

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК
(підпис) (Ім'я, прізвище)

“ ____ ” _____ 2020_р.

Магістерська дисертація

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

За освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.
на тему: Дослідження процесів передачі сигналів в безпроводовому оптичному тракті з використанням GNU Radio.

Виконав: студент _2_ курсу, групи ТЗ - 91 мп
(шифр групи)

Літвінов Євгеній Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н. професор Ільченко М. Ю.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант 1-4 д.т.н. професор Романов О.І
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент професор кафедри ТС, к.т.н Созонник Г.Д.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 рік

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

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« 20 » січня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Літвінов Євгеній Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Дослідження процесів передачі сигналів в безпроводовому оптичному тракті з використанням GNU Radio.

науковий керівник дисертації д.т.н. професор Ільченко М. Ю _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» « листопада » 2020 р. № 3208-с

2. Строк подання студентом дисертації «11» грудня 2020р.

3. Об'єкт дослідження технології передачі даних за допомогою видимого світла.

4. Предмет дослідження. Використання програмно-конфігурованого радіо та програмного забезпечення GNU Radio для передачі даних за допомогою видимого світла

5. Перелік завдань, які потрібно розробити. Провести огляд технології VLC, SDR та програмного забезпечення GNU Radio. Запропонувати варіант реалізації стенду для дослідження технології VLC. Тестування стенду VLC. Розробити стартап проект

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу
 Слайд №1 Вступ. Актуальність та мета, практична цінність роботи.
 Слайд №2 Основні відомості про технологію VLC.
 Слайд №3 Основні відомості про програмно - конфігуроване радіо.
 Слайд №4 Модель системи зв'язку VLC
 Слайд №5 Структура стенду для зв'язку у видимому світлі
 Слайд №6 Опис роботи системи
 Слайд №7 Результати дослідження передачі з модуляцією PSK
 Слайд №8 Результати дослідження передачі з модуляцією QAM
 Слайд №9 Результати дослідження передачі з модуляцією GMSK
 Слайд №10 Висновки до роботи, напрями подальшого вивчення.

7. Орієнтовний перелік публікацій

- ПТ-2019 – Використання SDR трансивера BladeRFx40 для формування сигналів цифрового телебачення стандартів DVB-S та DVB-S2
- ПТ-2020 – Використання SDR трансивера та програмного забезпечення GNURadio для дослідження передачі сигналів в оптичному тракті

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Основні відомості про технологію VLC та програмного забезпечення GNU Radio	д.т.н. професор Романов О.І	02.10.2020	11.10.2020
2. Аналіз апаратно-програмної реалізації передачі у видимому світлі		02.10.2020	18.10.2020
3. Створення та дослідження програмної частини передачі по видимому світлі в програмному забезпеченні GNU Radio		02.10.2020	14.11.2020
4. Розробка стартапу		02.10.2020	10.12.2020

9. Дата видачі завдання «9» вересня 2019р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання, встановлення операційної системи Ubuntu та необхідних програм для роботи	12.09.2019-19.09.2019	Виконано

2	Опис оптичної безпроводової мережі	19.09.2019-01.11.2019	Виконано
3	Перелік елементів, їх призначення та функції	01.11.2019-16.11.2019	Виконано
4	Аналіз принципів побудови безпроводової оптичної мережі з використанням GNURadio	16.11.2019-10.01.2020	Виконано
6	Розробка мережі безпроводового оптичного доступу на базі GNURadio	10.01.2020 -02.03.2020	Виконано
5	Написання тезисів доповіді на конференцію “Перспективи телекомунікацій”	02.03.2020-31.03.2020	Виконано
7	Опис процесу передачі сигналів і оцінка якості обслуговування в моделі мережі GNURadio	31.03.2020-26.06.2020	Виконано
8	Аналіз результатів практичної реалізації мережі безпроводового оптичного доступу на базі GNURadio	26.06.2020-01.07.2020	Виконано
16	Підготовка стартап проекту за магістерською дисертацією	01.07.2020-05.09.2020	Виконано
17	Висновки по всім сферам дослідження, які були проведені.	05.09.2020-05.10-2020	Виконано
9	Написання чернетки статті для публікації в журналі	05.10.2020-02.11.2020	Виконано
10	Публікація статті	02.11.2020-09.11.2020	Виконано
18	Оформлення магістерської дисертації	09.11.2020-11.12.2020	Виконано

Студент

(підпис)

Літвінов Є.А.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Ільченко М.Ю.

(ініціали, прізвище)

Реферат

ТЕМА: «Дослідження процесів передачі сигналів в безпроводовому оптичному тракті з використанням GNU Radio»

Пояснювальна записка викладена на 106 сторінках та включає 84 ілюстрацій, 24 таблиці та 60 джерел за переліком посилань.

