

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____Сергій МАРТИНЮК

«___» _____ 20__р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Радіосистемна інженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «MIMO-трансивер малих базових станцій 5G на основі
мікросхем серії AFE76xx»**

Виконав:

студент IV курсу, групи РС-81

Яровий Максим Вікторович



Керівник:

Професор, д.ф.-м. н.

Калюжний Олександр Якович

Рецензент:

старший викладач кафедри ПРЕ

Адаменко Володимир Олексійович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає за-
позичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент



Київ – 2022 року

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

**Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – **172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

Освітня програма **«Радіосистемна інженерія»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____Сергій МАРТИНЮК

«__»_____2022 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту Яровому Максиму Вікторовичу

1. Тема роботи «МІМО-трансивер малих базових станцій 5G на основі мікросхем серії AFE76xx», керівник роботи Калюжний Олександр Якович професор, д.ф.-м.н.
затверджені наказом по університету від «01» червня 2022 р. №822
2. Термін подання студентом роботи 17.06.2022
3. Вихідні дані до роботи: технічні специфікації та звіти TI E2E, дослідницькі матеріали та звіти Research Gate, освітні матеріали навчальної дисципліни «Системи мобільного зв'язку» та додаткова література.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: провести ескізу розробку структури пристрою; визначити перелік функціональних блоків та їх основні параметри; вибрати елементну базу; визначити основні параметри конструкції майбутнього пристрою.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій то-що): Блок-схема 2x2 МІМО-трансивера, функціональна схема AFE7684, дерево живлення мікросхеми.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 30.05.2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання ДР	2 дні	
2	Аналіз теоретичних відомостей	10 днів	
3	Розробка архітектури	7 днів	
4	Розробка схем	7 днів	
5	Конструкція	3 днів	
6	Оформлення пояснювальної записки	6 днів	

Студент

Максим ЯРОВИЙ

Керівник

Олександр КАЛЮЖНИЙ

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «МІМО-трансивер малих базових станцій 5G на основі мікросхем серії AFE76xx» містить: сторінок – 52, рисунків – 31, таблиць – 1, джерел посилань – 19.

Об'єктом дослідження є МІМО-трансивер малих базових станцій 5G.

Предметом дослідження є сімейство мікросхем AFE76xx та в зокрема AFE7684

Метою роботи є розробка трансивера МБС на базі мікросхеми AFE76xx. Розроблено конструкцію, блок-схему, схему живлення та архітектуру 2x2 МІМО-трансивера МБС на базі мікросхеми AFE7684, крім того досліджено способи розширення кількості антен у трансивері і приведені відповідні блок-схеми та архітектури.

Ключові слова: ТРАНСИВЕР, МІМО, АРХІТЕКТУРА, АНТЕНА, ПРИЙМАЧ, ПЕРЕДАВАЧ, МІКРОСХЕМА

ANNOTATION

Explanatory note to the thesis "MIMO-transceiver of small base stations 5G based on chips series AFE76xx" contains: pages - 52, figures - 31, tables - 1, reference sources - 19.

The object of the study is a MIMO transceiver of small 5G base stations.

The subject of the research is the family of chips AFE76xx and in particular AFE7684

The aim of the work is to develop an MBS transceiver based on the AFE76xx chip.

The design, block diagram, power supply circuit and architecture of 2x2 MIMO-transceiver MBS based on the AFE7684 chip were developed, in addition, methods of expanding the number of antennas in the transceiver were studied and the corresponding block diagrams and architectures are presented.

Keywords: TRANSCEIVER, MIMO, ARCHITECTURE, ANTENNA, RECEIVER, TRANSMITTER, CHIP

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

на тему: «МІМО-трансивер малих базових станцій 5G на основі мікросхем серії
AFE76xx»

Київ — 2022 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	11
1.1 Загальні особливості побудови мереж мобільного зв'язку 5G	11
1.2 Специфічні особливості побудови та проектування МІМО-трансиверів.....	17
1.2.1 Загальні відомості про технологію МІМО та МІМО-трансивери.....	20
1.2.2 Особливості та можливі проблеми.....	21
1.2.2.1 Перехресні перешкоди між антенами.....	23
1.2.2.2 Нелінійні радіочастотні перехресні перешкоди	25
1.2.2.3 Компенсація послаблення та спотворення.....	25
1.3 Приймачі та передавачі в МІМО-трансиверах	26
1.3.1 Передавачі.....	26
1.3.2 Приймачі	29
1.4 Мікросхеми серії AFE76xx.....	36
1.4.1 Основні характеристики	37
1.4.2 Конфігурації.....	38
1.5 Висновок.....	41
2 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ МІМО-ТРАНСИВЕРА	43
2.1 Обґрунтування вибору мікросхеми із серії AFE76xx.....	44
2.2 Вибір структури та параметрів блоку синхронізації	47
2.3 Вибір структури та параметрів антен.....	47
2.4 Висновок.....	51
3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ПРИСТРОЮ ТА ЙОГО ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ	52
3.1 Розробка схеми живлення.....	52
3.2 Розробка блоків приймального та передавального тракту	54
3.3 Канал синхронізації.....	56
3.4 Висновок.....	57
4 КОНСТРУКЦІЯ.....	58
4.1 Висновок.....	60
5 ЗАКЛЮЧЕННЯ	61

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

IoT - Internet of Things

NR - New Radio

MIMO - Multiple Input Multiple Output

БС/МБС – базова станція/мала базова станція

DUC - digital up-converter

DDC - digital down-converter

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

SerDes – блок Serializer / Deserializer

DSA – Digital Step Attenuator

ВСТУП

На сьогоднішній день дослідження технологій мереж бездротового зв'язку є одним із важливих завдань. Використання високоякісного та високошвидкісного зв'язку є необхідним. Враховуючи, що мобільна мережа п'ятого покоління є наразі найактуальнішою у світі, а найважливішим аспектом впровадження технології є її інтеграція в світ за допомогою створення нового програмного та апаратного забезпечення. Основною розглянутою технологією для впровадження 5G мережі буде система MIMO. А під апаратною частиною мається на увазі MIMO -трансивер для МБС 5G.

Основні завдання роботи полягають у наступному:

- Аналіз основних параметрів, характеристик та архітектури мережі 5G та технології MIMO.
- Вибір комплектуючих для створення апаратної частини.
- Розробити варіант архітектури трансивера МБС 5G.
- Виконати розробку загального виду та конструкції готового виробу.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Загальні особливості побудови мереж мобільного зв'язку 5G

Особливості побудови мереж мобільного зв'язку 5G впливають з базових принципів побудови цих мереж, а саме:

1) Розділення мережевих вузлів на елементи, що забезпечують роботу протоколів площини користувача та протоколів площини управління.

Таке розділення вже було прийняте в мережах 4G, але тут воно виконується ще більш обширно та строго. Це дає можливість передавати службову інформацію та контент користувача окремо (через окремі сервери). Тоді при зміні протоколів простіше відбувається зміна та модернізація мереж.

2) Нарізка мережі (network slicing) розділення мережевих елементів площини управління на «шари», що дозволяє надавати послуги з різним набором характеристик: наприклад, для систем URLLC (ультра надійного зв'язку з низькою затримкою) необхідна дуже мала ймовірність похибки та найменш можлива затримка. В той же час для mMTC (M2M, D2D) затримка не так важлива.

Для eMBB (відео-сервіси, тощо) найважливіше мати максимально можливу швидкість. Отже, в підсистемах управління якби поєднуються кілька різних систем.

3) Реалізація віртуальних мережевих функцій VNF (Virtual Network Functions) - одна й та ж функція може бути реалізована на фізично різних пристроях, але це в кінцевому підсумку не буде мати значення.

4) Реалізація мережі на принципах SDN (Software Defined Network) - при програмній реалізації можна в широких межах змінювати логічні налаштування, функції мережі, використовувати будь-які наявні ресурси, тощо.

- 5) Об'єднання різних типів мереж доступу з єдиною опорною мережею.
- 6) Підтримка єдиних алгоритмів та процедур автентифікації в незалежності від типу мережі доступу.
- 7) Можливість розділення між обчислювальним ресурсом та ресурсом зберігання.

В архітектурі 5G взаємодія між мережевими функціями представлена двома способами:

- сервіс-орієнтоване, коли одні мережеві функції (наприклад, AMF) дозволяють іншим авторизованим мережевим функціям отримувати доступ до сервісів.

- інтерфейсне, яке показує, як взаємодія існує між сервісами мережевих функцій, описаних як взаємодія точка-точка (наприклад, інтерфейс N11) між будь-якими двома мережевими функціями (наприклад, AMF та SMF).

Мережеві функції на площині управління 5G повинні використовувати лише сервіс-орієнтовані інтерфейси для їхньої взаємодії. Якщо зображати архітектуру 5G з точки зору сервіс-орієнтованої взаємодії різних мережевих функцій на площині управління, то виглядатиме це як на рис.1.1.

Де :

- функція управління доступом та мобільністю (AMF - Access and Mobility Management Function);
- функція управління сесіями (SMF – Session Management Function);
- функція передачі даних користувачів (UPF – User Plane Function);
- модуль керування даними користувачів (UDM – Unified Data Management);

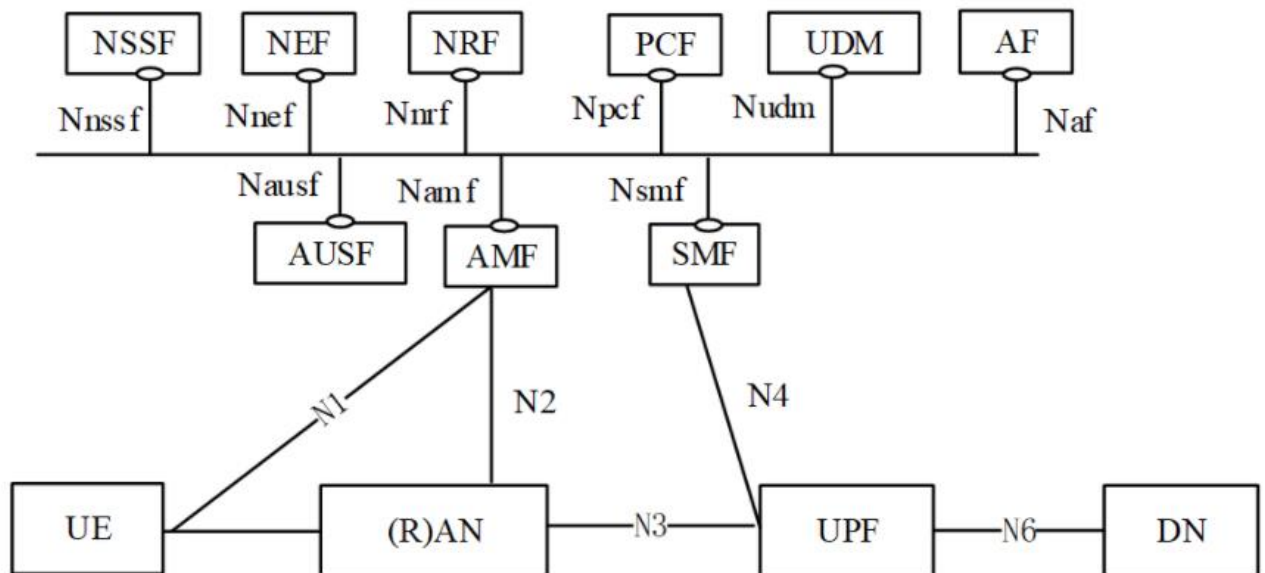


Рис.1.1 – Архітектура мережі 5G [1]

- уніфікована база даних (UDR – Unified Data Repository);
- система зберігання неструктурованих даних (UDSF – Unstructured Data Storage Function);
- функція вибору мережного шару (NSSF – Network Slice Selection Function);
- функція управління політиками (PCF – Policy Control Function);
- функція забезпечення взаємодії із зовнішніми програмами (NEF - Network Exposure Function);
- сховище мережових функцій (NRF – NF Repository Function);
- прикладна функція (AF – Application Function);
- функція підтримки обміну короткими текстовими повідомленнями через протокол NAS (SMSF - SMS Function);

- функція взаємодії з не-3GPP мережею доступу (N3IWF – Non-3GPP InterWorking Function);

Ще однією особливістю є новий діапазон частот, визначений 3GPP для 5G, відомий як New Radio (NR), а специфікація розділяється на дві смуги частот: FR1 (600-6000 МГц) та FR2 (24-100 ГГц). 5G NR використовує модуляцію, форми сигналів і технології доступу, які дозволять системі задовольнити потреби, серед іншого, послуг з високою швидкістю передачі даних, тих, кому потрібна низька затримка, а також тих, кому потрібна невелика швидкість передачі даних і тривалий час автономної роботи. Також 5G NR дозволяє використовувати технологію Beamforming (формування променів). Це технологія, яка стала реальністю в останні роки і пропонує ряд істотних переваг для 5G. Формування променя дозволяє направити промінь від базової станції до мобільного телефону. Таким чином, оптимальний сигнал може бути як переданий на мобільний телефон, так і отриманий від нього, а також усунені перешкоди іншим мобільним пристроям. Для системи 5G платформа TDD(Time division duplex), яка підтримує IBW(In-building wireless) 100 МГц або 200 МГц, зазвичай обговорюється для першого розгортання протягом 2019 року в діапазоні 3,5 ГГц. Для зовнішнього застосування з високою потужністю передачі для роботи DPD(Digital pre-distortion) необхідно підтримувати втричі більші частоти IBW. Це призводить до підтримки смуги пропускання 600 МГц шляхом передачі та моніторингу приймання ТХ. На додаток до системних вимог, що виникають на даний момент, постачальники послуг вважають за краще зробити платформу достатньо гнучкою, щоб систему можна було розширити для більш широкої підтримки IBW у майбутньому.

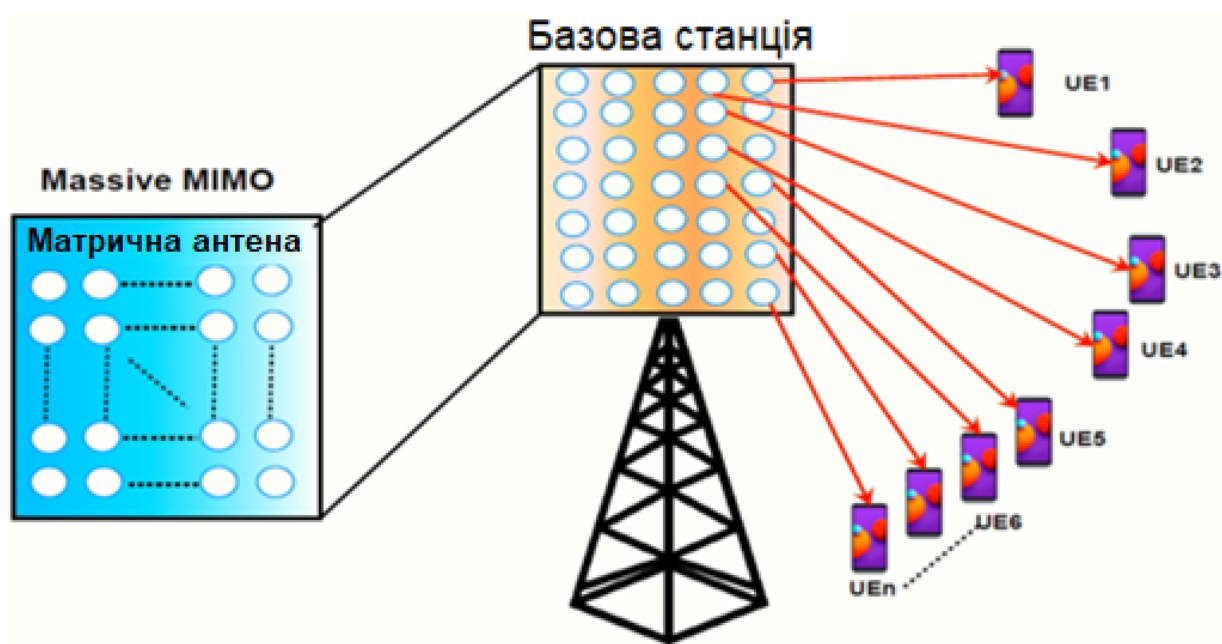


Рис.1.2 – Схема роботи БС з терміналами [8]

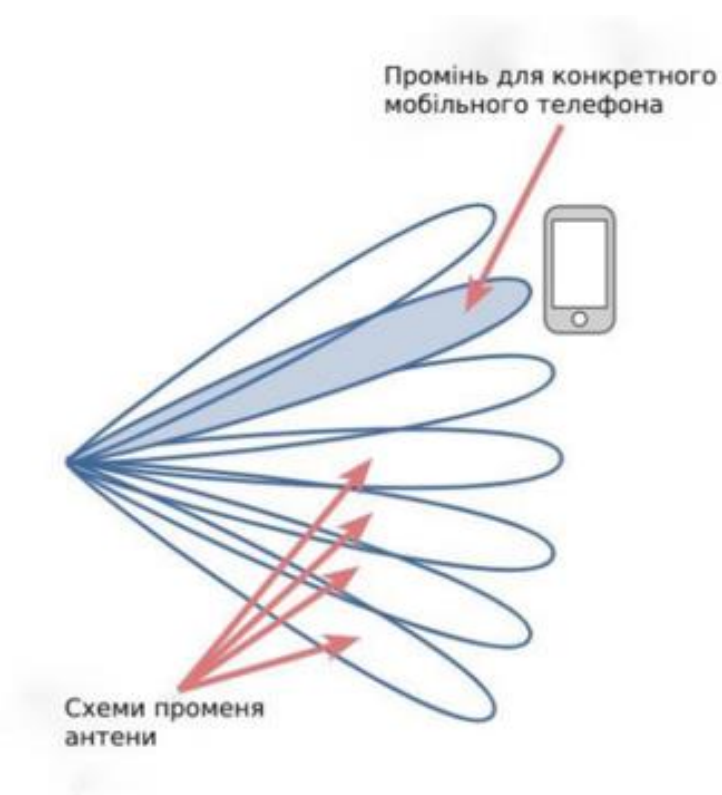


Рис. 1.3 – Концепція формування діаграми спрямованості з 5G NR [18]

Для цієї системи частота дискретизації RX має бути щонайменше 368,64 МГц або вище. У той час як частота дискретизації тракту TX має бути не менше 737,28 МГц або 983,04 МГц. У прикладі для системи LTE частота дискретизації потоку даних базової смуги є низькою. Крім того, швидкість передачі даних приймача трафіку в чотири рази нижча, ніж швидкість передачі даних інших шляхів (TX і RX). Вимоги до асиметричної пропускної здатності між RX і TX і FBRX можуть надати системному інженеру кілька варіантів залежно від наступних обмежень проектування:

- Необхідна кількість смуг SERDES для висхідної та низхідної лінії зв'язку
- Підтримувана частота смуги SERDES на FPGA
- Підтримується режим JESD
- Зона борту доступна для смуг SERDES

Одним із варіантів інтерфейсу SERDES висхідної лінії може бути використання нижчої швидкості SERDES, одночасно використовуючи більше смуг SERDES. Іншим варіантом є збільшення кількості смуг SERDES, щоб більше даних можна було упакувати в одну доріжку, що призведе до меншої кількості смуг SERDES. Залежно від обмежень розташування плати та доступних функцій на стороні FPGA, системний інженер повинен визначити, який варіант є кращим для цільової платформи. Хоча широкосмугова система, як-от система 5G, не дає багато альтернативних варіантів, оскільки для потоку даних з високою швидкістю передачі даних неминуче потрібно багато смуг SERDES. Хоча подібне міркування можна застосувати.

