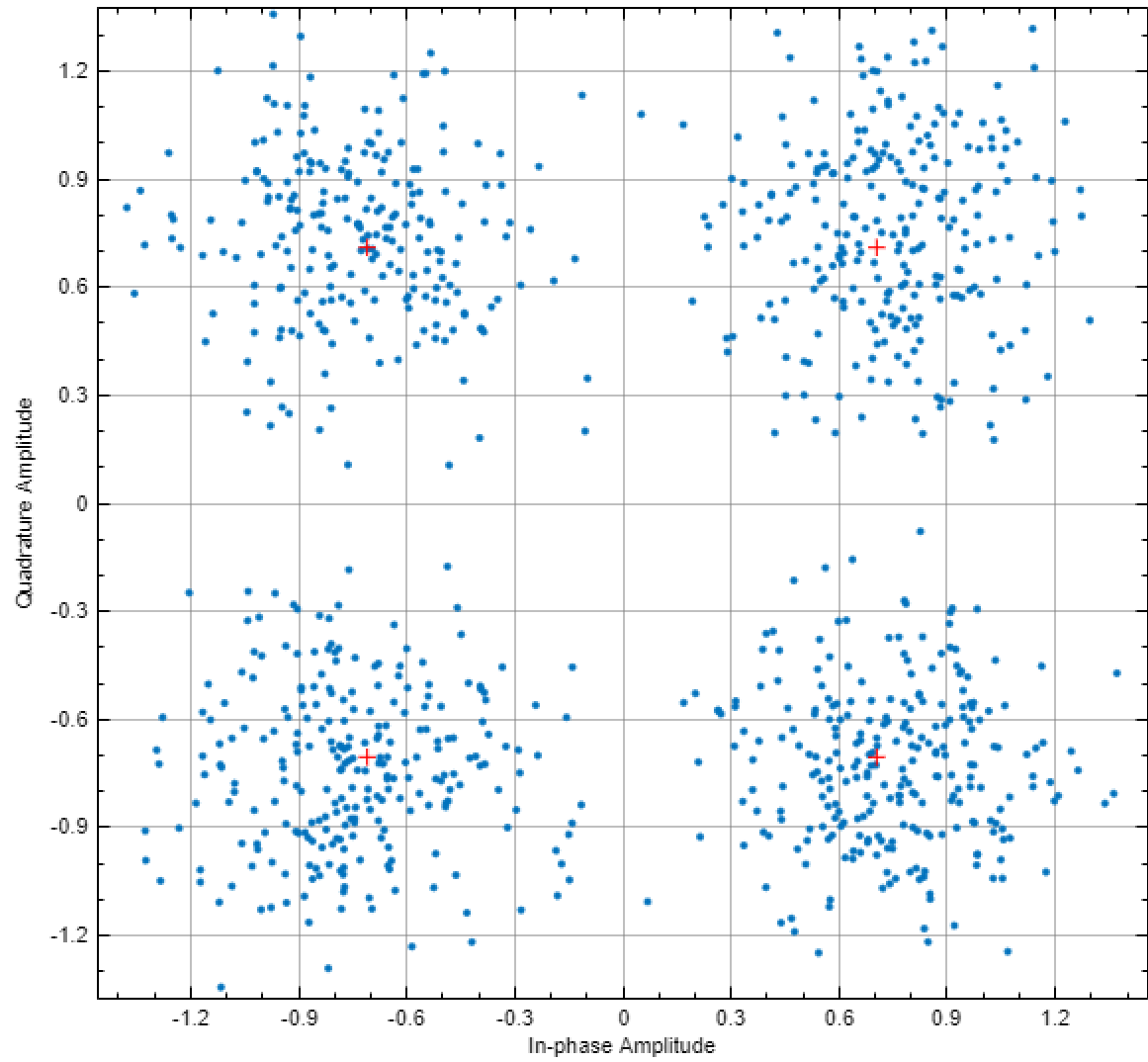


Рисунок 3.1 – Діаграма сигнального сузрі'я

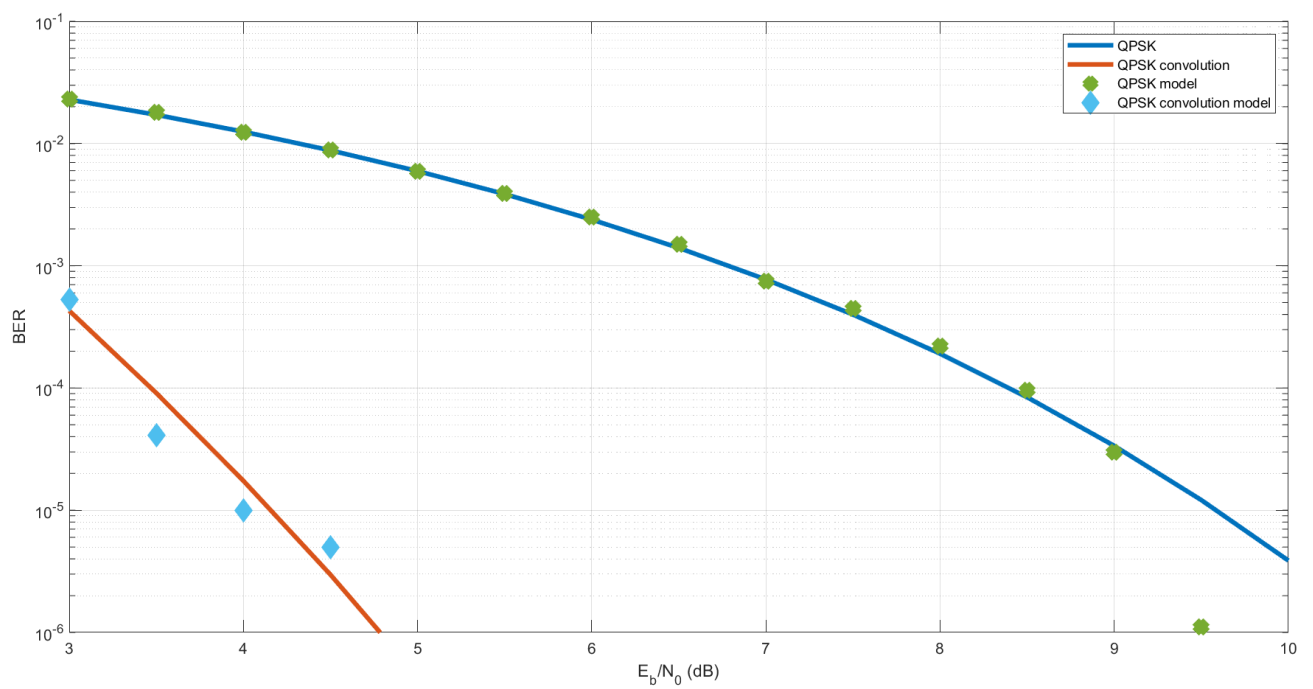


Рисунок 3.2 – модельована та теоретична крива BER

Як видно з рисунку 3.2, результати моделювання добре співвідносяться з теоретичними кривими. Згідно цього можна стверджувати коректність моделювання. Синім кольором відображена теоретична крива ймовірності бітової помилки для QPSK модуляції від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму, червоним кольором відображена аналогічна крива після декодування м'яким методом завадастійкого коду згорткового типу. Зелені і сині точки відповідно позначають ймовірності бітової помилки до і після процесу декодування і отримані за допомогою моделювання методом Монте Карло представленої моделі в САПР Матлаб. Як видно з рисунків, результати моделювання добре співвідносяться з теоретичними кривими.

3.3 Висновки

В цьому розділі було проведено розрахунок та перевірка каналу зв'язку згідно стандарту CCSDS та написаний код в програмному середовищі MatLab який відображає структуру даних фреймів та будує діаграму сигнального сузір'я.

З отриманих даних видно правильність застосування математичних алгоритмів та врахування бітових помилок.

4 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

Розділ містить в собі детальний опис та аналіз конструктивних аспектів пристрою передачі інформації з космічних апаратів. У цьому розділі розглядається апаратне забезпечення, його функціональність та структура, включаючи приймальні та передавальні антени, розміри, вага та інші ключові компоненти пристрою передачі сигналу. Тут також описуються конструкційні особливості кожного компоненту, його параметри та можливі методи оптимізації для забезпечення ефективного функціонування системи передачі інформації в космічному середовищі.