Об'єктом дослідження є технологія передачі даних у видимому світлі (VLC).

Мета роботи полягає в тому, щоб провести огляд технології VLC, її переваг, основних характеристик та створити стенд для досліджень передачі з використанням видимого світла.

Сучасна тенденція бездротового зв'язку з постійно зростаючим попитом на більш високі пропускну здатність і повсюдне покриття створюють високий попит на використання спектра радіочастотної зв'язку. Прогнозується, що мобільний трафік даних буде рости з сукупним річним темпом росту в 61 відсоток з 2013 до 2022 року. Цей напрямок вимагає альтернативних засобів для пошуку додаткових можливостей і навіть додаткові можливості зв'язку в майбутньому. видима частина спектр забезпечує близько 400 ТГц нерегульованої, неліцензованою і безпечного середовища, яка може використовуватися для комунікаційних цілей. Доступний спектр більше 1000 разів більше, ніж весь спектр радіочастот.

Ключові слова: зв'язок з використанням видимого світла, VLC, IEEE 802.15.7, програмно конфігуровано радіо, SDR, GNU Radio, USRP.

Abstract

TEMA: «Research of processes transmission signal in a wireless optical path using GNU Radio.»

The explanatory note is presented on 116 pages and includes 23 illustrations, 24 tables and 60 references.

The object of study is visible light communication technology (VLC).

The aim of the work is to review the VLC technology, its advantages, main characteristics and to create a stand for research of transmission using visible light.

The current trend in wireless communications with the ever-increasing demand for higher bandwidths and ubiquitous coverage is creating a strong demand for the use of the RF spectrum. Mobile data traffic is projected to grow at a compound annual growth rate of 61 percent from 2013 to 2022. This direction requires alternative means to find additional capabilities and even additional communication capabilities in the future. The visible part of the spectrum provides about 400 THz of an unregulated, unlicensed and secure environment that can be used for communication purposes. The available spectrum is more than 1000 times larger than the entire spectrum of radio frequencies.

Keywords: Visible light communication, VLC, IEEE 802.15.7, software-configured radio, SDR, GNU Radio, USRP.

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЮ VLC ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ GNURADIO	12
1.1 Основні відомості про технологію передачі даних з використанням видимого світла (VLC)	12
1.2. Зв'язок у видимому світлі (VLC)	14
1.3. Аналіз останніх досліджень і публікацій	15
1.4. Порівняння видимого світла з радіочастотним і інфрачервоним зв'язком	17
1.5. VLC система зв'язку	18
1.6. VLC передавач.....	20
1.7. Канал VLC	21
1.7.1. Один канал VLC (система с одним входом і одним виходом (SISO))	21
1.7.2. Багатоканальні системи VLC.....	23
1.8. Приймач VLC	24
1.8.1. Оптична приймаєльна потужність.....	25
1.8.2. Розподіл світла від світлодіодів.....	25
1.8.3. Інші параметри, що впливають на сигнал, що приймається.....	27
1.9. Шум і SNR в системах VLC.....	28
1.9.1. Шум.....	28
1.9.2. Оптичний інтерференційний шум.....	29
1.10. Стандартизація VLC.....	30
1.11 Основні відомості про технологію SDR.....	30
1.11.1 Короткі відомості про технологію SDR.....	30
1.11.2 Архітектури SDR.....	33
1.12 Основні відомості про USRP	36
1.12.1 Елементи лицьовій панелі.....	37
1.13 GNURadio.....	39
1.13 Архітектура програмного забезпечення GNU Radio.....	40
1.13.1 Проміжні блоки.	41
1.13.2 Візуальні керуючі блоки	42

1.13.3	Невізуальні блоки.....	43
1.13.4	Управління розміщенням візуальними блоками	44
1.13.5	Частота оцифровки сигналу.....	45
1.13.6	Коннектори та типи даних	46
1.13.7	Блоки які найчастіше використовуються.....	47
	Висновки до розділу 1	50
2.	СТВОРЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИДИМОГО СВІТЛА	51
2.1.	Проектування стенду VLC.....	51
2.2.	Передавач VLC	53
2.2.1.	Світлодіод	54
2.2.2.	Світлодіодний драйвер.....	58
2.2.3.	Попереднє вирівнювання.....	59
2.2.4.	Схеми модуляції	60
2.2.5.	Передавальна оптика.....	60
2.3.	Приймач VLC	61
2.3.1.	Посилення сигналу.....	61
2.3.2.	Фільтрація електричних сигналів і пост-еквалізація.....	62
2.4.	Обробка сигналів	63
2.4.1.	Програмне забезпечення для обробки сигналів.....	63
2.5.	Розробка структурної схеми дослідження	64
2.6.	Опис роботи системи.....	66
	Висновки до розділу 2	67
3.	ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ СТЕНДУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИДИМОГО СВІТЛА В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕНІ GNU RADIO	68
3.1	Дослідження передачі з модуляцією PSK.....	68
3.1.1	Передавач.....	69
3.1.2	Канал зв'язку	71
3.1.3	Приймач	72
3.1.4	Тестування Блок схеми	74
3.2.	Дослідження передачі з модуляцією 8PSK.....	80
3.3	Дослідження передачі з модуляцією QAM.....	81
3.3.1	Передавач.....	82
3.3.2	Канал передачі.....	83