Однією з ключових технологій для реалізації мереж мобільного зв'язку 5G є використання у складі базових станцій багатоелементних цифрових антенних

решіток з кількістю антенних елементів 128, 256 і більше. Відповідні системи отримали назву Massive MIMO.

1.2 Специфічні особливості побудови та проектування MIMO-трансиверів

Системи бездротового зв'язку реалізуються за допомогою передавача, приймача та бездротового каналу. Класична реалізація цих систем зазвичай є а передавач і його єдина антена на передавальній стороні і приймач і його одна антена на приймальній стороні. Концепція використання кількох антен на приймач був представлений на початку 1960-х років. Основна ідея – забезпечення декількох копій з переданого сигналу на приймальній стороні та їх комбінація для отримання сигналу з кращою продуктивністю. Ця техніка називається техніка просторового різноманіття (space diversity). Щоб реалізувати техніку рознесення приймача – на стороні приймача використовуються кілька антен. Тоді вихідні сигнали антен поєднуються із застосуванням різних вагових коефіцієнтів.

Рознесення приймача може бути реалізовано за допомогою трьох різних методів відбору комбінування, об'єднання з рівним коефіцієнтом посилення та комбінування з максимальним співвідношенням.

У методі комбінування, приймач вибирає найсильніші сигнали серед антен. виходи. Цей сигнал обробляється в одному приймачі. Максимальний коефіцієнт комбінування реалізується шляхом зважування як посилення, так і фази прийнятих сигналів до максимізувати відношення сигнал/шум (SNR) на виході приймача. З іншого боку, у методі суміщення рівного посилення лише фази канали з використанням вагових коефіцієнтів скасовуються. Суматор максимального співвідношення

Метод рознесення забезпечує найкращу продуктивність для пом'якшення бездротового каналу вплив, тоді як різноманітність відбору пропонує найпростішу техніку реалізації серед різноманітних методів.

Техніка рознесення приймача є спеціальною реалізацією для використання кількох антени. Техніка з кількома антенами може використовуватися як в передавачі, так і в приймачі. Ця техніка зазвичай відома як система з кількома входами і виходами (MIMO). Різні методи реалізації для систем MIMO показані на рисунку 2.2. Система, яка використовує одну антену як для передачі, так і для прийому сторони називається системою з одним входом і одним виходом (SISO).

Особливостями можна впевнено назвати ті тези, що впливають з задачі та вимог які ми перед собою ставимо, і власне особливості залежать від виду трансивера, розробкою якого ми займаємось.

Технологія з кількома входами і багатьма виходами (MIMO) забезпечує більш високі швидкості передачі даних і кращу надійність у бездротових системах. Ефективна конструкція радіочастотних трансиверів має життєво важливий вплив на реалізацію цієї ніші.

Мистецтво розробки сучасних бездротових трансиверів досягло значного прогресу протягом останніх двох десятиліть. Конструкція цих трансиверів загалом повинна дотримуватись трьох основних факторів. Вони повинні мати високу продуктивність, низьку вартість і здатність вирішувати комплексні завдання передових систем бездротового зв'язку. А загальна блок-схема бездротового трансивера з використанням кількох антен показано на рисунку 2.1.

В останніх трансиверах велика кількість обробки сигналів досягається в базовій смужі з використанням цифрових сигнальних процесорів (DSP), інтегро-

ваних для конкретного застосування схем (ASIC) і польових вентильних матриць (FPGA). Сигнал на вихід секції основної смуги частот перетворюється з підвищенням у частоту РЧ за допомогою гетеродина техніка або метод прямого перетворення. Синтезатор частоти забезпечує сигнал несучої для перетворення з підвищенням. Підсилювачі потужності відіграють вирішальну роль забезпечення продуктивності системи. ВЧ інтерфейс доставляє сигнал до передавальної антени. Після проходження через бездротовий канал на стороні приймача, сигнали кількох антен мають бути перетворені з пониженням. Цей процес включає

Обробка радіочастотного сигналу за допомогою малошумних підсилювачів (МШУ), синтез частоти, і зниження конверсії. Потім сигнали повинні бути доставлені до приймача.

Обробка надмірного сигналу виконується в приймачі для виявлення сигналу. Аналогічно на стороні передавача здійснюється цифрова обробка сигналу цифровою схемою передавача.

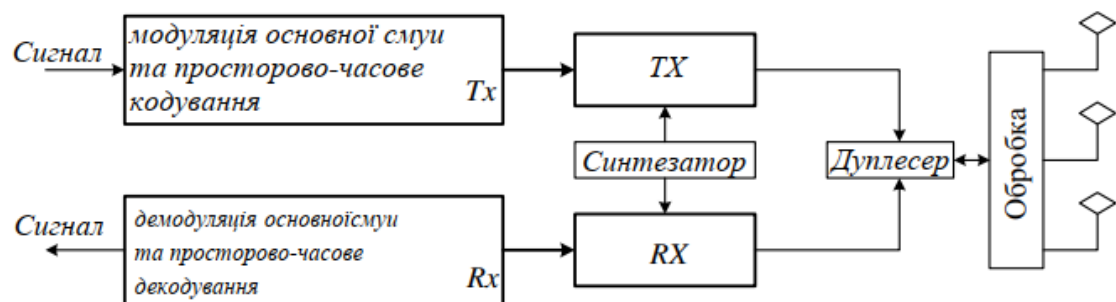


Рис.2.1 – Блок-схема бездротового МІМО-трансивера [7]

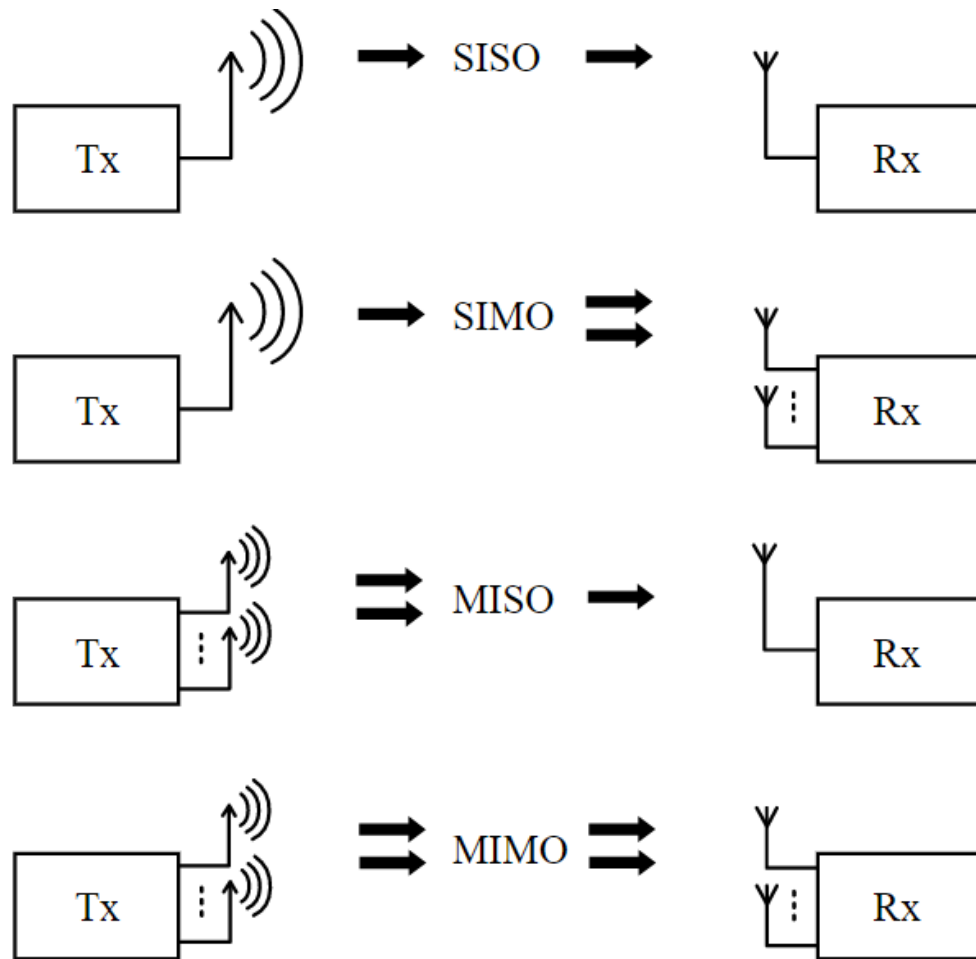


Рис.2.2 – Принцип технології MIMO [7]

1.2.1 Загальні відомості про технологію MIMO та MIMO-трансивери

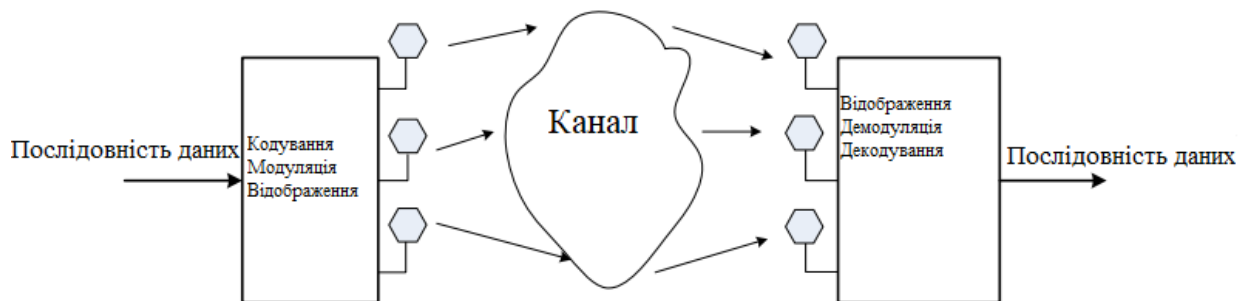


Рис.3 – Блок-схема системи MIMO

Конструкція бездротових трансиверів, як правило, має відповідати трьом основним факторам. Вони повинні мати високу продуктивність, низьку вартість і відповідати комплексним завданням передових систем бездротового зв'язку.

В новітніх трансиверах велика кількість обробки сигналів досягається в основній смузі за допомогою цифрових сигнальних процесорів (DSP), інтегральних мікросхем (ASIC) і програмованих логічних матриць (FPGA). Сигнал на виході секції основної смуги частот перетворюється з підвищенням частоти у РЧ за допомогою гетеродинного методу або методу прямого перетворення. Синтезатор частоти забезпечує сигнал несучої для перетворення з підвищенням. Підсилювачі потужності відіграють вирішальну роль у забезпеченні продуктивності системи. РЧ front-end доставляє сигнал до антен передавача. Після проходження через бездротовий канал на стороні приймача сигнали кількох антен мають бути перетворені з пониженням. Цей процес включає обробку радіочастотного сигналу за допомогою малошумних підсилювачів (МШУ), синтезу частоти та понижуючого перетворення.

Конструкція МІМО-трансивера має враховувати можливість наявності таких проблем, як тепловий шум, квантування АЦП, нелінійність підсилювача, флікер шум і т.п

1.2.2 Особливості та можливі проблеми

Топологія МІМО є високоефективним рішенням для підвищення спектральної ефективності бездротових систем. Справді, перехід від трансиверів SISO до приймачів МІМО теоретично може помножити ємність системи або швидкість передачі даних на кількість виходів, інтегрованих у приймач МІМО. Однак топологія МІМО стикається з різними проблемами реалізації, які можна розділити на дві великі категорії.

Перша категорія складається з проблем, пов'язаних із загальною констру-

кцією трансивера, таких як лінійність передавача, динамічний діапазон приймача, а також дисбаланс і витік у змішувачах. Ця група не є унікальною для систем МІМО.

Друга категорія характерна для трансиверів МІМО. У багатогалузевих трансиверах МІМО перехресні перешкоди є результатом сполучення та інтерференції між сигналами різних антен. Перехресні перешкоди, швидше за все, мають місце між антенами, оскільки сигнали в різних антенах використовують однакову робочу частоту і мають однакову потужність передачі. Це є більш значущим у розробці інтегральної схеми (ІС), особливо коли фактична площа схеми невелика.

Перехресні РЧ перешкоди можна розділити на лінійні та нелінійні. Лінійні перехресні перешкоди виникають за межами виходу передавача, тобто на антені, і можуть бути змодельовані як лінійна функція перешкод і бажаних сигналів. Це означає, що сигнал, на який впливають лінійні перехресні перешкоди, не проходить через нелінійні компоненти. І навпаки, нелінійні перехресні перешкоди впливають на сигнал до того, як він проходить через нелінійні компоненти. Ці перехресні перешкоди, які виникають у схемі передавача перед підсилювачем потужності, є основним джерелом нелінійних перехресних перешкод, оскільки підсилювач потужності є основним джерелом нелінійності. Походження та природа обох типів перехресних перешкод проілюстровано на малюнку 4.1. Розглянемо саме другу категорію перешкод, оскільки вони мають важливе значення при розробці МІМО-трансивера.

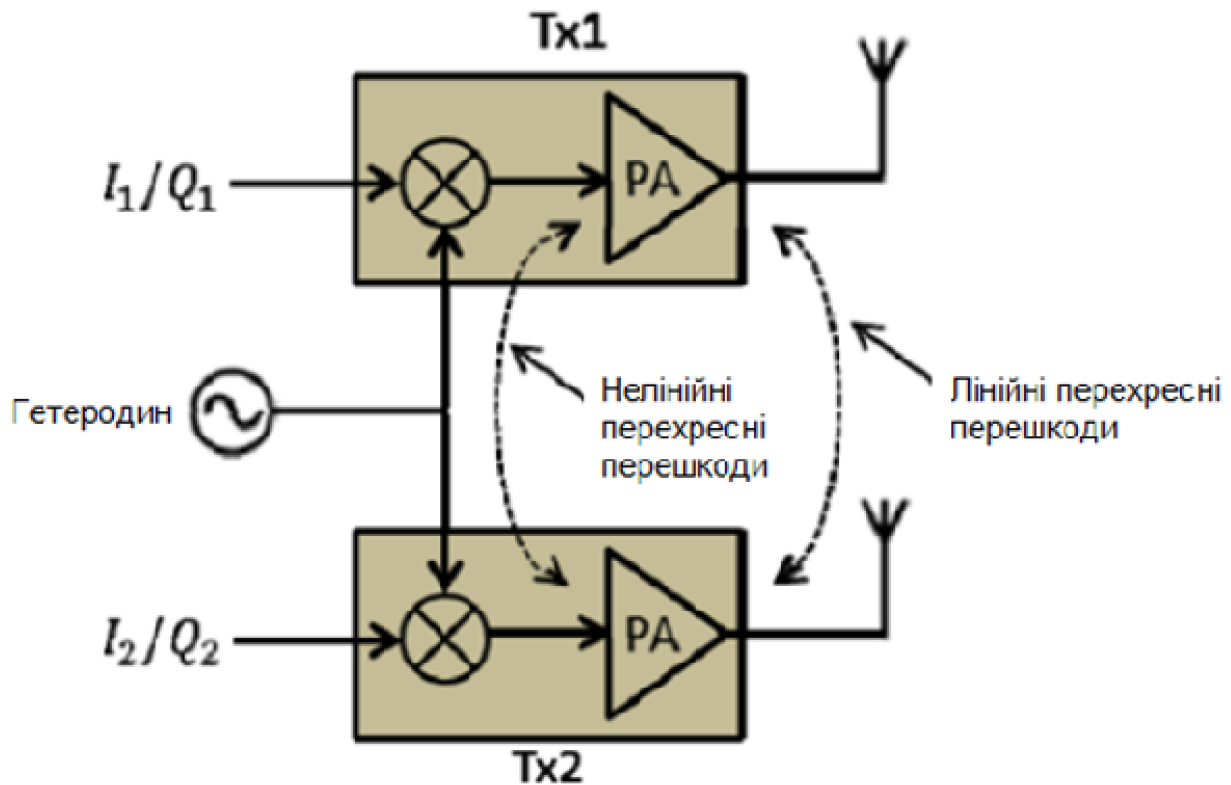


Рис.4.1 – Походження та природа обох типів перехресних перешкоди [6]

1.2.2.1 Перехресні перешкоди між антенами

Перехресні перешкоди антени – це вплив сигналу, що передається від одного елемента антени до іншого елемента антени. Сигнали на виході антен після перехресних перешкод є лінійними функціями сигналів на вході антени.