4.1 Опис конструктивного стандарту CubeSat

CubeSat - це мініатюрний супутник, створений згідно з визначеними стандартами, розміром від 10 сантиметрів до 10 літрів (1 уміститься в 1-літровій кубічній формі) і зазвичай з масою до 1,33 кілограма.[5] Основна ідея CubeSat полягає в створенні компактних, ефективних та вартісних модульних платформ для космічних досліджень і комерційних запусків у космос.

Цей стандарт був вперше запропонований в 1999 році студентами Каліфорнійського університету в Політехнічному інституті Стенфорда. З тих пір він знайшов широке застосування, зокрема в академічних дослідженнях, комерційних місіях, військових цілях і наукових експериментах.

Спеціальні стандарти для CubeSats допомагають зменшити витрати. Стандартизовані аспекти CubeSats дозволяють компаніям масово виробляти компоненти та пропонувати готові запчастини. У результаті розробка і розробка CubeSats стає дешевшою, ніж невеликі супутники, налаштовані на замовлення. Стандартизована форма та розмір також зменшує витрати, пов'язані з їх транспортуванням і розміщенням у космосі.

Основні переваги CubeSat включають:

- **Компактність:** Ці супутники мають невеликі розміри і масу, що робить їх ефективними в транспортуванні та розгортанні на орбіту.
- **Модульність:** Ці супутники мають стандартизований форм-фактор, який спрощує їх розробку та збірку. Їх модульна структура дозволяє легко

додавати додаткове обладнання чи інструменти для проведення різноманітних досліджень.

- Вартість: Розробка, виробництво та запуск CubeSats зазвичай є менш витратними порівняно зі стандартними супутниками, що дозволяє більшій кількості організацій та установ проводити космічні дослідження.
- Освітні можливості: CubeSats часто використовуються у навчальних програмах, що дає студентам можливість отримати практичний досвід у космічних технологіях.

Недоліками CubeSat може бути обмежена споживча потужність, обмежена наукова апаратура та обмежена можливість вирішувати складні наукові завдання порівняно з більшими супутниками.

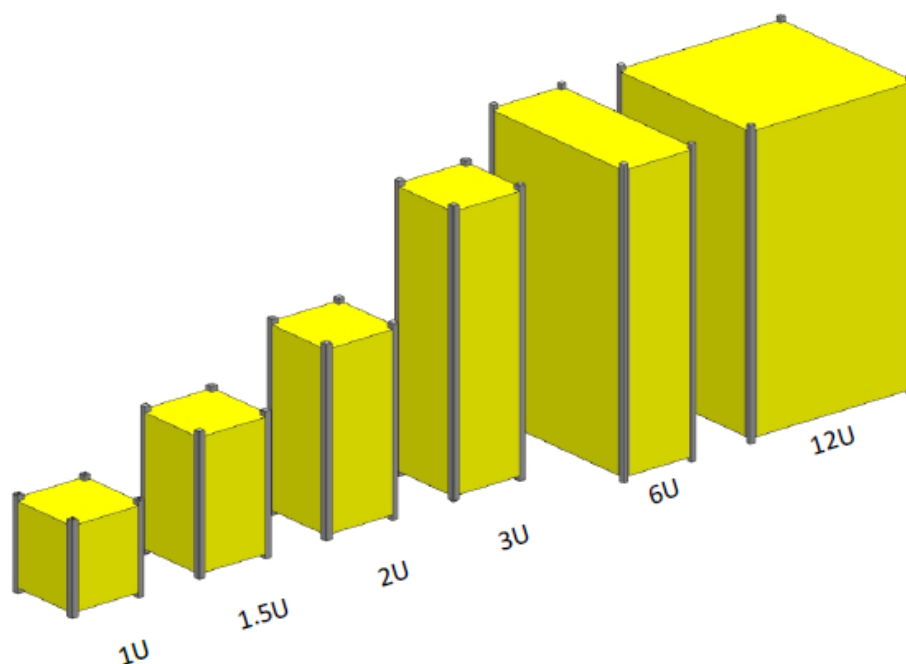


Рисунок 4.1 – Форм фактор cubesat стандарту

CubeSat випускається в кількох розмірах, які базуються на стандартному «Unit» CubeSat, який називається 1U. [5]

З огляду на різні форм фактори ми можемо обрати декілька різних в таблиці 4.1 приведені порівняльні параметри різних форм CubeSat

Таблиця 4.1 – Таблиця порівняння форм факторів Cubesat.