3.3.3	Приймач	83
3.3.4	Тестування блок схеми.....	84
3.4	Дослідження передачі з гаусівською двохпозиційна частотна маніпуляція з мінімальним зсувом (GMSK)	90
3.4.1	Передавач GMSK.....	91
3.4.2	Канал зв'язку	92
3.4.3	Приймач GMSK.....	92
3.4.4	Тестування блок схеми.....	93
Висновок до розділу 3		95
4.	СТАРТАП ПРОЕКТ	96
4.1	Опис ідеї проекту застосування передачі даних у видимому світлі при комерційному застосуванні.....	96
4.2	Технологічний аудит ідеї проекту	98
4.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	99
4.4	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	109
Висновки до розділу 4		112
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....		113

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

VLC – (Visible Light Communication) стандарт зв'язку за допомогою видимого світла

SDR – (Software-defined radio) програмно-конфігуроване радіо

ООК – (On-off key) Амплітудна модуляція

GMSK – (Gaussian Minimum Shift Keying) гаусівська двохпозиційна частотна маніпуляція з мінімальним зсувом.

QAM – (Quadrature Amplitude Modulation) Квадратурно-амплітудна модуляція

PSK – (Phase-shift keying) Фазова маніпуляція

LED – (Light-emitting diode) світлодіод

PD – (photo detector) фотодетектор

РЧ – Радіо частота

ІР – інфрачервоне світло

RGB - (Red - green – blue) Червоний - зелений – синій

ІЕЕЕ – (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Інститут інженерів електрики та електроніки

JEITA – (Japan Electronics and Information Technology Industries Association)

Японська асоціація індустрії електроніки та інформаційних технологій

SISO – (Single input - single output) Один вхід - один вихід

ВСТУП

Сучасна тенденція бездротового зв'язку з постійно зростаючим попитом на більш високі пропускну здатність і повсюдне покриття створюють високий попит на використання спектра радіочастотної зв'язку. Прогнозується, що мобільний трафік даних буде рости з сукупним річним темпом росту в 61 відсоток з 2013 до 2022 року Цей напрямок вимагає альтернативних засобів для пошуку додаткових можливостей і навіть додаткові можливості зв'язку в майбутньому. видима частина спектр забезпечує близько 400 ТГц нерегульованої, неліцензованою і безпечною середовища, яка може використовуватися для комунікаційних цілей. Доступний спектр більше 1000 разів більше, ніж весь спектр радіочастот.

Інтерес бездротового зв'язку у видимому світлі (VLC) зріс одночасно з розробкою і використанням світлодіодним (LED) технології. Світлодіод може забезпечити дуже високу пропускну здатність модуляції для зв'язку одночасно з енергоефективним освітленням. Світлодіоди широко використовуються для внутрішнього освітлення, автомобільних і громадських вуличних ліхтарів. Світлодіоди були розроблені з достатнім рівнем інтенсивності. Законодавство про стійкий і ефективно використання енергії також прискорює використання світлодіодних ламп. Цей напрямок звільнить ринок світлодіодних технологій, що забезпечують платформу впровадити технологію

Данна робота надає варіант реалізації випробувального стенду VLC за допомогою програмно-конфігурованому радіос (SDR) яке працює під управлінням програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом GNU Radio, Обговорюється канал для системи, що використовує одиночні світлодіоди (LED) Переглядаються різні схеми модуляції. Висвітлено основні методи, що застосовуються для впровадження системи VLC.

1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЮ VLC ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ GNURADIO

1.1 Основні відомості про технологію передачі даних з використанням видимого світла (VLC)

VLC – це технологія зв'язку, в якій видимий спектр модулюється для передачі даних. Стандарт був прийнятий у 2004 році Японською Асоціацією Інформаційних Технологій (JEITA), після специфікацій у 2003 році, що були оформлені Міжнародним VLC консорціумом. Тоді на виставці був продемонстрований перший високошвидкісний пристрій на базі VLC. А вже у 2009 році міжнародна робоча група Інститут інженерів електротехніки та електроніки почала розробляти стандарт IEEE 802.15.7 [1]. Архітектура мережі VLC представлена на рис.1.1.