Лінійні перехресні перешкоди розглядалися в кількох дослідженнях і було запропоновано кілька методів, щоб компенсувати їх. Компенсація одночасно виконується переважно на стороні приймача для складених лінійних перехресних перешкод, створених на антенах передавача та приймача, а також на каналі.

2×2 Система MIMO з трьома типами лінійних перехресних перешкод показана на малюнку 4.2.

Загальні лінійні перехресні перешкоди можна змодельовати як:

$$\vec{Y} = (BHA)\vec{X} + B\vec{N}$$



Рис.4.2 – 2x2 MIMO система з трьома типами перехресних перешкод [5]

де A і B – матриці перехресних перешкод для передавальної та приймальної антени. H в свою чергу - матриця перехресних перешкод для каналу, H - являє собою адитивний вектор білого Гаусівського каналу (AWGN).

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$$

Метод інверсії матриці є практичним, якщо (BHA) матриця є зворотною. Крім того, перехресні перешкоди на антені передавача і каналі MIMO можуть погіршити продуктивність системи MIMO через посилення шуму, як останній член. Продуктивність системи MIMO не чутлива до перехресних перешкод антени приймача, доки матриця B є оборотною.

1.2.2.2 Нелінійні радіочастотні перехресні перешкоди

Передавачі MIMO повинні підтримувати певні рівні ефективності та лінійності в системі, подібні до одногілкових передавачів. Насправді вимоги до енергоефективності та лінійності передавачів MIMO є більш стриманими, ніж вимоги до одногілкових передавачів. Як показано на малюнку 4.1, перехресні перешкоди, які виникають до підсилювачів потужності, називаються нелінійними. Деякими джерелами такого типу перехресних перешкод можуть бути витік РЧ-сигналу через загальний гетеродин і перешкоди в чипсеті.

Попереднього методу інверсії матриці недостатньо для компенсації нелінійних перехресних перешкод. Отже через неминучі радіочастотні перехресні перешкоди між гілками передавача MIMO, незалежне моделювання кожної гілки недостатньо для виключення впливу нелінійних радіочастотних перешкод.

Отже, традиційні методи DPD(цифрове спотворення), розроблені для систем SISO, не підходять для систем MIMO. Фактично, потрібна нова архітектура DPD з можливістю мати більше одного вхідного сигналу

1.2.2.3 Компенсація послаблення та спотворення

Більшість методів, запропонованих на даний момент, розглядали або нелінійні спотворення, дисбаланс I/Q модулятора, або ефекти зв'язку в передавачах MIMO. Проте не так багато запропонованих рішень, які б спільно вирішували всі проблеми одночасно. Оскільки трансивер складається з приймача та передавача, поговоримо про пристрої прийому-передачі у трансиверах. Щоб охарактеризувати статичність і динамічність (ефект пам'яті) нелінійної поведінки передавача, може бути використана багатогілкова поліноміальна модель. У передавачі MIMO для моделювання ефектів зв'язку на додаток до нелінійності перетворювача потужності кожен вихід передавача повинен містити перехресні члени між вхідними сигналами

Для компенсації всіх вищезгаданих ефектів можна використовувати методи попередньої обробки цифрових базових смуг (наприклад в передавачі прямого перетворення). Отже, для вилучення коефіцієнтів оберненої моделі необхідно провести ідентифікацію. Зворотна модель використовується для генерування входу передавача МІМО при подачі виходу передавача МІМО.

1.3 Приймачі та передавачі в МІМО-трансиверах

Приймач:

- Бажаний сигнал перетворюється з пониженням із смуги пропускання за допомогою радіочастотних змішувачів
- Аналоговий сигнал базової смуги з пониженим перетворенням дискретизується за допомогою АЦП

Передавач:

- Вибірковий сигнал перетворюється в безперервну часову область за допомогою ЦАП
- Аналоговий сигнал основної смуги перетворюється з підвищенням у свою смугу пропускання за допомогою радіочастотних змішувачів

1.3.1 Передавачі

Для передавачів було запропоновано декілька архітектур, які залежать від вимог до продуктивності.

Передавач прямого перетворення

Архітектура передавача прямого перетворення приділяла значну увагу для багатостандартних, багатодіапазонних додатків через меншу кількість компонентів і зручність використання. Ця архітектура складається з цифрового блоку

обробки базової смуги, цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП), прямого підвищувального перетворювача, підсилювача потужності та антени. Цифровий блок обробки основної смуги частот несе відповідальність за цифрову модуляцію, кодування та фільтрацію, щоб розробити та синтезувати відповідний сигнал передачі з цифрових вхід-

них даних. ЦАП перетворюють цифровий синфазний (I) і квадратурний (Q) сигнали основної смуги в аналогові сигнали, які живлять квадратурний модулятор для прямого перетворення з підвищенням. Аналогові сигнали безпосередньо перетворюються з підвищенням у РЧ за допомогою несучих I та Q. Структурна схема передавача прямого перетворення показана на рисунку 5.1. Смуговий фільтр після підсумовування сигналу використовується для придушення позасмугових сигналів, створених гармонічними спотвореннями несучої. Потужність радіочастотного сигналу збільшується за допомогою підсилювача для передачі через антену. Передавач прямого перетворення теоретично простий, і в ньому немає компонентів проміжної частоти (ПЧ). Недоліками цієї архітектури є витік гетеродина (LO) на частотах РЧ, витягування генератора, керованого напруженням (VCO), і вимога до I/Q змішувача на частотах РЧ. Передавач прямого перетворення страждає від неоднакового комплексного посилення I та Q трактів. Це залежить від частоти та робочої температури. На якість вихідного РЧ-сигналу сильно впливає дисбаланс I/Q, викликаний модуляторами. Крім того, підсилювач має нелінійну поведінку, що погіршує якість вихідного сигналу та створює позасмугову потужність. Методи цифрового передвикривлення (DPD) є відповідними кандидатами для підвищення якості сигналу та компенсації позасмугової потужності. Однак дисбаланс I/Q на передавачі може значно знизити лінеаризаційну здатність цифрового передісторатора.

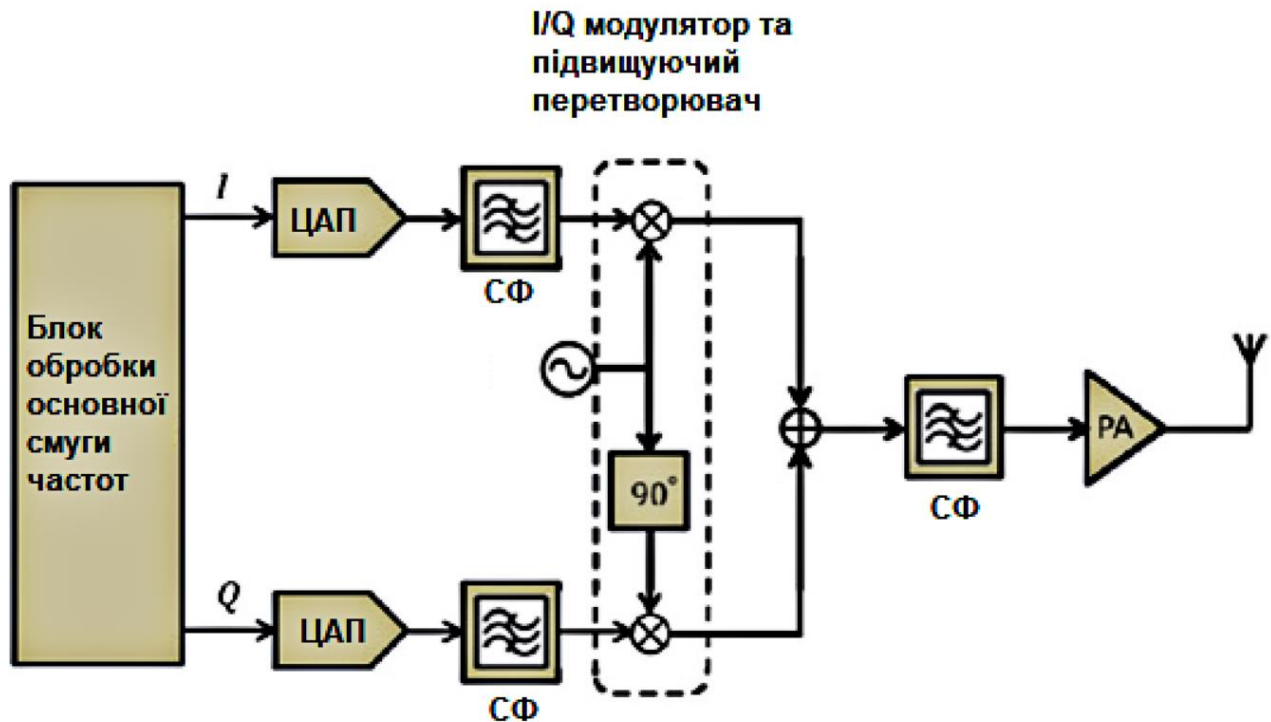


Рис.5.1 – Структурна схема передавача прямого перетворення[6]

Супергетеродинний передавач

Найпоширенішим підходом подвійного перетворення є супергетеродинна архітектура. Схема супергетеродинного передавача показана на малюнку 5.2. На першому етапі вхід основної смуги частот перетворюється на ПЧ за допомогою змішувача I/Q. Перший смуговий фільтр, ВР1, показаний на цьому малюнку, зменшує будь-яку паразитну позасмугову потужність перед другим перетворенням на підвищення. На другому етапі сигнал ПЧ проходить друге перетворення з підвищенням для досягнення бажаної частоти передачі. Другий смуговий фільтр, ВР2, можна використовувати для фільтрації додаткової паразитної позасмугової потужності, викликаної другою операцією змішування. Частота ПЧ визначається частотою гетеродина, f_1 . Друга частина змішувача генерує дві частоти, $f_2 + f_1$ та $f_2 - f_1$. Одна з частот вибирається другою смугою фільтра, а небажана частота (частота зображення) відхиляється. Супергетеродинна

архітектура була розроблена, щоб подолати притаманні проблеми з прямим перетворенням або гомодинною (передавач прямого перетворення) архітектурою. У цій архітектурі, деякі небажані частотні складові, що походять від нелінійності (наприклад, у змішувачах) можна видалити фільтрами.

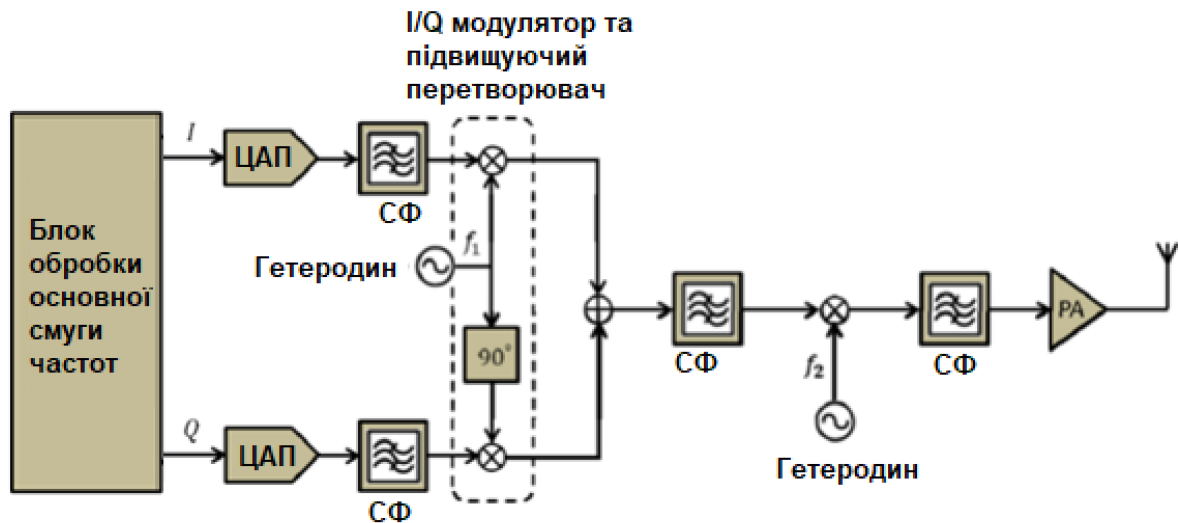


Рис.5.2 – Структурна схема супергетеродинного передавача[6]

1.3.2 Приймачі

Є 6 типів приймачів, а саме супергетеродинний, прямого перетворення, низької ПЧ, відхилення зображення, шестипортовий та п'ятипортовий. Для реалізації технології MIMO підходять три типи - супергетеродинний, прямого перетворення та шестипортовий.

Супергетеродинний

Супергетеродинний приймач MIMO показаний на малюнку 6.1. Як видно, архітектура в основному розроблена на основі приймачів SISO. Однак використовуються звичайні гетеродини, як в РЧ, так і в ПЧ. Загальний гетеродин мінімізує розсіювання потужності генератора, керованого напругою (VCO) / син-

тезатора, і мікросхему, а також запобігає перемиканню між кількома VCO на одному кристалі. Паралельні потоки з низьким перетворенням доставляються до секції основної смуги за допомогою аналого-цифрових секцій. Потім сигнали виявляються шляхом розкладання просторових і часових властивостей прийнятих сигналів. Крім того, виявлені сигнали комбінуються в залежності від формату їх кодування. Кодування може використовуватися для підвищення надійності, відомого як просторово-часове кодування, або може використовуватися для збільшення швидкості, що називається просторовим мультиплексуванням. Через наявність N -ної кількості елементів в цій архітектурі з'являється потреба в N -ній кількості елементів інтерфейсу SISO. Що досить сильно підвищує ціну приймача і збільшує його енергоспоживання. Також є проблеми з продуктивністю через завади РЧ, фазовий шум та дисбаланс I/Q. Перевагою цього типу приймачів є наявність переваг супергетеродинного інтерфейсу SISO.

Приймач прямого перетворення

Архітектура приймача прямого перетворення MIMO показана на рисунку 6.2. У цій конструкції використовується гетеродин на тій же частоті, що й вхідний РЧ-сигнал. Відповідно, він видаляє ПЧ і використовує менше компонентів порівняно з супергетеродинною архітектурою.

Більше того, розмір і вартість цієї архітектури зазвичай менші, ніж у супергетеродинного приймача. Однак у конструкції прямого перетворення є порушення зміщення постійного струму.