U	Configuration Mass[kg]	Xaxis	Yaxis	ZAxis
1U	2	2cm/-2cm	+2cm/-2cm	+2cm/-2cm
1.5U	3	2cm/-2cm	+2cm/-2cm	+3cm/-3cm
2U	4	2cm/-2cm	+2cm/-2cm	+4.5cm/-4.5cm
3U	6	2cm/-2cm	+2cm/-2cm	+7cm/-7cm
6U	12	4.5cm/-4.5cm	+2cm/-2cm	+7cm/-7cm
12U	24	4.5cm/-4.5cm	+4.5cm/-4.5cm	+7cm/-7cm

Приклади реальних супутників створених за допомогою CubeSat зображені на рисунку 4.2



Рисунок 4.2 – а) 1U CubeSat CP1 б) 3U CubeSat CP10

Ми описали сам CubeSat, але є ще одна важлива частина: дозатор, який є інтерфейсом між CubeSat і ракетою-носієм (РН). Диспенсер забезпечує кріплення до ракети-носія (або ракети), захищає CubeSat під час запуску та випускає його в космос у потрібний момент.

Є декілька типів диспенсерів.

- 1) Першим диспенсером для CubeSats був Poly-Picosatellite Orbital Deployer (P-POD). Він був розроблений Cal Poly, Сан-Луїс-Обіспо. Поточна версія P-POD зображена на рисунку 4.3а. Він може містити до трьох Us корисного

навантаження CubeSat (це означає будь-яку комбінацію, яка додає до трьох Us, наприклад три 1U, два 1,5U, один 3U, тощо) і прикручується безпосередньо до РН. Коли приходить час випустити корисний вантаж, ракета-носій надсилає електричний сигнал до P-POD, який змушує двері відкриватися та випускати CubeSat(и) на орбіту. Хоча більшість диспенсерів на ринку мають різну конструкцію, усі вони, як правило, дотримуються однієї основної ідеї безпечного контейнера з дверцятами, які відкриваються за командою РН, яка потім викидає CubeSat у космос.

- 2) Форм-фактор 6U практично такий же, як і два 3U, розташованих поруч, що робить його вдвічі ширшим. Ви можете побачити приклад 6U CubeSat на рисунку 4.3б. Функції диспенсерів 6U відрізняються, але більшість з них допускають будь-яку конфігурацію CubeSat (наприклад, один 6U, шість 1U, два 3U тощо) і функціонують подібно до диспенсерів 3U.