Рисунок 1.1 – Архітектура мережі VLC

Крізь відстані розповсюдження світлодіодів (VLD) VLC – це технологія зв'язку малої дальності. В електромагнітному спектрі видимий спектр охоплює між 350 нм і 800 нм довжиною хвилі, а частоти складають між $4,3 \times 10^{14}$ Гц і $7,5 \times 10^{14}$ Гц. У технології VLC використовуються світлодіоди, оскільки їх інтенсивність струмів легко модулюється відносно їх аналогів. Світлодіоди мають більший термін експлуатації порівняно з лампочками та флуоресцентними лампочками. У будь-якому застосуванні освітлення (загальне освітлення, рекламні щити, дисплеї, світильники транспортних

засобів) передбачається, що світлодіоди будуть замінені на звичайні лампочки.

Як і у випадку будь-якої технології зв'язку, передача в технології VLC, як правило, характеризується матрицею передачі, яка є математичним поданням канального імпульсного відгуку. Розмір цієї матриці змінюється залежно від кількості груп світлодіодів та кількості світлодіодів на групу. З безліччю блоків декількох світлодіодів може здійснюватися дуже висока швидкість передачі даних. Коли передача пошкоджена шумом та перешкодами від небажаних джерел, методи вирівнювання попередньої компенсації каналу, знаючи поведінку каналу, допомагають відновити символи. Технологія VLC відповідає багатьом проблемам впровадження: 15 деякі пов'язані з дизайном системи зв'язку, а інші – з практичною реалізацією. Для належної реалізації системи зв'язку VLC, повинні бути дотримані обмеження: обмеження освітлення, пов'язані із середньою оптичною потужністю та метою комунікації, що стосуються пропускну здатності. Під час передачі слід уникати увімкнення світлодіодів, а в умовах затемнення, швидкість передачі даних має бути значно знижена.

Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM) – це основний вид модуляції у даній технології. Кожний з каналів потім може бути додатково промодульований за допомогою маніпуляцій. На робочих частотах від 3,5 МГц до 120 МГц швидкість становить 1,25 – 96 Мбіт/с відповідно.

VLC (Visible Light Communication) використовує світлодіоди для бездротової передачі даних з використанням модуляції інтенсивності. У приймачу сигнал детектується фотодіодом за принципом прямого виявлення. VLC був задуманий як метод передачі даних точка-точка - по суті, як заміна кабелю. Це призвело до ранньої діяльності по стандартизації VLC як частини IEEE 802.15.7 [2]. Цей стандарт, однак, в даний час переглядається, щоб включити Li-Fi.

1.2. Зв'язок у видимому світлі (VLC)

Зв'язок у видимому світлі (VLC) - це технологія зв'язку, в якій видимий спектр модулюється для передачі даних. Через дальності поширення світлодіодів (VLC) VLC є технологією зв'язку ближньої дії.

В електромагнітному спектрі видимий спектр охоплює довжину хвилі від 350 до 800 нм, а частоти складають від $4,3 \times 10^{14}$ Гц и $7,5 \times 10^{14}$ Гц.