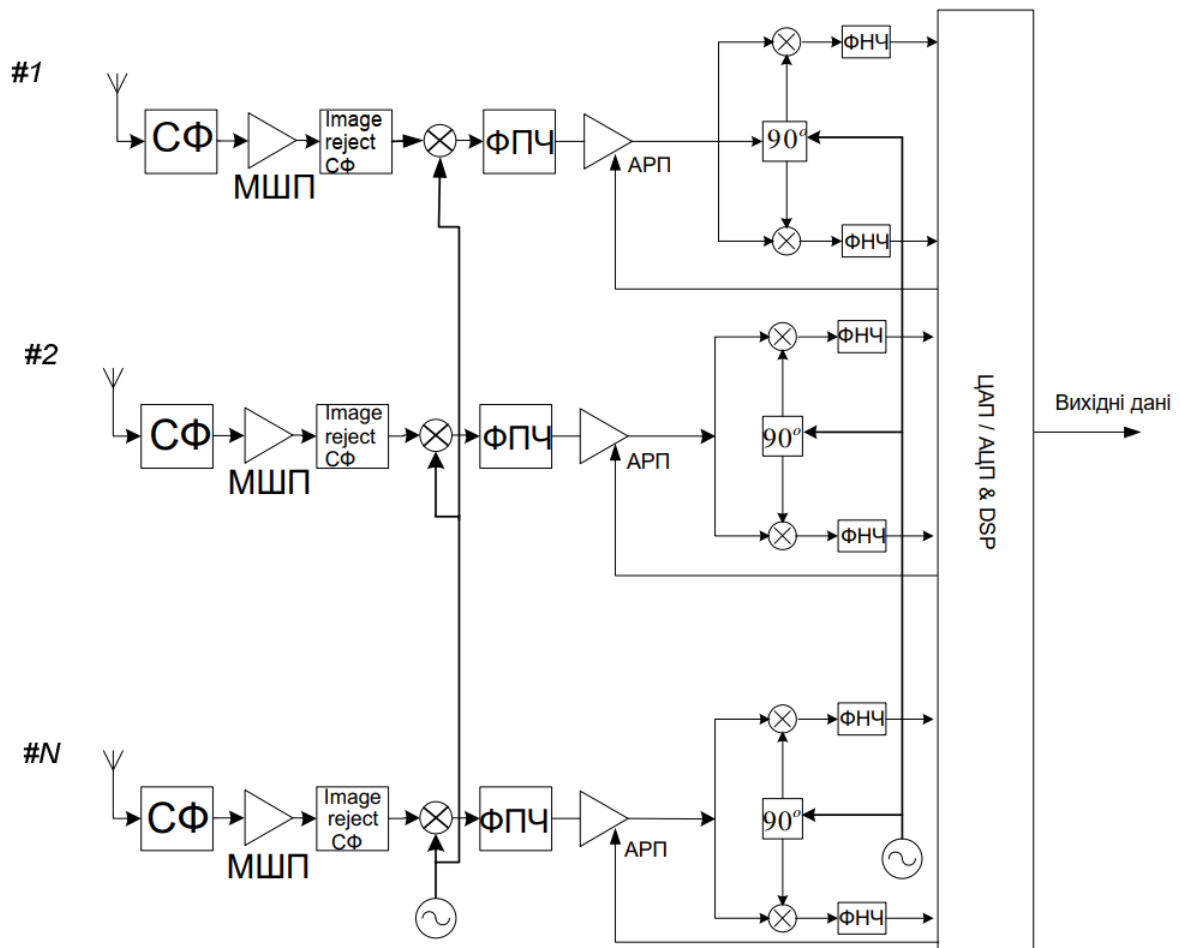


Рис.6.1 – Архітектура сепергетеродинного приймача МІМО [6]

Шестипортовий приймач MIMO

Архітектура шестипортового приймача МІМО представлена на рисунку 6.3. Ця архітектура, по суті, належить до класу прямого перетворення, де для перетворення РЧ сигналу в сигнали основної смуги використовується тільки гетеродин. Однак, завдяки використанню пасивних схем і детекторних діодів замість змішувачів, він обіцяє просту і недорогу реалізацію, особливо на високих мікрохвильових і міліметрових частотах. Крім того, ця техніка забезпечує менше споживання електроенергії в порівнянні з іншими конструкціями. Між тим, РЧ-завади в цій техніці подібні до тих, що в приймачах прямого перетворення.

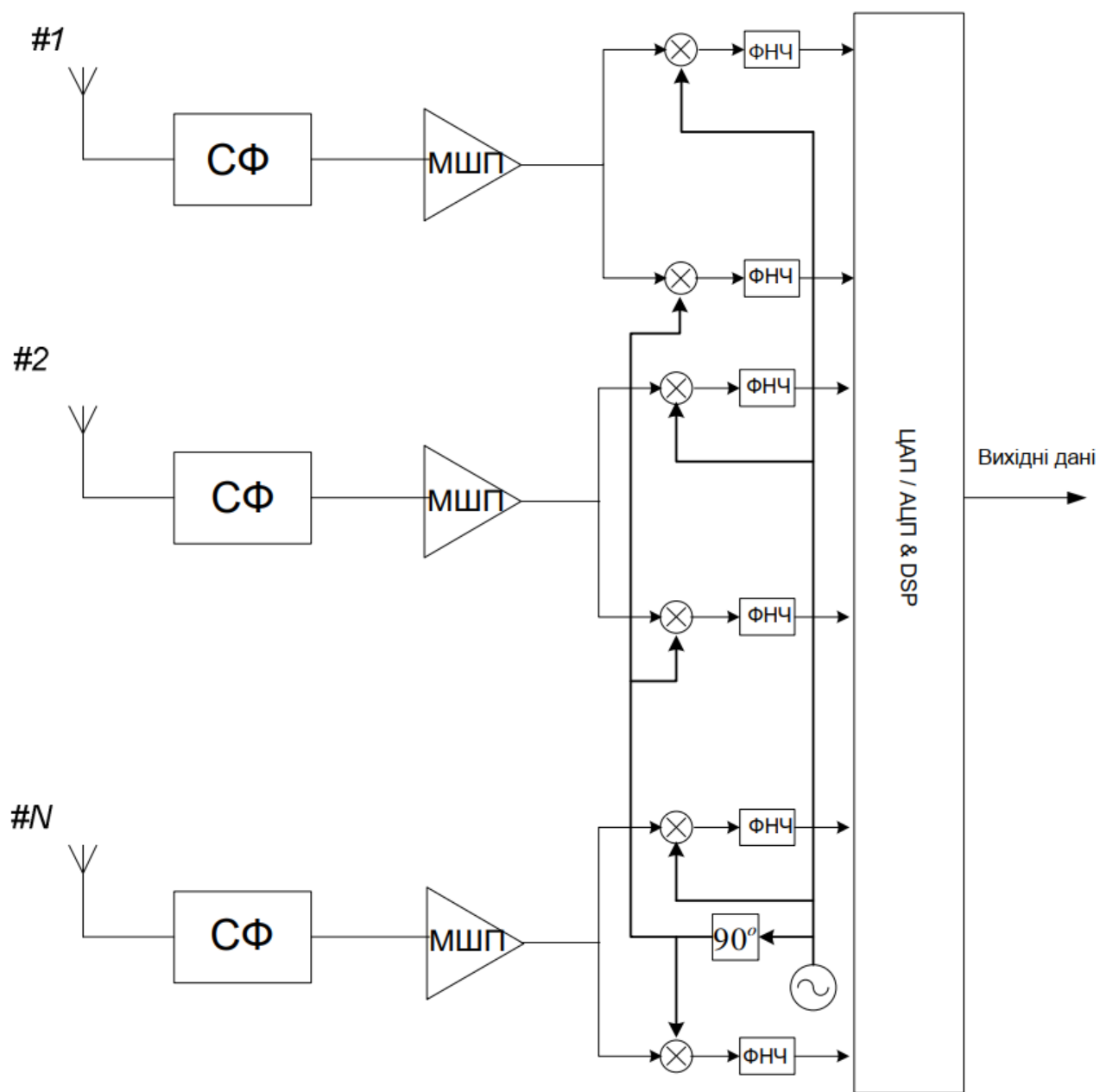


Рис.6.2 – Архітектура приймача прямого перетворення МІМО [6]

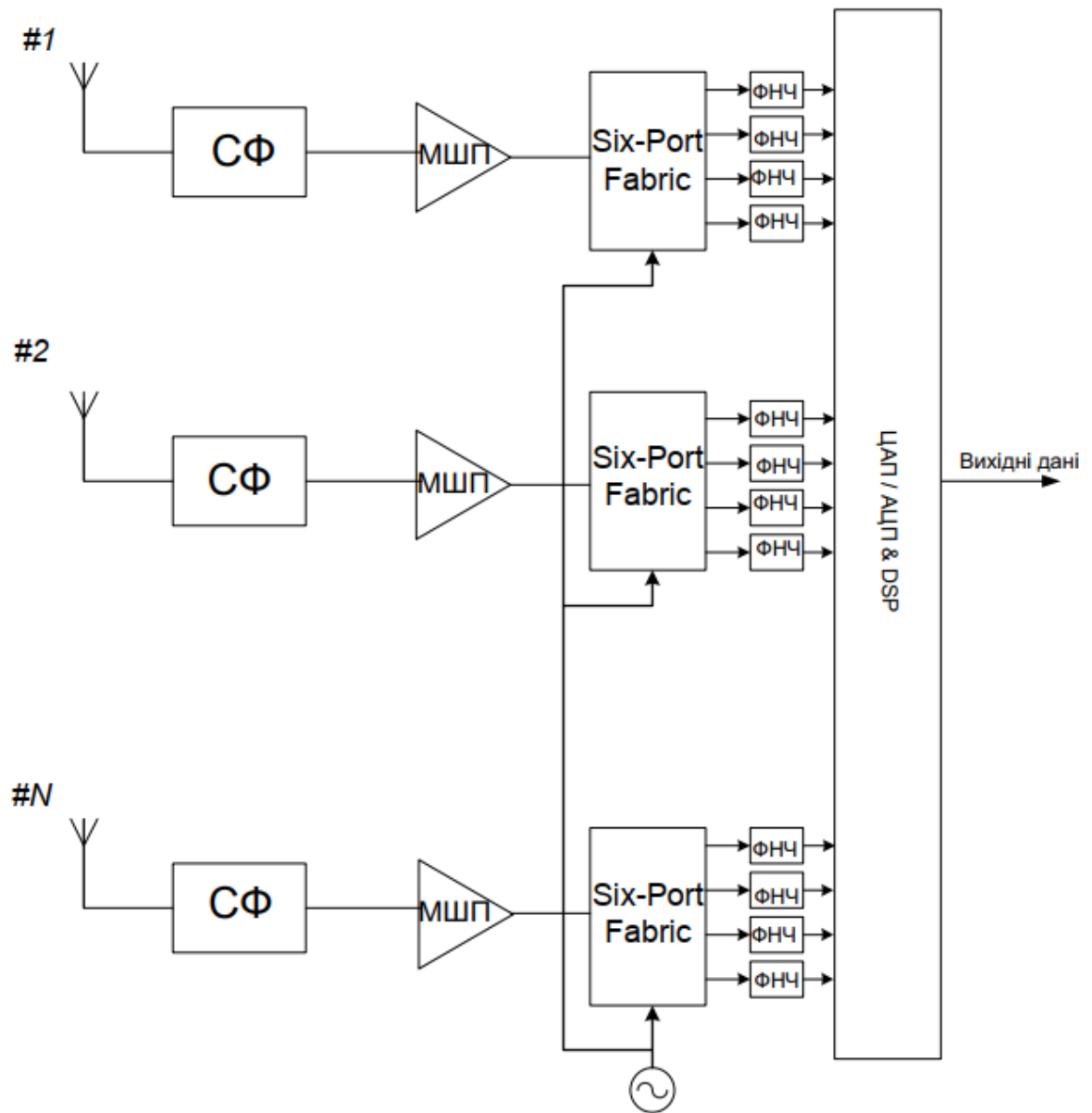


Рис.6.3 – Архітектура шестипорового приймача MIMO [6]

Як приклад реалізації приймача та передавача можна навести модулі 4x4 MIMO-трансивера, який є стендовим варіантом. Система спроектована з двох модулів і на базі двох мікросхем. Тобто не таким чином, яким ми плануємо розробити наш пристрій. Приймач як і передавач базується на раніше розглянутій супергетеродинній архітектурі.

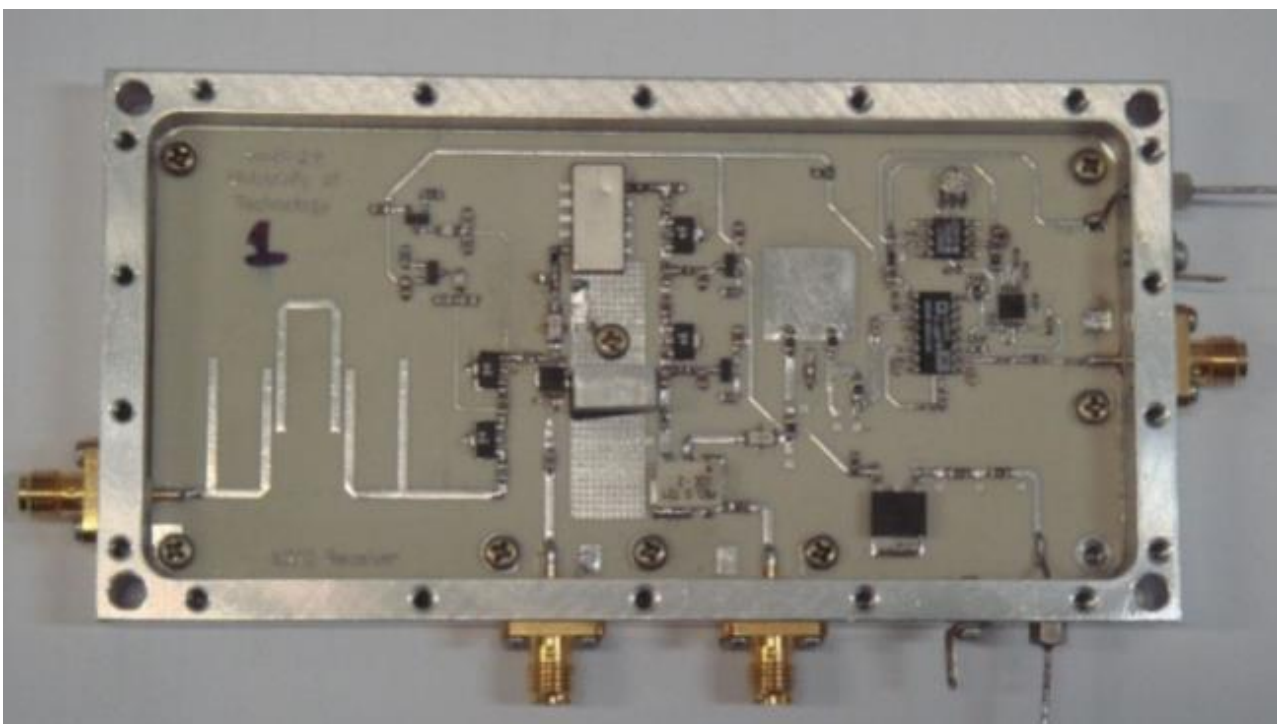


Рис.6.4 — Модуль приймача [6]

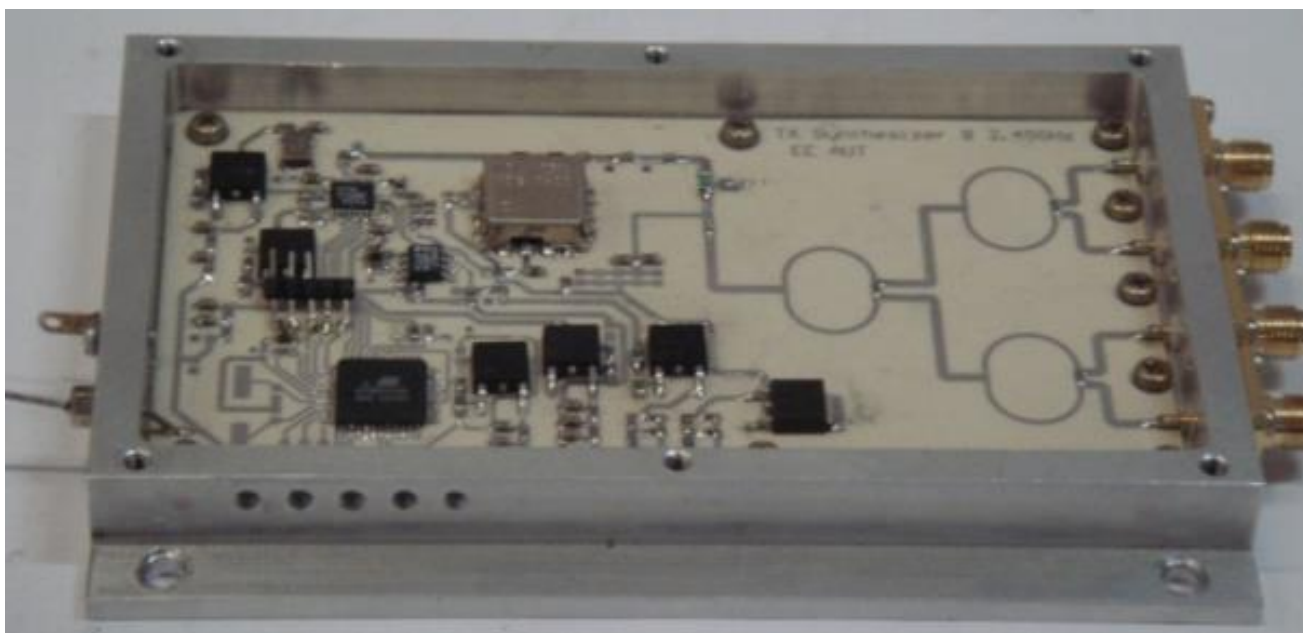
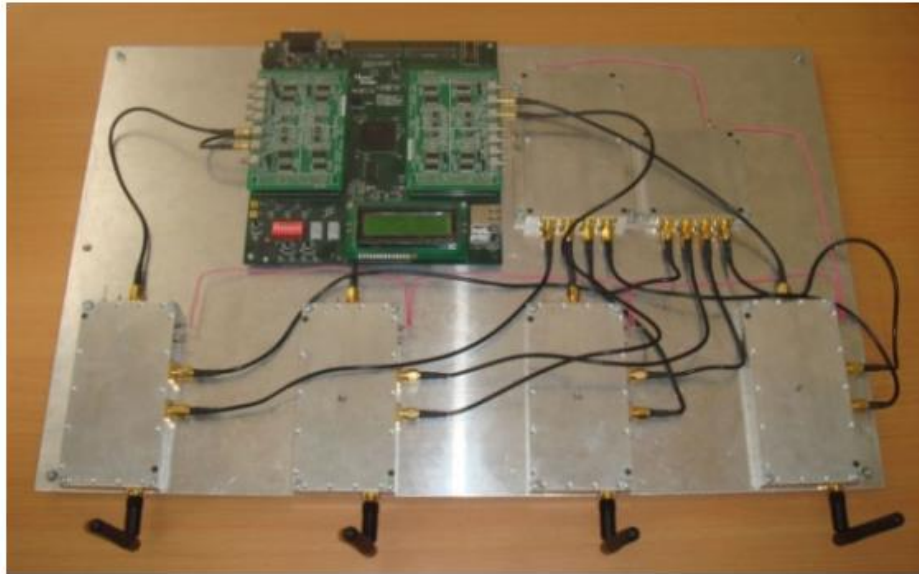