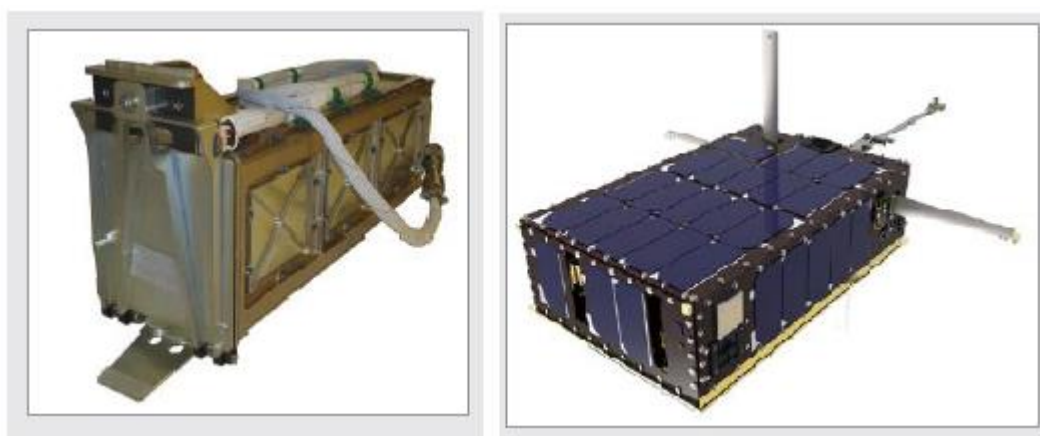


Рисунок 4.3 – а) Диспенсер 3U б) Диспенсер 6U

4.2 Креслення плати

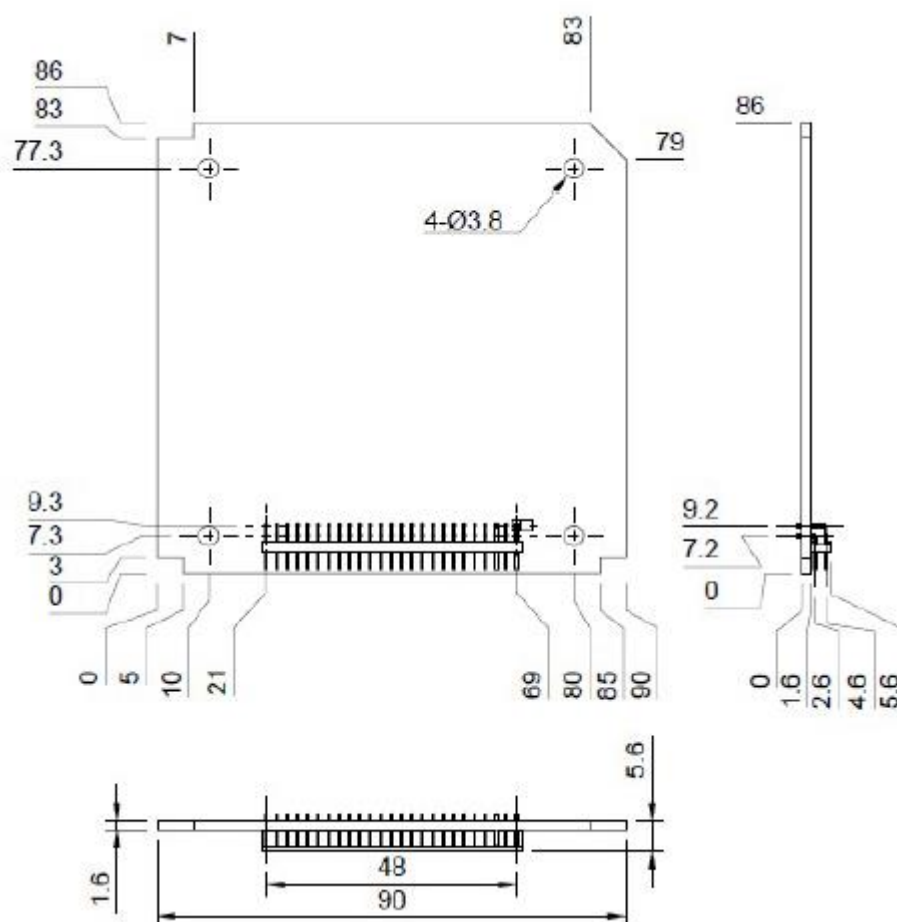


Рисунок 4.4 – Креслення друкованої плати для наносупутників

Для розрахунку та проектування друкованої плати було вирішено використовувати програмний застосунок Altium Designer, з його допомогою було створено бібліотеку компонентів та автотрасування доріжок та позиціонування елементів схеми.

Згідно стандарту IPC-2221 були прораховані параметри провідних доріжок на платі.