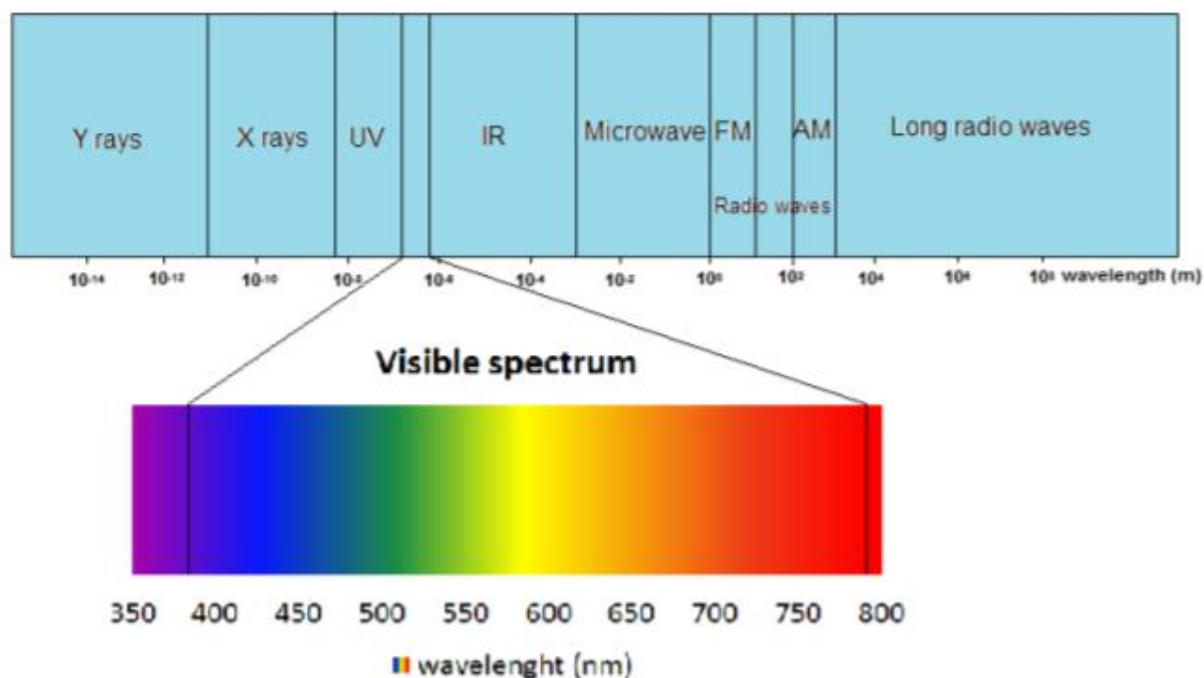


Рисунок 1.2 - Видима світлова частина електромагнітного спектра.

В технології VLC використовуються світлодіоди, тому що їх сила струму легко модулюється щодо їх аналогів. Так як лампи розжарювання і люмінесцентні лампи. Світлодіоди засновані на процесі легування, отже, їх ефективність і довговічність поліпшуються, і вони мають більш тривалий термін служби в порівнянні з лампами розжарювання і люмінесцентними лампами.

У будь-якому освітленні (загальне освітлення, вивіски, дисплеї, освітлення транспортних засобів та ін.) Прогнозується, що світлодіоди будуть переважувати звичайні лампочки. Вони збираються надати подвійні додатки, а саме освітлення і зв'язок. Як і в разі будь-якої технології зв'язку, передача в технології VLC зазвичай характеризується матрицею передачі, яка

є математичним представленням імпульсної характеристики каналу. Розмір цієї матриці залежить від кількості груп світлодіодів і кількості світлодіодів в групі. З кількома блоками з декількох світлодіодів, дуже висока швидкість передачі даних може бути виконана. Коли передача спотворюється шумом і перешкодами від небажаних джерел, методи вирівнювання для попередньої компенсації каналу, знаючи поведінку каналу, допомагають відновити символи. Технологія VLC стикається з багатьма проблемами впровадження: деякі пов'язані з проектуванням системи зв'язку, а інші пов'язані з практичною реалізацією.

1.3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Інтерес, проявлений дослідним спільнотою до області VLC в останні роки, призвів до розробки демонстраційних стендів, здатних довести можливість використання цієї нової технології для бездротових додатків [67]. Ґрунтуючись на методі модуляції, що використовується для передачі інформації, ці демонстратори можна розділити на дві групи: одна використовує модуляцію двоїчного рівня, а друга - схему багаторівневої модуляції.

Модуляція двоїчного рівня відноситься до методів модуляції, в яких інформація відправляється в кожному періоді символу за допомогою зміни двох рівнів інтенсивності. Ці методи являють собою популярні схеми, які використовуються в основному для проводового зв'язку, їх головна перевага полягає в тому, що вони зазвичай прості й недорогі в реалізації. В [61] повідомлялося про реалізацію, засновану на безповоротному переходу до нуля (NRZ) on-off-keying (OOK), що пропонує швидкість передачі даних 40 Мбіт / с. Основне обмеження в разі схем модуляції двоїчного рівня пов'язано з невеликою пропускну здатністю, пропоновано пристроями з білими світлодіодами. Щоб подолати цю проблему, рішення, засноване на пост-корекції, було запропоновано в [62], де повідомляється про швидкість передачі даних 100 Мбіт / с для NRZ-OOK. Попередні демонстрації проводилися з використанням оптоелектронних приймачів на основі фотодіода PIN. Кращі результати можуть бути отримані при використанні лавинних фотодіодів

(APD) в конструкції оптоелектронного приймача. В [63] повідомляється про швидкість передачі даних 230 Мбіт / с. Ця продуктивність досягається за рахунок використання модуляції ООК і приймача VLC на основі APD.