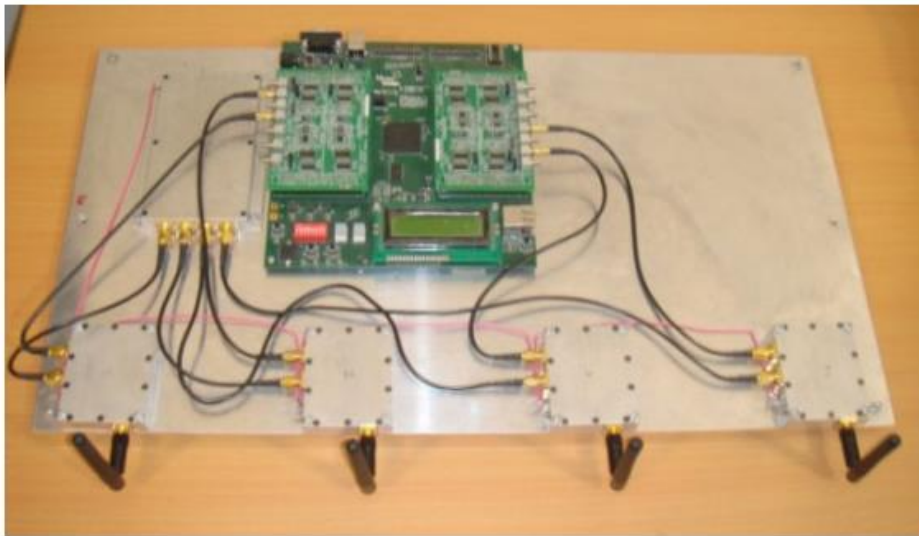
Рис.6.5 — Модуль передавача [6]

Модуль радіопередавача показано на рисунку 6.5. РЧ передавач складається з I/Q змішувача, загального генератора для всіх модуляторів і підсилювача потужності з максимальною вихідною потужністю 18 дБм. Вхідний сигнал на передавач блок живиться від ЦАП. Використо-

вується звичайний гетеродин з рівнем потужності -7 дБм забезпечують сигнали осцилятора для всіх шляхів.



(a)



(б)

Рис.6.6 — Повністю справні та підключені MIMO приймач(а) та передавач (б) [6]

РЧ-приймач складається із смугового фільтра (BPF), малошумного підсилювача (LNA), фільтра відхилення зображення (IMR), радіочастотного фільтра на понижуючий перетворювач ПЧ, двох загальних генераторів для всіх понижуючих

перетворювачів і підсилювач автоматичного регулювання посилення (AGC). Перший ступінь приймача – мікросмужка . Фільтр BPF для захисту наступного МШУ від блокування іншими радіопрограмами . Для додаткового придушення частотних сигналів зображення використовується фільтр IMR.

Зниження як на першу, так і на другу частоти ПЧ виконується за допомогою подвійного змішувача. Сигнали LO з рівнем потужності +12 і +7 дБм застосовується для першого та другого змішувачів відповідно. Смогова пилка (поверхнева акустична хвиля) фільтр застосовується на першому етапі ПЧ, щоб обмежити ширину смуги шуму РЧ система до 4 МГц і для фільтрації небажаних спектральних компонентів. Підсилювач AGC з динамічним діапазоном 68 дБ знаходиться в останньому ступені приймача. Сигнал ПЧ 10,7 МГц живить АЦП. Модуль РЧ-приймача показаний на рисунку 6.4.

1.4 Мікросхеми серії AFE76xx

Мікросхема серії AFE76xx об'єднує 4 аналого-цифрових перетворювача (АЦП), 4 цифро-аналогових перетворювача (ЦАП) і цикл фазової автосинхронізації (ФАПЧ) для генерації тактової частоти дискретизації. Основною перевагою цієї реалізації трансивера MIMO є високий рівень інтеграції, що полегшує розширення на більші антенні решітки за допомогою синхронізації кількох пристроїв на мікросхемі AFE76xx.

AFE76xx — це сімейство високопродуктивних, чотири/двоканальних, 14-розрядних, інтегрованих аналогових радіочастотних мікросхем. Що здатні синтезувати та оцифровувати широкосмугові сигнали. Високий динамічний діапазон дозволяє AFE76xx генерувати та оцифровувати сигнали 4G/5G для базових станцій. Сімейство AFE76xx має інтегрований DSA для каналів приймача, а також підтримує DSA еквівалент функціональності на каналах передавача. Кожен канал приймача має один аналоговий детектор пікової потужності РЧ і

різні цифрові детектори потужності, які допомагають автоматично регулювати посилення для каналів приймача, і два детектори перевантаження РЧ для захисту надійності пристрою. Сімейство мікросхем має 5 ревізій. Сімейство AFE76xx має 8 JESD204B-сумісних трансиверів SerDes, які працюють на швидкості до 15 Гбіт/с.

Пристрої підтримують частоту понад 1000 МГц Пропускна здатність радіочастотного сигналу в односмуговому режимі і до 800 МГц РЧ-сигнал пропускна здатність на діапазон у дводіапазонному режимі.

1.4.1 Основні характеристики

Діапазон радіочастот до 5.2ГГц

Максимальна ширина смуги:

- в 4-канальному режимі (4T4R) 800МГц (односмуговий) та 300МГц (двосмуговий)
- в 2-канальному режимі (2T2R) 1200МГц (TX)/1000МГц (RX) (односмуговий) та 800МГц (двосмуговий)

Число розрядів 14 для ЦАП (частота 9ГГц) та АЦП (частота 3ГГц)

Цифрова частина:

- 32-розрядний генератор NCO для DUC/DDC
- Коефіцієнти множення 6х, 8х, 9х, 12х, 16х, 18х, 24х, 36х
- Коефіцієнти розподілу /2, /3, /4, /6, /8, /9, /12, /16, /18, /24, /32
- динамічний перемикач RX/FB для TDD

Є вбудований синтезатор тактових частот ЦАП та АЦП

Напруга живлення 1.85В, 1.15В, 1.0В, -1.8В

Температурний діапазон від -40 ° С до 85 ° С

У моєму випадку мікросхема буде використовуватися в двоканальному режимі 2T2R (2 Transmitters 2 Receivers). Тобто буде використано 2TX (TXA, TXB) та 2RX (RXA, RXB), приклад конфігурації можна побачити на рисунку 7.1, для більшої конкретики буде використана мікросхема AFE7684, оскільки вона має потрібну кількість як приймачів так і передавачів (2T4R) але не уступає або перевищує по швидкості передачі на вході/виході іншим мікросхемам свого сімейства.

Табл.1— Сімейство мікросхем AFE76xx [12] :

DEVICE	# of TXs/RXs	# of DUCs/TX	# of DDCs/RX	MAX INPUT/OUTPUT DATA RATE (MSPS)
AFE7685	4T4R	1	1	750
AFE7686	4T4R	2	2	1500
AFE7684	2T4R	2	2	1500
AFE7683	2T4R	1	1	750
AFE7681	4T2R	1	1	750

1.4.2 Конфігурації

Використання саме варіанту конфігурації 2x2 MIMO-трансивера зумовлено також більш простою реалізацією. Але завдяки можливості масштабування кількість приймально-передаючих трактів можна збільшити, наприклад до конфігурації 6x6, як показано на рисунку 7.2. Тобто підключення мікросхем між собою відбувається за допомогою використання двох прийомних антен, які надалі не будуть використовуватися в цілях прийому сигналів від терміналів та 6 передавальних трактів, що власне підключаються (між антеною та підсилювачем потужності) до приймальних антен.

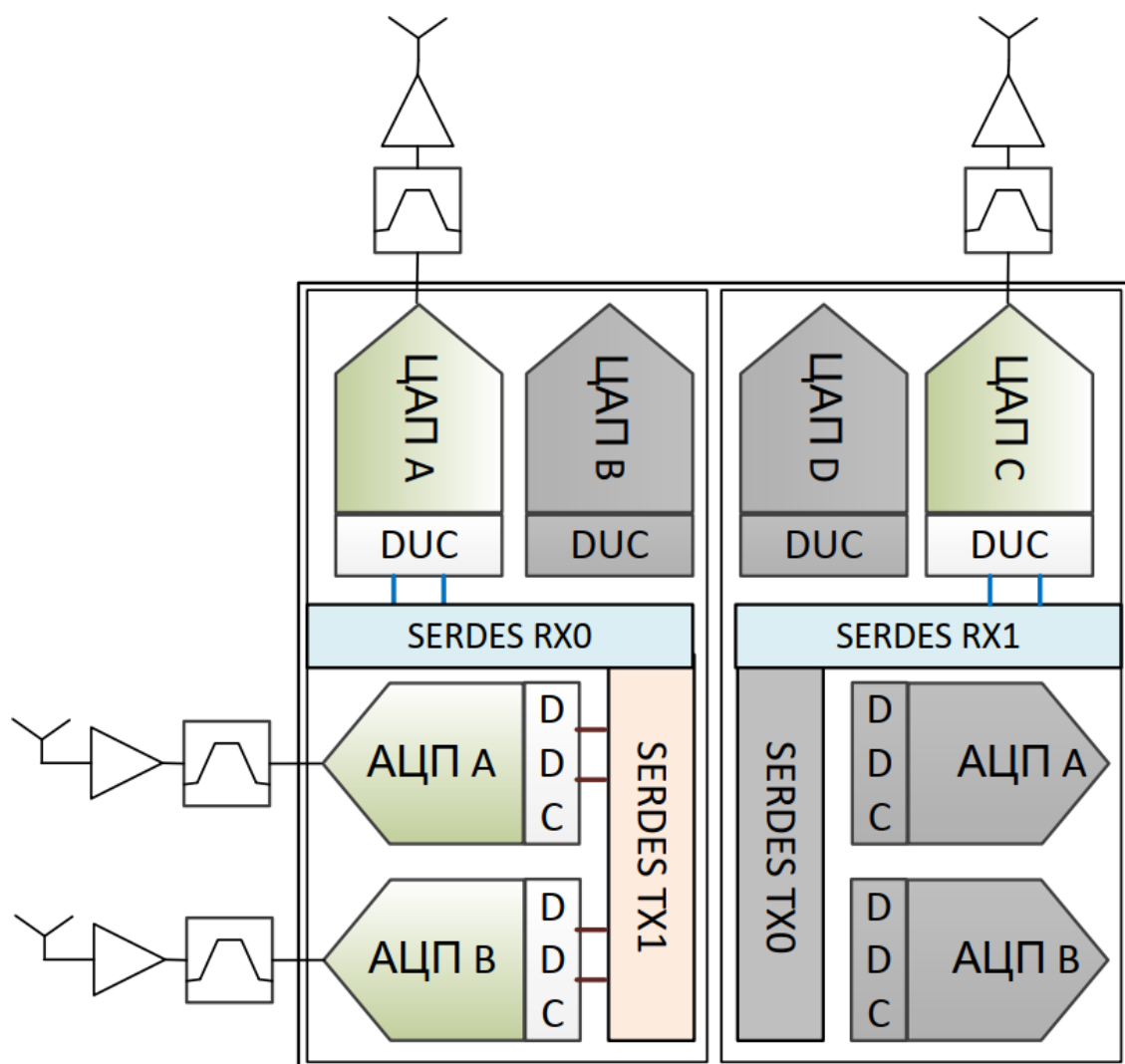


Рис.7.1 – 2T2R конфігурація мікросхеми AFE76xx [15]

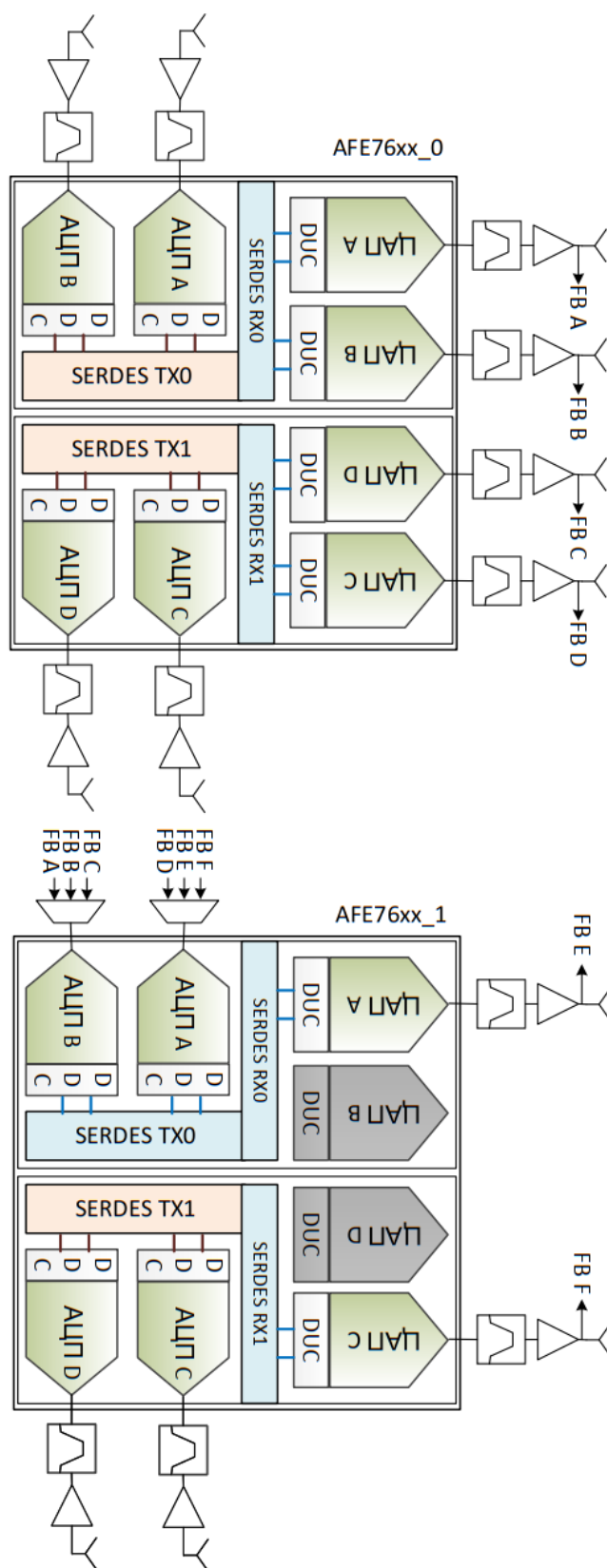


Рис.7.2 — Конфігурація 6T6R з двох мікросхем AFE76xx [15]