Рекомендована ширина доріжки:

$$l_{\text{шир}} = 0.41 \text{ мм}$$

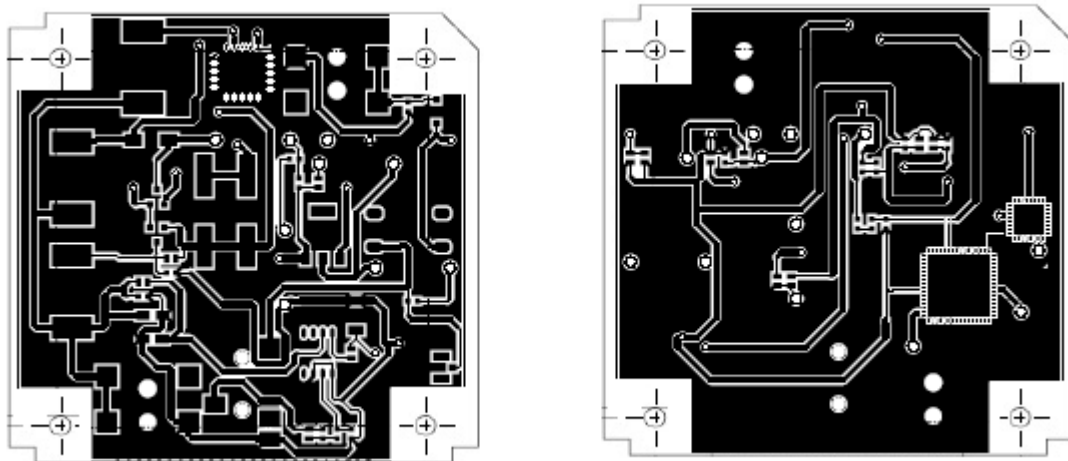


Рисунок 4.5 – Топологія друкованої плати

ВИСНОВКИ

Головною метою цієї дипломної роботи було розробити передавач для каналу передачі з малих космічних апаратів в CCSDS стандарті. Протягом роботи було проведено глибокий аналіз існуючих передавачів, розроблено креслення передавача згідного обраних стандартів, змодельований алгоритм формування пакету даних та відображено його на діаграмі.

Отримані знання відкривають широкі можливості для подальшого вивчення та побудови передавачів в космічній сфері.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. CCSDS.org - The Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS). *CCSDS.org - The Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS)*. URL: <https://public.ccsds.org/default.aspx>. <https://science.lpnu.ua/csn/all-volumes-and-issues/volume-3-number-1-2021/program-model-reed-solomon-codes>
2. https://rcl.ece.arizona.edu/publications/source_codes/ldpc/framework.html
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8F%D1%82%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%83%D1%81_\(%D1%84%D0%B8%D0%B%D1%8C%D1%82%D1%80\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8F%D1%82%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%83%D1%81_(%D1%84%D0%B8%D0%B%D1%8C%D1%82%D1%80))
4. What are SmallSats and CubeSats? - NASA. NASA. URL: <https://www.nasa.gov/what-are-smallsats-and-cubesats/>
5. CubeSat. *CubeSat*. URL: <https://www.cubesat.org/>
6. Nieto-Peroy C., Emami M. R. CubeSat Mission: From Design to Operation. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 15. P. 3110. URL: <https://doi.org/10.3390/app9153110>

ДОДАТОК А. СХЕМА СТРУКТУРНА

Додаток АА

ДОДАТОК Б. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА

Додаток ББ

ДОДАТОК В. КРЕСЛЕННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Додаток ВВ

ДОДАТОК Г. СТАТТІ

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА В ХХІ СТОЛІТТІ

Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів
та аспірантів «Радіoeлектроніка в ХХІ столітті»
10 – 12 травня 2023
Київ, Україна