Багаторівнева модуляція відноситься до методів модуляції, в яких інформація відправляється шляхом зміни значень інтенсивності в безперервному діапазоні або з використанням набору зумовлених значень [64]. Оскільки вони забезпечують краще використання доступної смуги пропускання, системи, засновані на цих схемах модуляції, можуть досягати більш високих швидкостей передачі даних. Фактично, швидкості передачі даних в Гбіт / с повідомляються в літературі з використанням дискретної багато тональної модуляції (DMT). Наприклад, в [65] представлені системи VLC на основі білих світлодіодів, які забезпечують швидкість передачі даних 1,1 Гбіт/с. Використовуючи багатобарвні світлодіодні пристрої, такі як світлодіоди RGB, можна отримати більш високу швидкість передачі даних, оскільки можна використовувати кілька каналів зв'язку. В [66] повідомляється про швидкість передачі даних 3,4 Гбіт/с з використанням RGB-світлодіодів і схеми модуляції DMT.

Аналізуючи публікації, пов'язані з VLC, стає ясно, що високі швидкості передачі даних досяжні, і це робить цю технологію потенційною альтернативою технології, заснованої на радіозв'язку. При більш уважному розгляді експериментальної установки, представленої в цих статтях, можна побачити, що результати отримані в особливих умовах і що в більшості випадків радіус дії бездротового зв'язку становить близько десяти сантиметрів. Тим не менш, вони представляють собою великі досягнення і важливий доказ того, що VLC може слугувати додатковою технологією для бездротового зв'язку[68].

1.4. Порівняння видимого світла з радіочастотним і інфрачервоним зв'язком

Зв'язок VLC має деякі переваги перед традиційною радіочастотою і інфрачервоним зв'язком. Основною перевагою VLC є неліцензований 400 ГГц діапазон та практично необмежена смуга частот для зв'язку. ІК має як широку смугу частот як у VLC, але уся РЧ смуга має ширину всього 300 ГГц, строго обмежений і регульований [3]. Використання більш високих радіочастот також має недоліки, зменшені відстані між лініями зв'язку, що впливає на мобільність. Перевагою VLC є низька потужність витрата і низькі витрати на впровадження при використанні ламп освітлення.

Найбільша різниця між RF і IR і видимим світлом є поширення через перешкоди. РФ може забезпечити зв'язок через перешкоди в той час як VLC і ІЧ можуть слугувати безпечним високошвидкісним з'єднанням для користувачів.

При порівнянні ризиків для здоров'я технологій, РФ може мати більше потенційні ризики для здоров'я, ніж IR і VLC. Об'єднавши декілька досліджень, Міжнародне агентство з дослідження раку всесвітньої організації охорони здоров'я (BOO3) класифікували радіочастотні електромагнітні поля як можливо канцерогенний для людини [4]. Тепловий вплив радіочастот на людину також добре відомо, але ризики і причини цього не були остаточно доведені [4]. VLC Технологія має один відомий ризик для здоров'я, відомий як небезпека синього світла, який може бути викликано інтенсивним синім світлом, випромінюваних джерелами світла [5]. Ризик не актуальне при використанні нормального рівня освітленості і колірної температури. Ризики від ІЧ є результатом ефекту нагрівання невидимого випромінювання, які поглинають людська шкіра та очі [6].

Радіочастотний та інфрачервоний зв'язок мають більш тривалу історію стандартизації та досліджень що призвело до кількох стандартів. Зокрема, радіочастотний зв'язок є найбільш стандартизованим засобом бездротового зв'язку. Інфрачервоний зв'язок був частиною стандарту 802.11 WLAN, але його

використання не стали популярним [7]. VLC був частиною стандартів в останні роки [8], [9]. Узагальнене порівняння бездротових технологій показано в Табл. 1.1

Таблиця 1.1 Порівняння зв'язку VLC, RF і IR.

	VLC	RF	IR
Пропускна здатність	неліцензована, ~ 400 ТГц	Регульований, обмежений, <300 ГГц	~ 400 ТГц
електромагнітний перешкод ЕМІ	Ні	Так	Ні
Потребляемая мощность	Низька	Середня	Низька
Мобільність	Лімітована	Так	Лімітована
Стандарти	802.15.7	Декілька	802.11
Покриття	Вузьке	Широке	Вузьке
Ризики для здоров'я	ВЛН	Декілька	Термальне
Вартість впровадження	Низька	Середня	Середня

1.5.VLC система зв'язку

Технологія VLC є частиною набору оптичних бездротових комунікацій. Отже, фізично оптичні принципи можуть бути застосовані до систем VLC. Фактично, носієм в VLC є видимі промені, які використовуються для освітлення. VLC зазвичай характеризується передачею невід'ємних і некогерентних сигналів. Він дотримується принцип зв'язку, в якому розглядаються три основні частини: передавач, канал і приймач. На рис. 1 показані основні блоки системи передачі VLC.