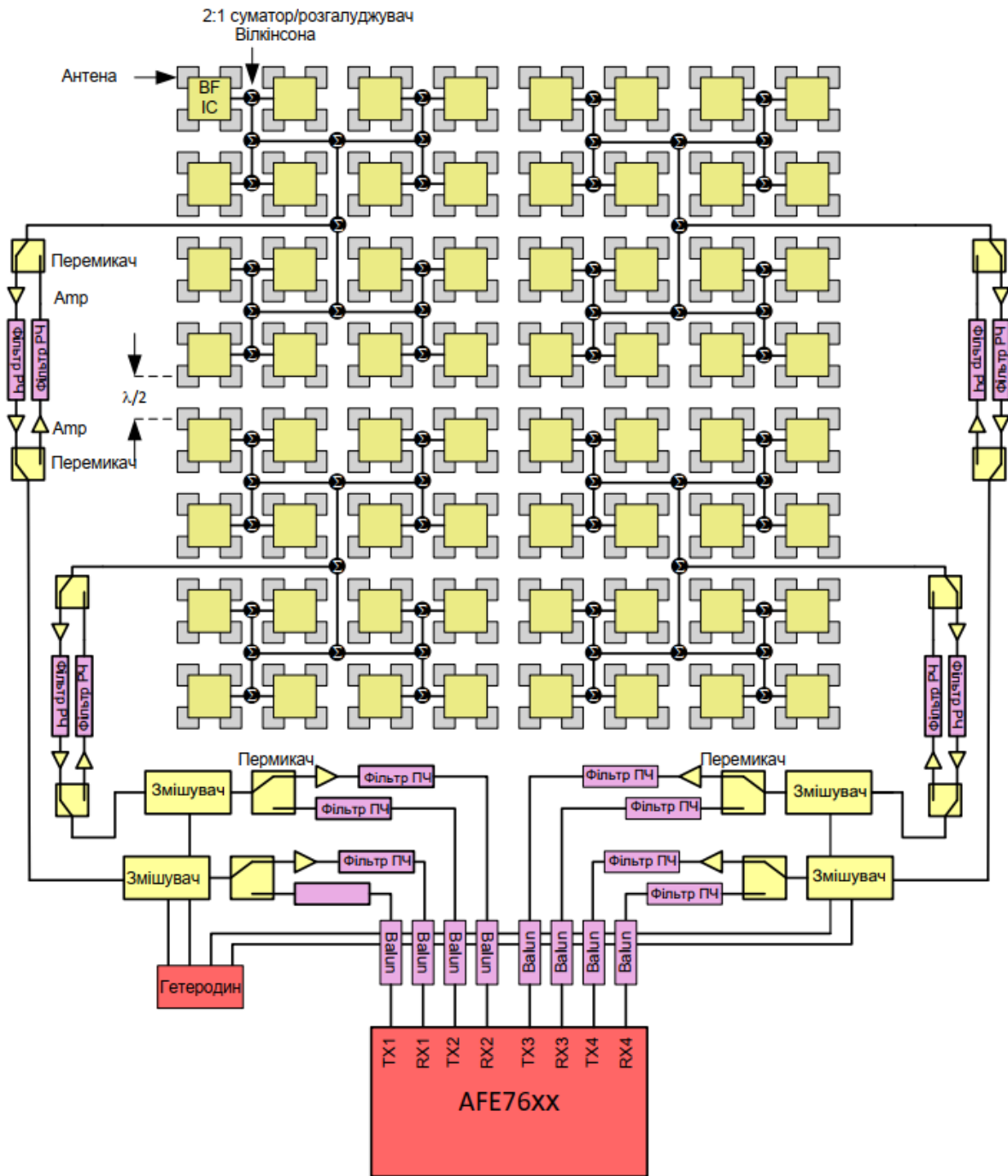


Рис.7.3 – Приклад архітектури 32x32 трансивера з антенною решіткою на базі AFE76xx [22]

1.5 Висновок

З проаналізованої літератури витікає, що потрібно обрати мікросхему – цифровий сигнальний процесор (DSP), інтегральну мікросхему (ASIC) або програмовану логічну матрицю (FPGA), а оскільки за нас це передбачено темою

роботи, то це питання можна вважати вирішеним – AFE76xx. Також потрібно обрати архітектуру, а нам чудово підходить варіант супергетеродинної архітектури як приймача так і передавача, про всі плюси було розказано вище. Також важливим є подолання перехресних перешкод, і це питання також може бути вирішеним, оскільки подібна проблема у вибраній мікросхемі вже зведена до мінімуму. Також була розглянута можливість масштабування MIMO-системи, адже саме за цією технологією майбутнє мережі 5G.

2 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ МІМО-ТРАНСИВЕРА

При розробці нової архітектури варто спочатку дізнатися про аналоги, тобто подивитись на готові рішення. У нашому випадку є декілька компаній, яку вже займались розробкою 2x2 МІМО-трансивера. У цій сфері найбільш продуктивними є такі компанії як NXP-Philips, MAXIM, PMC-Seirra та Analog Devices. Найбільш підходящим, і так мовити, опорним варіантом можна обрати пристрій від Analog Devices - AD9356. Його архітектура (Рис.8) є найбільш схожою на ту, яка повинна бути у цій роботі. Однією з найголовніших відмінностей є використання перемикачів на антенах прийому/передачу, що буде заважати одночасному прийому та передачі сигналів, у нашому випадку цей варіант не буде використовуватись, саме щоб уникнути подібних проблем.

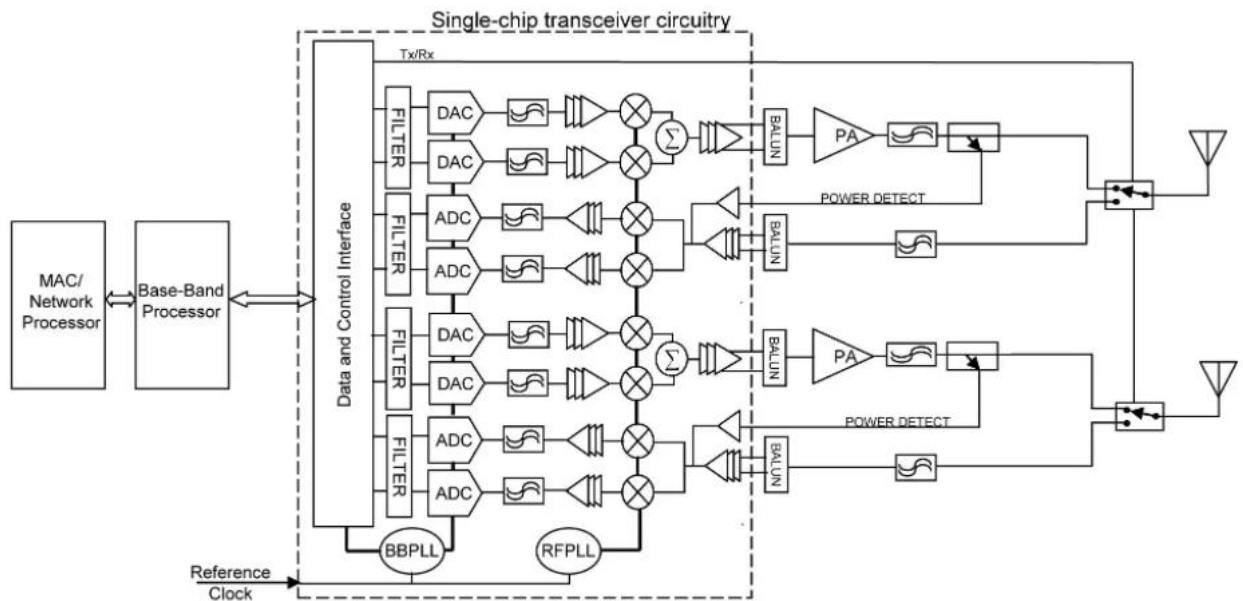


Рис.8 — Архітектура AD9356 МІМО-трансивера малих БС [6]

Розробка архітектури пристрою починається з визначення трьох основних функціональних частин/блоків. У нашому випадку це мікросхема трансивера (AFE76xx), канал синхронізації та антенна система прийому/передачі.

2.1 Обґрунтування вибору мікросхеми із серії AFE76xx

Трансиверний вузол є найважливішою частиною БС та визначає всі важливі характеристики мережі. Трансивер, що входить до складу БС, забезпечує високошвидкісну передачу даних та службової інформації між вузлами мережі. Енергетичні характеристики трансивера, дозволяють встановлювати стійке з'єднання між БС на відстані до 500 м на відкритому просторі. Враховуючи що БС можуть розташовуватися на території довільно і взаємно впливати один на одного, тобто бути джерелами взаємних перешкод, трансивер повинен мати можливість просторової селекції по прийомному та передавальному каналу.

Опишемо роль та функції блоків мікросхеми (рис.9.1). У нас є ЦАП, АЦП, DUC, DDC, DSA, SerDes, NCO. Оминаючи функціонал знайомих блоків таких як АЦП, ЦАП – почнемо опис з DSA.

DSA – цифровий ступінчастий атенюатор. DSA (Digital Step Attenuator) надзвичайно точні, що дозволяють точно налаштувати значення ослаблення DSA до бажаного рівня. Крок і абсолютна точність дуже добре зберігаються при температурі (від -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$), що допомагає розробникам спростити інтерфейс програмного забезпечення.

DDC – Цифровий понижуючий перетворювач, що перетворює оцифрований сигнал з обмеженою смугою частот у сигнал нижчої частоти з нижчою частотою дискретизації, щоб спростити наступні радіоманіпуляції. Процес може зберегти всю інформацію в діапазоні частот корисного вхідного сигналу.

DUC – Цифровий підвищуючий перетворювач є електронною схемою, яка перетворює цифровий сигнал основної смуги в високочастотний сигнал у проміжній частоті (смуговий сигнал) або безпосередньо в високу частоту для випромінювання.

SerDes (Serializer/Deserializer) – пара функціональних блоків, які зазвичай використовуються у високошвидкісному зв'язку, для перетворення даних між послідовним і паралельним інтерфейсами в обох напрямках. Термін "SerDes" відноситься до узагальнених інтерфейсів, що використовуються в різних технологіях та додатках. Основне використання SerDes – забезпечення високошвидкісної передачі даних по одиночній лінії або диференціальній парі для зменшення кількості контактів введення/виводу мікросхеми і з'єднань між компонентами.

NCO(numerically-controlled oscillator) - це генератор, фаза або частота якого керуються в межах характеристик. Осцилятор із числовим керуванням є програмованим генератором лінійної частоти.

Важливим є процес налаштування мікросхеми. Потрібно використовувати розроблене компанією TI ПЗ. Використовуване програмне забезпечення складається з HSDCPRO (використовується для зв'язку між ПК та TSW14J56EVM для передачі даних), графічний інтерфейс AFE76xxEVM (використовується для налаштування AFE76xxEVM).

AFE76xxEVM – умовний програматор зображений на рисунку 9.2 для налаштування мікросхем сімейства AFE76xx. В ньому вже використовується підсилювачі у антенному тракті, є вихід для підключення опорної частоти та генератор тактової частоти.

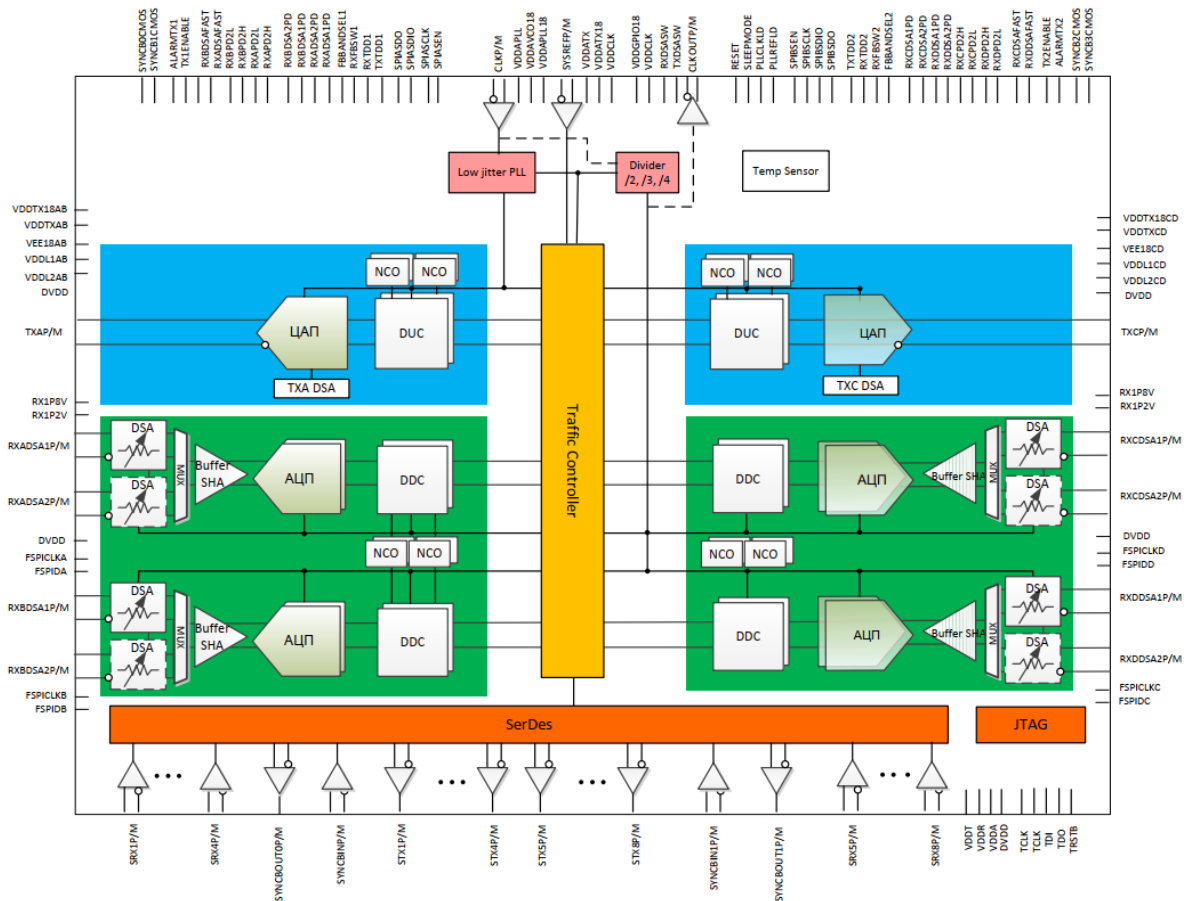


Рис.9.1 – Функціональна блок-схема AFE7684 [12]

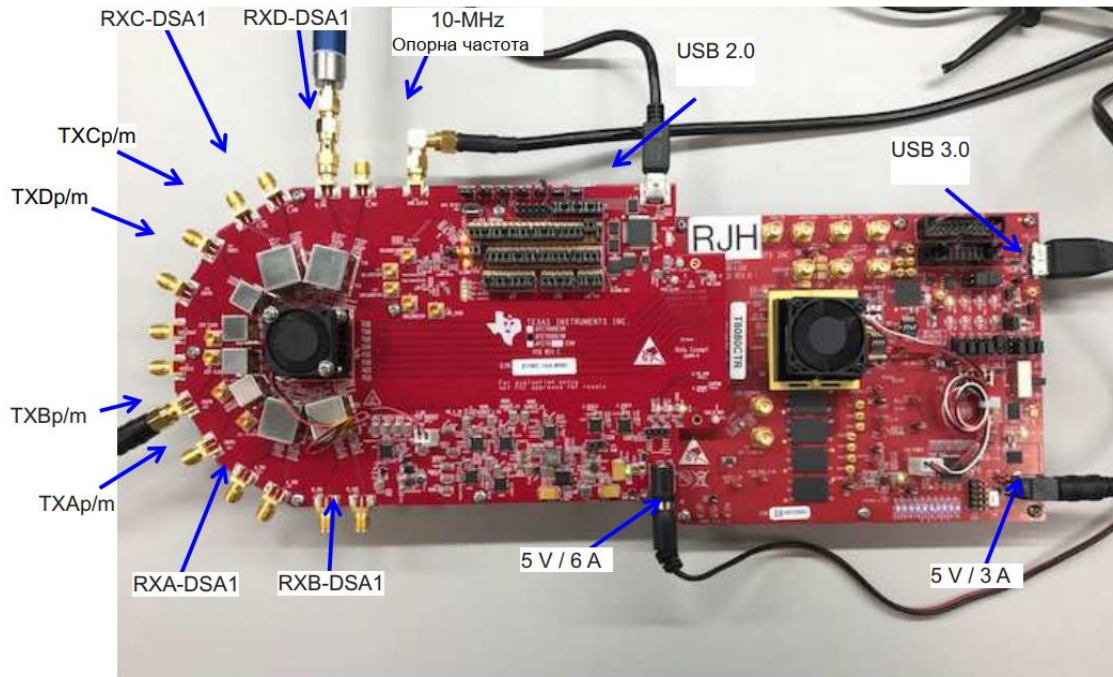


Рис.9.2 – AFE76xxEVM [15]

2.2 Вибір структури та параметрів блоку синхронізації

Синхронізація — процес встановлення та підтримки тимчасових співвідношень (взяття відліків) між двома і більше системами, що у процесі синхронної передачі цифрових даних. При синхронній передачі даних виникають ситуації, коли приймач і передавач працюють не в такт (частота формування сигналу в канал зв'язку не збігається з частотою опитування даних на приймальній стороні), що призводить до неузгодженості системи передачі та прийому даних, і до виникнення помилок у прийнятих даних .

У цьому пристрої за синхронізацію відповідатиме ультра малошумний JESD204B-сумісний очищувач тактового сигналу з інтегрованим VCO0 від 2370 до 2630 МГц. Це програмована мікросхема генерації тактової частоти LMK04828. Також потрібно зауважити, що виробник рекомендує використання у ролі генератора тактової частоти саме цю мікросхему. Також вже достатня кількість літератури та документації щодо підключення цієї мікросхеми до AFE76xx.