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯ, РАДІОЛОКАЦІЯ, НАВІГАЦІЯ. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Аврамишин А. І. (керівник Лашевська Н. О.) Розпізнавання продуктів харчування з використанням згортової нейронної мережі	8
Броварник С. А. (керівник Зінгер Я. Л.) Використання штучного інтелекту та машинного навчання для покращення роботи інерційних навігаційних систем	11
Бруско А. В. (керівник Мирончук О. Ю.) Визначення напрямку радіосигналу за допомогою кількох приймачів SDR	14
Гайдай А. В. (керівник Товкач І. О.) Алгоритм локалізації багатьох БПЛА на основі сенсорної мережі	16
Галкін Т. А. (керівник Катін П. Ю.) Аналіз мікрокомп'ютерів для побудови автоматизованої мережевої системи моніторингу і управління зрошенням	19
Гелетко О. Я. (керівник Адаменко В. О.) Формування ефективного променя ФАР за допомогою алгоритмів машинного навчання	23
Гладовський М. В. (керівник Неуймін О. С.) Мінідрон моніторингу обстановки ближнього радіусу дії	26
Голодяєва П. В., Ходаніцький О. О., Гайдай А. В., Чмир Р. В. (керівник Товкач І. О.) Аналіз алгоритму оцінки місцеположення рухомого об'єкта за допомогою ансамбльного фільтра Калмана	29
Yevdokimov D. O. (Supervisor Zinher Y. L.) Computer vision for detection, classification, and tracking of non-typical low-contrast targets against complex background surfaces	32
Желябовський А. Ю. (керівник Піддубний В. О.) Машинне навчання при ідентифікації металів вихрострумовою радіотехнічною системою	35
Запорожець Д. А. (керівник Вишневий С. В.) Придушення завад на цифрових зображеннях	38
Захарченко М. М. (керівник Шпилька О. О.) Розрахунок енергетичних параметрів каналу зв'язку для високошвидкісної передачі інформації з супутників низьких навіколоземних орбіт	41

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА В ХХІ СТОЛІТТІ

Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів
та аспірантів «Радіоелектроніка в ХХІ столітті»
14 – 16 травня 2019
Київ, Україна

Київ — 2019

ЗМІСТ

Адаменко Є. О. (Науковий керівник — к.т.н., асист. Пільтай С. І.) ПОЛЯРИЗАТОР ІЗ ПОЗДОВЖНЬОЮ ПЕРЕГОРОДКОЮ	7
Ананьєв О. О. (Науковий керівник — ст. викл. Вишневий С. В.) СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ НА ОСНОВІ РАДІОТЕХНІЧНИХ ІОТ-РІШЕНЬ	9
Андрієнко В. І. (Науковий керівник — к.т.н., доц. Піддубний В. О.) ПРИСТРІЙ ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПОБУТОВОГО ВИКОРИСТАННЯ	11
Барабаш Д. П. СИСТЕМА ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДГРІВУ ГАЗОБАЛОННОГО ОБЛАДНАННЯ АВТОМОБІЛЯ	13
Бердник Ю. В. (Науковий керівник — к.т.н., доц. Шпилька О. О.) МОЖЛИВОСТІ NB-IOT ДЛЯ ЗАХИЩЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ	16
Бобко А. С. (Науковий керівник — ст. викл. Вишневий С. В.) ПРИДУШЕННЯ СПЕКЛ-ШУМУ НА РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ	18
Бодюк О. А. (Науковий керівник — к.т.н., доц. Піддубний В. О.) ВІРТУАЛЬНА ЛАБОРАТОРНА РОБОТА З ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧА НА ПОЛЬОВОМУ ТРАНЗИСТОРІ	20
Бондарець С. В. (Науковий керівник — к.т.н., доц. Головін В. А.) ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ РАДІОМЕТРА	22
Вус О. С. (Науковий керівник — к.т.н., асист. Пільтай С. І.) ВЕНТИЛЬ НА ОСНОВІ У-ЦИРКУЛЯТОРА	24
Гарбовський В. П. (Науковий керівник — к.т.н., доц. Головін В. А.) МОДЕЛЬ РАДІОМЕТРА	26
Давидюк О. В. (Науковий керівник — к.т.н., ст. викл. Шульга А. В.) БЕЗПРОВОДНИЙ ВЕЛОСИПЕДНИЙ КОМП'ЮТЕР	29
Демченко І. В. (Науковий керівник — ст. викл. Булашенко А. В.) ОБМЕЖЕНИЙ ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК У СИСТЕМАХ ММО	31
Демченко І. В. (Науковий керівник — ст. викл. Булашенко А. В.) ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ 5G	33
Демченко С. О. (Науковий керівник — ст. викл. Антоненко О. М.) ПРОСТА СХЕМА КЕРУВАННЯ МОСТОВИМ ІНВЕРТОРОМ	35
Захарченко М. М. (Науковий керівник — к.т.н., доц. Піддубний В. О.) РЕГУЛЬОВАНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ БЛОК ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ РАДІОАМАТОРСТВА	37