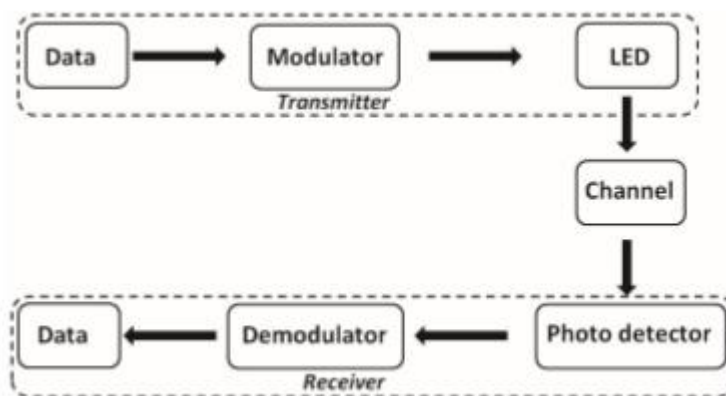


Рисунок 1.3 – Основні блоки передачі в системах VLC

Він складається з передавача, каналу і приймача, а для системи, спотвореної адитивним білим гауссовским шумом (AWGN), передача завжди визначається

$$r_i = Hs_i + \omega_i \quad (1)$$

де r_i і s_i є прийнятим і переданим наборами символів відповідно, H є відповіддю каналу і ω_i шум каналу. Відповідна модель для систем зв'язку VLC зображена на рис.1.4. Він показує два електричних домени та один оптичний домен. Модульований сигнал, який додається до напруги постійного струму, використовується для живлення світлодіода. Світлодіод в своїй роботі випромінює світло і одночасно передає інформацію по каналу. Приймач виконаний з фотоприймача (PD) і демодулятора. PD виявляє світло і виробляє електричний сигнал, що складається з повідомлення та шуму. Частина шуму тут створюється каналом, хоча в моделі ми представляємо загальний шум в електричній області. Це пов'язано з тим, що PD перетворює і повідомлення, і оптичний шум в електричний струм.

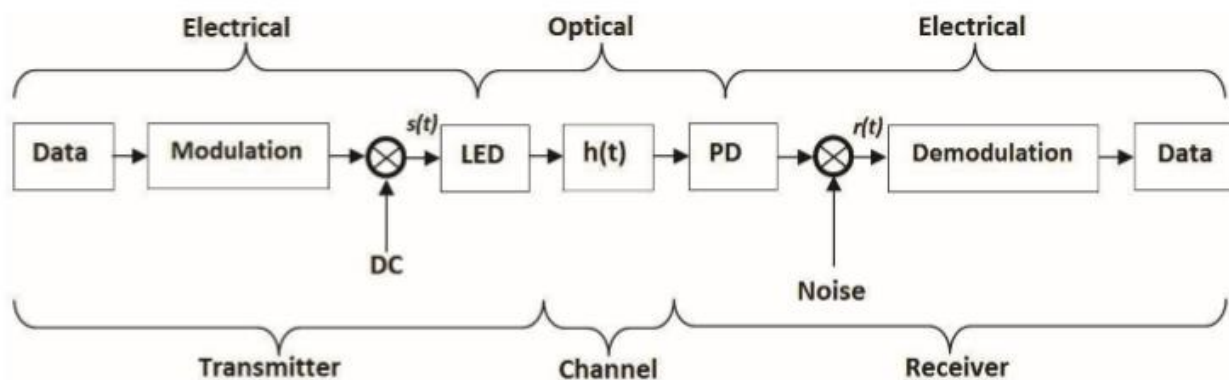


Рисунок 1.4 – Модель системи зв'язку VLC

1.6.VLC передавач

У системах VLC передавач групує в одному модулі джерело даних, модуль модуляції і світлодіод. Останні два елементи є дуже важливими елементами в передавачі VLC. У системах VLC використовуються два типи світлодіодів: одноколірні і багатоколірні. Колірні світлодіоди об'єднують в одному пакеті кілька одноколірних світлодіодів. Найбільш використовуваний багатокольоровий світлодіод - це червоний-зелений-синій (RGB). У системах з декількома несучими кожен з кольорових світлодіодів, включених в комплект, який являє собою антену, що відповідає одному каналу. В системі стільки каналів, скільки світлодіодів. Отже, дана кількість кольорових світлодіодів буде забезпечувати однакову кількість окремих каналів. Отже, передавач RGB-LED розглядається як спеціальний багатоканальний передавач, який можна використовувати для розгортання методів модуляції на декількох несучих. Наприклад, 3×3 MIMO метод можна застосовувати по каналу VLC [11], [12]. На рис.1.5 зображені два поширених типу передавача VLC: на рис.1.5-а - один передавач VLC і на рис.1.5-б - 3-канальний передавач VLC.