2.3 Вибір структури та параметрів антен

Антенна система вузла формує кругову діаграму спрямованості у горизонтальній площині та 10-12 градусів у вертикальній площині. Таким чином забезпечується можливість роботи БС без попереднього юстування, як у режимі кінцевої станції і в режимі ретранслятора. Для забезпечення вирішення проблеми частотного планування антенна система автоматично за командою мікропроцесорного модуля змінює частоти дуплексної пари залежно від положення БС усередині магістральної мережі. Тим самим виключається механічна заміна НВЧ фільтрів і необхідність мати кілька видів частотно-залежних компонентів у системі. Для отримання посилення системи, необхідного для стійкої роботи на відстані до 500м, як передавальна і приймальна частина антенної системи формується з

керованих антенних масивів, що утворюють від 4х до 8ми секторів. Діаграма спрямованості кожного антенного масиву керується контролером. Масиви приймання і передачі незалежні, залежно від розкладу передача може вестись в одному напрямку, а прийом в іншому. Причому не лише всередині одного сектора, а й у різних секторах. Кількість секторів залежить від конструкції керованого масиву антен та кількості антенних елементів у масиві. Кожен сектор обслуговує окремий канал трансивера і складається з смугових фільтрів, малошумного підсилювача (LNA), підсилювача потужності (PA). LNA, PA працюють на лінії живлення антенних елементів. Така конструкція дозволяє не лише уніфікувати всі вузли антенної системи, але й синтезувати необхідну діаграму спрямованості, концентруючи випромінювання в просторі в потрібному напрямку і послаблюючи сигнали з напрямків, що заважають. В рамках аналізу та вибору антенних систем діапазону міліметрових хвиль для використання в 5G мережі були розглянуті секторні, рупорні антени, параболічні антени та планарні друковані антени. В результаті аналізу аналізованих типів антен зроблено вибір на користь використання планарних друкованих антен. Цей тип антен відповідає всім критеріям, а технологія виготовлення мало відрізняється від технології виготовлення традиційних друкованих плат. Але такий варіант передбачає використання важкого мікропроцесорного управління. Тому для спрощення розробки в умовах ДР доцільним можна вважати використання секторних антен, подібних тим, що зображені на рисунку 10.1 та 10.2. Саме такі антени при правильному взаємному розміщенні можуть дати досить хороший результат в плані покриття як в горизонтальній площині так і в вертикальній. Крім того при конструюванні ми зможемо вмістити плату трансивера прямо в корпус антени, або ж зробити новий корпус, де плата буде розміщена збоку, що буде виглядати досить естетично та ергономічно.

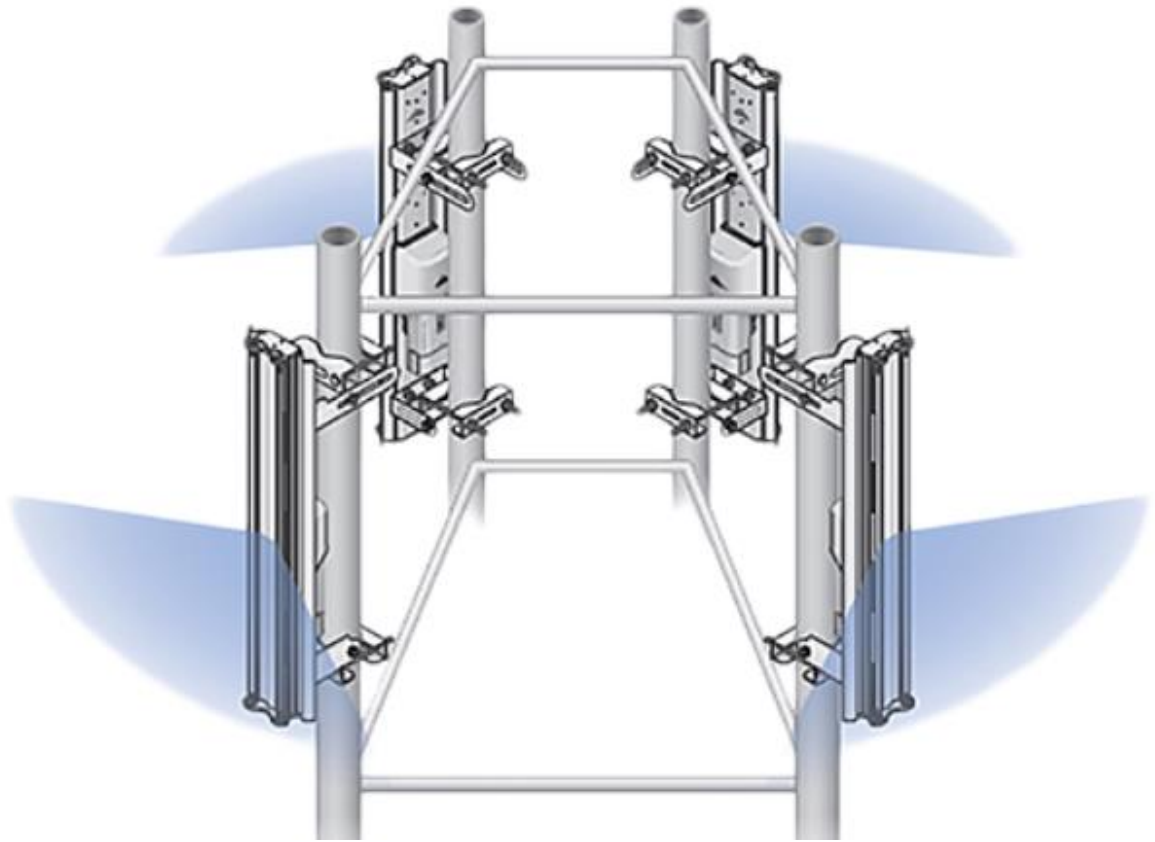


Рис.10.1 – Збірка 4 секторних антен з покриттям 360° в горизонтальній площині.

Зона покриття секторних антен визначається проекцією діаграми спрямованості на землю, яку можна регулювати зміною кута нахилу антени вниз. У деяких моделях це робиться механічно шляхом ручного регулювання нахилу антени за допомогою регульованого монтажної кронштейна. У новітніх секторних антенах діаграму спрямованості можна електронно нахиляти за допомогою регульованих фазообертачів у живленні окремих дипольних елементів антени. Вони регулюються схемою дистанційного керування з землі, усуваючи потребу в техніці для підйому на антенну вежу. Для забезпечення 360-градусного покриття використовуються кілька секторних антен, які встановлюються спиною до спини.



Рис.10.2 – Класичний вигляд секторної антени та метод її кріплення.[13]

Це довгі вузькі антени з високим коефіцієнтом посилення. Секторні антени зазвичай складаються з масиву диполів, розміщених перед фігурним відбивачем. Розмір і форма відбивача визначає продуктивність цих антен. Відбивач зазвичай плоский з деякими виступами або іншими ознаками по краях.

Секторна антена майже завжди класифікується за шириною променю азимуту площини 3 дБ. Вони зазвичай доступні з напрямком 60 градусів, 90 градусів і 120 градусів. Сектори зазвичай розгортаються вище в повітрі, а висота розгортання допомагає вибрати потрібну антену, оскільки це впливає на посилення та дальність антени.

Основний відбиваючий екран секторної антени складається з алюмінію, а антена має обтічник, який зазвичай виготовляється зі скловолокна, що забезпечує безпеку компонентів всередині антени та дозволяє антені витримувати суворі погодні умови. Секторні антени широко використовуються для стільникового зв'язку. Найбільше ці антени використовують для сайтів базових станцій стільникового телефону.

2.4 Висновок

Переглянувши уже готові інженерні рішення краще конкретизували для себе логіку певних рішень, як архітектурних, так і структурних /конструкторських. Ми краще розібралися у структурі власне трансивера, оскільки більш детально була розібрана мікросхема, зроблені висновки та рішення щодо використання антени та блоку синхронізації.

3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ПРИСТРОЮ ТА ЙОГО ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ

3.1 Розробка схеми живлення

Пристрій буде підключений до загальної постійної напруги 5В-5.6В з подальшим розбиттям напруги на кожен окремий пін мікросхеми через перетворювачі напруги. Окрім цього кожна мережа живлення повинна містити феритові кільця (FB) для ізоляції від інших мереж, групу обхідних конденсаторів біля пінів мікросхеми та перетворювачів постійного струму.

LDO мають низький рівень шуму і не мають стрибків частоти перемикавання, що є критичним для продуктивності системи дискретизації РЧ; однак LDO мають меншу ефективність через транзистор внутрішнього регулювання. Проблема розсіювання тепла, викликана низькою ефективністю, створює велику проблему для запобігання перегріву друкованої плати. Пристрій використовує перетворювачі DC-DC для заміни LDO, що покращує енергоефективність системи без жертвуючи продуктивністю.

За перетворення напруги відповідатимуть синхронні понижувальні перетворювачі TPS56121, TPS62160, TPS62480 та LDO-перетворювач з низьким струмом власного споживання та малим падінням напруги, а саме TPS7A8300(Рис.15). Завдяки широкому діапазону робочої вхідної напруги від 3 В до 17 В, пристрої ідеально підходять для систем, що живляться від літій-іонної або іншої батареї, а також від проміжних шин напругою 12 В.

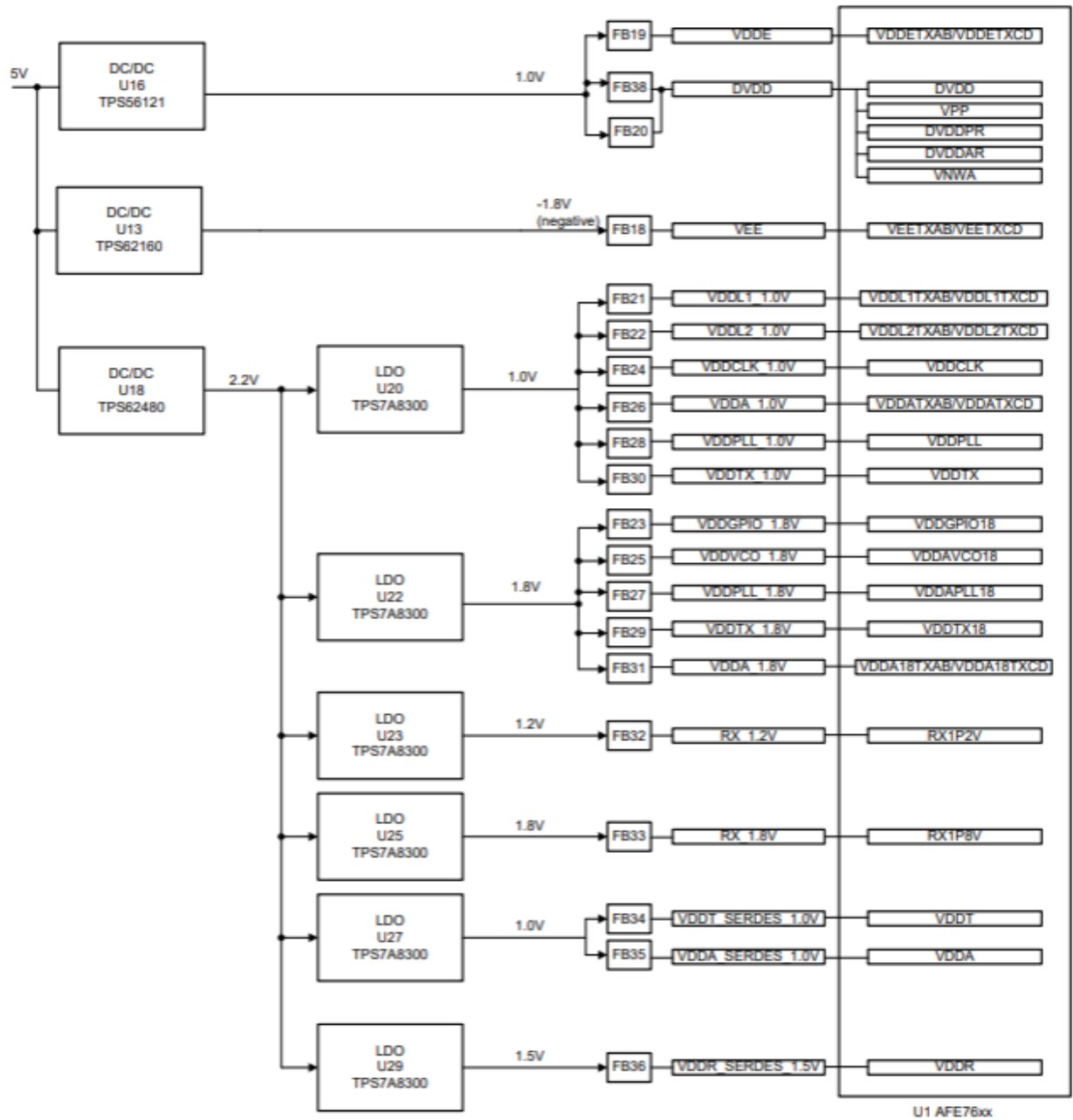


Рис.11 – Дерево живлення AFE76xx. [14]

Теоретично, я вважаю ідеальним варіантом змішане живлення пристрою, а саме, робота від напруги що подається напряму від «розетки»(це може бути живлення від системи електропостачання вуличного ліхтаря) і живлення від акумуляторів, що в свою чергу заряджається від сонячної батареї.

3.2 Розробка блоків приймального та передавального тракту

Підключення антени відбувається через так званий балун (balun) – симетруючий пристрій, що перетворює електричний сигнал з симетричного (balanced) на несиметричний (unbalanced) і навпаки. Також потрібен буде підсилювач потужності, малошумлячий підсилювач та смуговий фільтр.

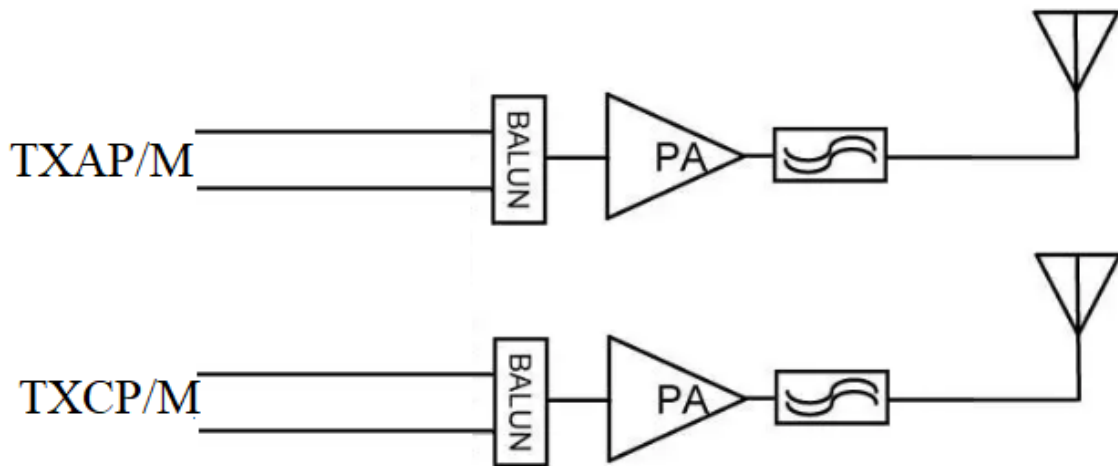


Рис.11.1 – Передавальний тракт MIMO-трансивера

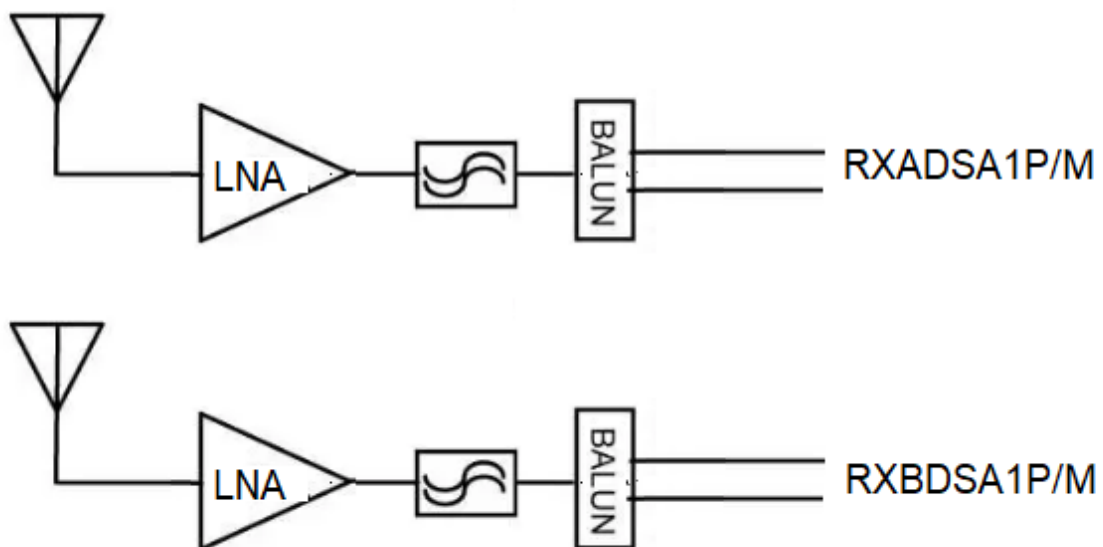


Рис.11.2 – Приймальний тракт MIMO-трансивера

Окрім того важливим є шлях даних як від мікросхеми до передавача, так і від приймального тракту в мікросхему, як зображено на рисунках 11.3 та 11.4.

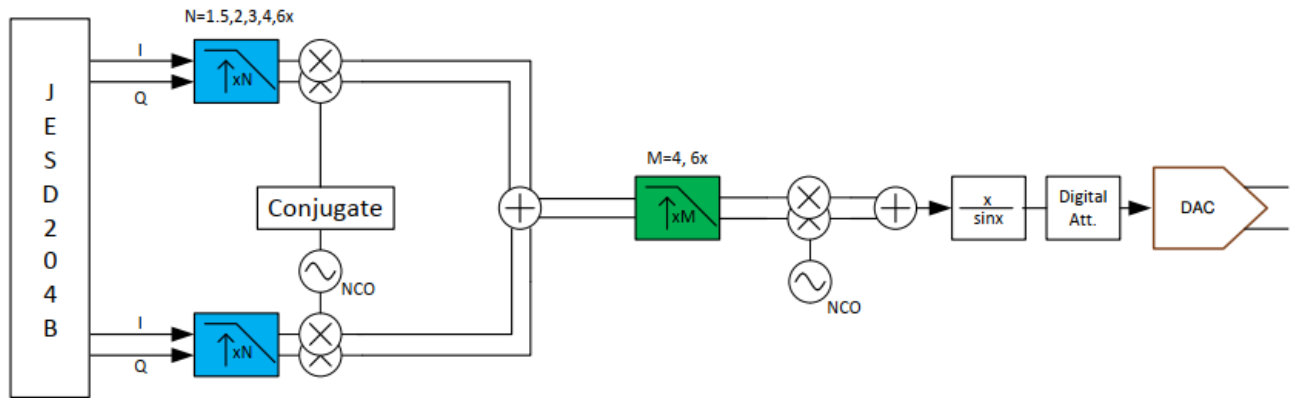


Рис.11.3 – Шлях даних передавача до мікросхеми.[21]

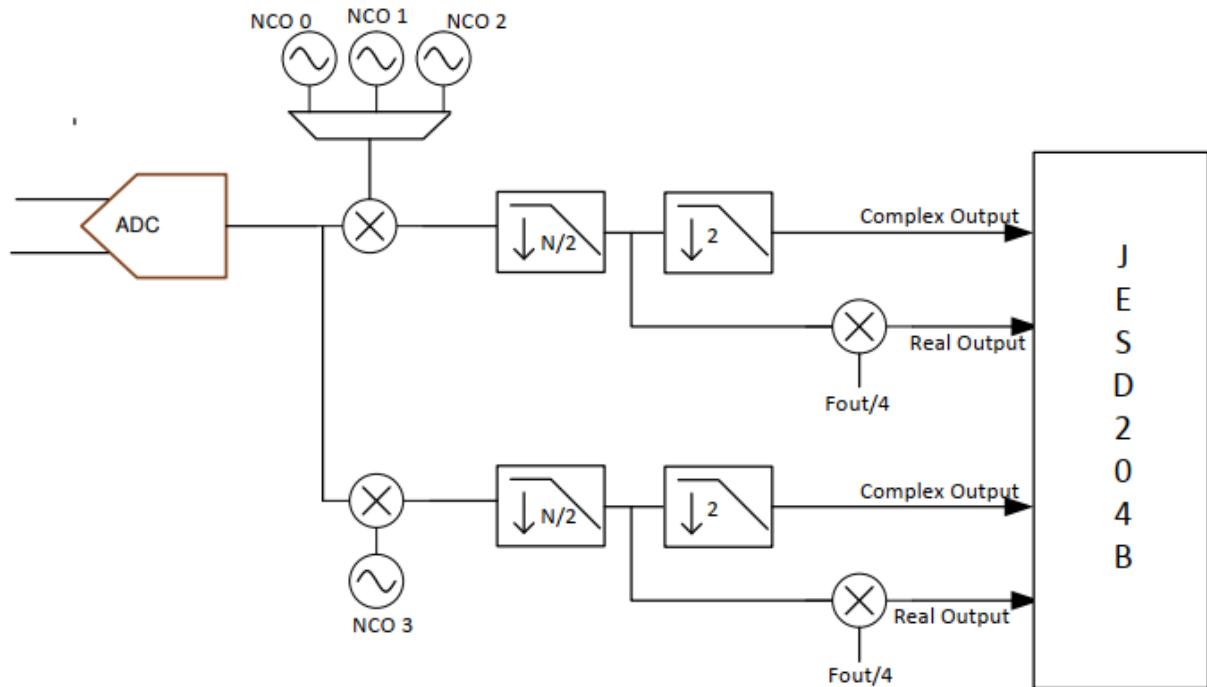


Рис11.4 – Шлях даних приймача до мікросхеми.[21]

3.3 Канал синхронізації

Генератор тактової частоти (генератор тактових імпульсів) — електронний генератор, призначений для генерації електричних тактових імпульсів заданої частоти (зазвичай прямокутної форми) для синхронізації сигналів та процесів в цифрових пристроях — ЕОМ, електронних годинниках і таймерах, в мікропроцесорній та іншій цифровій техніці. Тактові імпульси часто використовуються як еталонна частота — рахуючи їх кількість, можна, наприклад, вимірювати часові інтервали.

В мікропроцесорній техніці один тактовий імпульс, як правило, відповідає одній базовій операції. Обробка однієї інструкції може проводитися за один або кілька тактів роботи мікропроцесора, в залежності від архітектури і типу інструкції. Частота тактових імпульсів визначає швидкість обчислень.

В складних пристроях тактовий генератор одночасно генерує декілька імпульсів, зміщених один відносно одного по фазі, що дозволяє синхронізувати елементи таких пристроїв та уникати «перегонів» сигналів. Багатофазні тактові генератори, наприклад, використовуються в апаратних системах з конвеєром команд. Зміщення імпульсів по фазі досягається поділом частоти або лініями затримки сигналу.

У нашому випадку «серцем» каналу синхронізації буде ультра малошумний JESD204В-сумісний очищувач тактового сигналу з інтегрованим VCO0 від 2370 до 2630 МГц. Це програмована мікросхема генерації тактової частоти LMK04828.

Підключення до мікросхеми трансивера буде відбуватись по трьом основним контактам. Синхронізації, прийому та генерації тактової частоти. На мік-

росхемі генератора ці контакти відповідно мають назву SYNC/SYSREF_REQ, CLKin0 та DCLKout 0 . Підключатися будуть до контактів трансивера SYSREFP/M, CLKOUTP/M та CLKP/M відповідно.

SYNC/SYSREF_REQ – вхід синхронізації. Може використовуватися для скидання подільників, запуску імпульсу SYSREF або запиту безперервного SYSREF від роздільника SYSREF. Полярність контактів контролюється налаштуваннями регістра. Номінальний спад – 160 кОм.

Всі плаваючі піни повинні бути підключені згідно специфікації, залишитися плаваючими, підключеними на землю через конденсатори різної ємності.

3.4 Висновок

У ході третього розділу був вибраний генератор тактового сигналу, за рекомендацією розробників мікросхеми AFE76xx, конструкція прийомно-передавального тракту, що складається з смугового фільтру, PA, LNA та розроблена схема живлення власне трансивера.

4 КОНСТРУКЦІЯ

Перед виготовленням конструкції пристрою потрібно дізнатись про умови його експлуатації. Раніше було вирішено, що пристрій планується кріпитися до вуличних ліхтарів або ж подібних їй конструкцій. З цього можна зробити висновок, що виріб буде знаходитись у постійному зв'язку з погодними умовами. Тобто на нього будуть впливати як дощ, град, сонячне світло так і інші природні чинники, від яких і потрібно захистити трансивер.

Оскільки це досить класична та майже вирішена задача, оскільки ринок МБС має достатню кількість представників, у кого можна подивитись на метод реалізації конструкції пристрою.

Конструкція пристрою досить проста, це корпус з можливістю закріплення на обраних конструкціях або поверхнях описаних вище. Також в корпусі має бути передбачені отвори для конекторів.

Подивившись на аналоги корпусів БС, було вирішено використовувати в якості корпусу пластик, що буде витривалим до погодних умов та впливу ультрафіолету. Колір має бути білим, щоб забезпечити мінімальну температуру корпусу при будь яких умовах сонячного світла. Також корпус має бути з захистом вологи стандарту, щонайменше IP66, найкраще буде IP68. Тобто між кришкою та корпусом має бути передбачена вологостійка (резина/силікон) «прокладка». Крім того важливим є метод кріплення. Краще за все використовувати класичний метод установки БС та МБС, тобто на гвинти передбаченого в корпусі діаметру та кріплення на круглу мачту або стіну.

Загалом вигляд пристрою планується досить примітивним, подібним до аналогів. А саме білого блока зі скошеними кутами. Також має бути кришка, яку можна зняти для доступу і обслуговування плати БС.

За допомогою програмного забезпечення Blender було виконано тривимірне проектування вигляду БС закріпленої на конструкції(вуличний ліхтар) на рисунку 12.1 та загального виду на рисунку 12.2.



Рис.12.1 – БС закріплена на конструкції

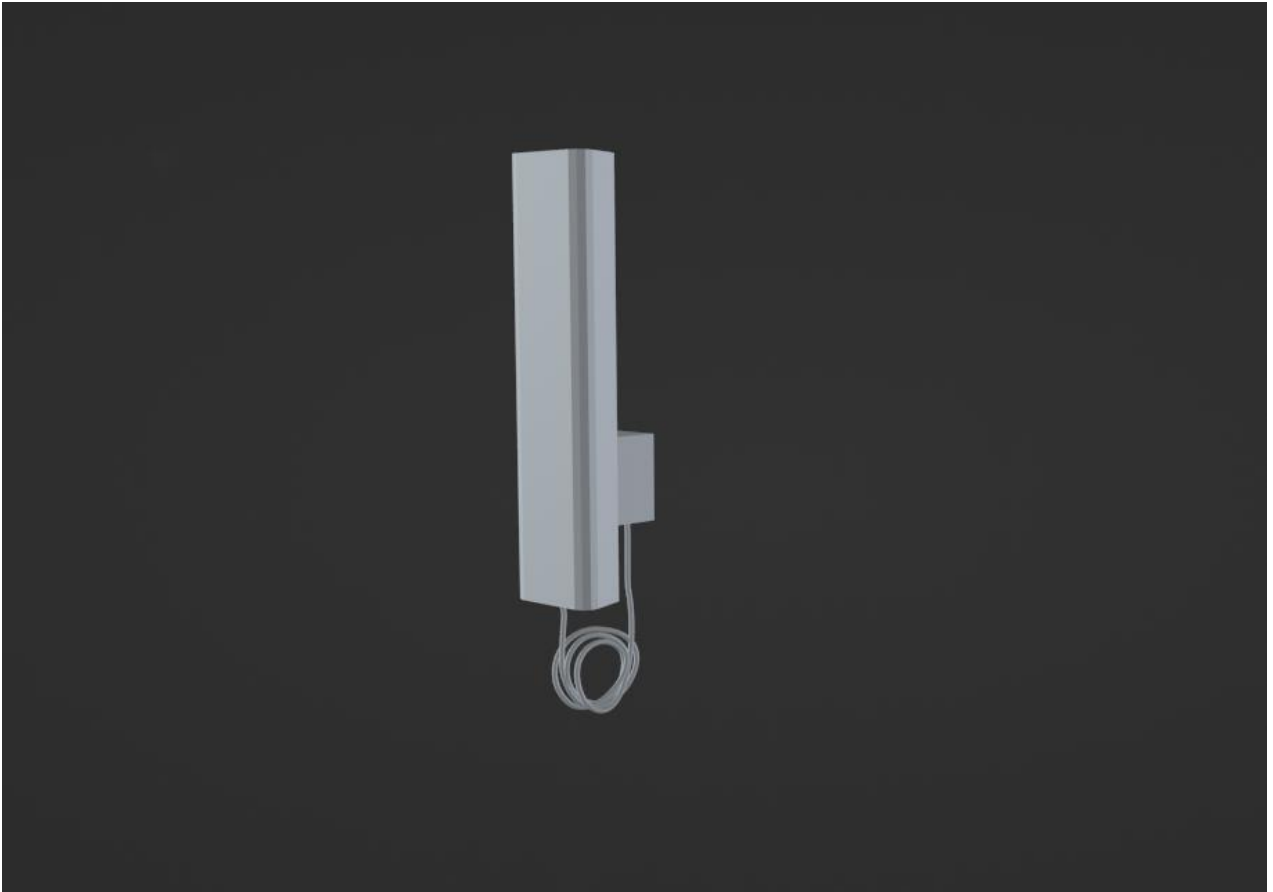


Рис12.2 – Загальний вид конструкції БС

4.1 Висновок

Загальні уявлення про варіанти конструкції подібних пристроїв, здобуті при перегляді аналогів допомогли у розробленні конструкції. Оскільки спосіб та місце кріплення є досить зручним, а форма трансивера зовнішньо не виділяється – це може сприяти швидшому розширенню мережі.

5 ЗАКЛЮЧЕННЯ

Отже, на початку виконання були поставлені такі основні завдання на дипломну роботу:

- Ескізна розробка структури пристрою.
- Визначення основних функціональних блоків та їх параметрів.
- Вибрати елементну базу для розробки трансивера.
- Визначити основні параметри щодо конструкції.

У ході роботи, аналіз показав, що актуальність розгортки, а отже і проектування апаратної частини 5G є хоч і вирішеним питанням, але досить актуальним. Була виконана розробка МІМО-трансивера, одного з ключових елементів МБС. Розроблений пристрій має перспективи у масштабуванні, оскільки обрана мікросхема має можливість розширитися за рахунок інтегрування в неї подібних мікросхем. Завдяки чому можна досягти великої кількості антен і впровадження використання антенних решіток та технології beamforming, що дає приріст швидкості та стабільності зв'язку. Також розроблено загальний вид конструкції, його приблизні параметри та можливий варіант встановлення МБС з огляду на можливості масштабування та використання beamforming.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Digital Front-End in Wireless Communications and Broadcasting Circuits and Signal Processing Edited by FA-LONG LUO Element CXI, California
2. 5G New Radio [Електронний ресурс]:URL:

<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5gmobilewireless-cellular/5g-nr-new-radio.php>
3. Проблеми 5G NR [Електронний ресурс]: URL:

<https://wireless-e.ru/standarty/problemy-5g-new-radio/>
4. Рентюк В. 5G и миллиметровые волны // СВЧ-электроника. 2019. № 4.
5. Xing, Chengwen, et al. A framework on hybrid MIMO transceiver design based on matrix-monotonic optimization. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019
6. Mohammadi, Abbas; Ghannouchi, Fadhel M. RF transceiver design for MIMO wireless communications. Springer Science & Business Media, 2012.
7. YANG, Binqi, et al. Digital beamforming-based massive MIMO transceiver for 5G millimeter-wave communications. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018
8. Архітектура 5G - 2 частина [Електронний ресурс]: URL:
https://www.ciena.ru/insights/articles/spotlight-on-4g-5gbackhaul-networks_ru_RU.html
9. Полікаровських, Олексій, Системи програмно-конфігурованого радіо як основа розвитку пеленгаційних радіотехнічних систем наступного покоління

ня. MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, 2022, 1: 27-35.

10. Васильев, Евгений Викторович. Радиопередатчики для исследования MIMO канала связи с беспилотным летательным аппаратом. ISSN 1995-4565. Вестник РГПТУ, 2015, 54: 9.

11. LMK0482x datasheet. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.ti.com/product/LMK04828?keyMatch=LMK04828&tisearch=search-everything&usecase=GPN>

12. Texas Instruments. AFE76xx Quad/dual-channel, RF sampling analog front-end with 14-bit 9GSPS DACs and 14-bit 3GSPS ADCs datasheet (Rev. E). [Электронный ресурс]: URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/afe7686>

13. Kang Hsia. Modular Communications Transceiver for 4G/5G Distributed Antenna and Base-Stations. SLAA860–August 2018.

14. Russell Hoppenstein. An Efficient LDO-less Power Supply Solution for AFE76xx. SLAA758–November 2017.

15. Hunsoo Choo. Small Cell and Repeater System Using Integrated RF Sampling Device. SLAA862–November 2018.

16. Texas Instruments. Small Cell and Repeater System Using Integrated RF Sampling Device. [Электронный ресурс]: URL: https://www.ti.com/lit/an/slaa862/slaa862.pdf?ts=1652957466696&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Fproduct%2FAFE7686.

17. Wikipedia:Тактовый генератор. [Электронный ресурс]: URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Тактовый_генератор

18. Кошик Є.М. Дослідження технічних аспектів побудови мережі доступу на основі технології 4G[Електронний ресурс]:URL:https://dut.edu.ua/repositorii/mvt/2021/%D0%9A%D0%BE%D1%88%D0%B8%D0%BA_%D0%A2%D0%A1%D0%94-48.pdf
19. NinaWiki. MIMO. [Електронний ресурс]:URL: <https://www.wiki.uk-ua.nina.az/MIMO.html>
20. Лісовський О.В. «Вибір раціональної архітектури 5G мережі на основі розгорнутих LTE мереж. . [Електронний ресурс]:URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42146/1/Lisovskyi_bakalavr.pdf
21. Ebenezer Dwobeng. MIMO Transceiver with AFE76xx for LTE and 5G Wireless Radio. Application Report. September 2018.
22. Texas Instruments. RF Sampling for Multi-band Radios. Application report. April 2019.