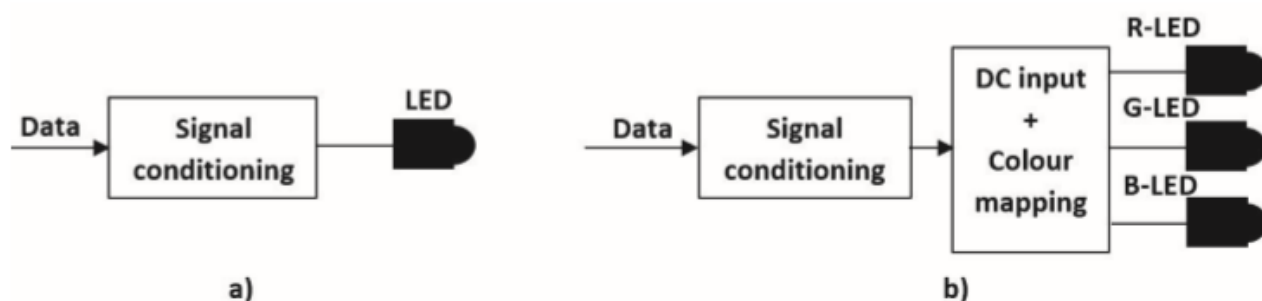


Рисунок 1.5 – Передавачі VLC: а) одиночний світлодіодний передавач, б) трьохканальний передавач VLC

1.7. Канал VLC

У комунікації канал представляє собою простір між передавачем і приймачем. в цьому просторі на сигнал впливає багато факторів, такі як загасання, перешкоди і шум. В технології VLC канал - це простір між світлодіодом і фотодетектором. Два основних типи каналів які розглядаються в системах зв'язку VLC: один канал VLC, що включає один світлодіод і один фотодетектор, і багатоканальні системи VLC, в яких передавач складається з різнокольорових світлодіодів. У другому випадку фотодетектор складається з більш ніж одного детектора, кожен з яких чутливий до кольору від передавача.

1.7.1. Один канал VLC (система с одним входом і одним виходом (SISO))

В одному каналі VLC один світлодіод і один PD використовуються для досягнення передачі. Ємність C_{SISO} лінії передачі дається у [13]

$$C_{SISO} = \log_2 \left(1 + \frac{g^2 P_t}{\sigma^2 B} \right) \quad (2)$$

Де P_t , незалежно від освітлення, означає потужність передавача, B пропускна здатність передачі, σ^2 дисперсія загального шуму в каналі AWGN, та g посилення каналу. Кількість $\frac{g^2 P_t}{\sigma^2 B}$ представляє SNR, характеризуючий канал. Лінія поширення організована в двох різних типах: лінія прямої видимості (LOS, Пряма і не пряма) або link не прямої видимості (NLOS).

У поєднанні LOS існує прямий зв'язок без перешкод між світлодіодом і PD (див. Рис. 1.6). Ми розрізняємо прямий LOS (dLOS),

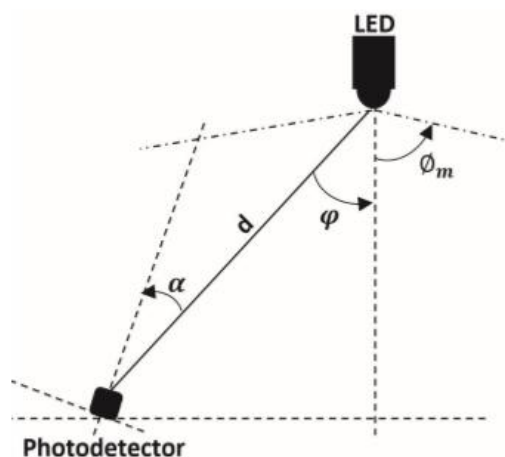


Рисунок 1.6 – Непряме розподіл прямої видимості одного променя (ndLOS)

($\varphi = 0$) і непрямий LOS (ndLOS), в якій частота не дорівнює нулю ($\varphi \neq 0$). link dLOS та ndLOS схожі з точки зору моделі. Система LOS була вивчена, і більше інформації можна знайти в літературі в [18], [19], [20] и [21]. В LOS VLC (посилання (1)) стає

$$r_i = H_{LOS} s_i + \omega_i \quad (3)$$

де H_{LOS} є відповіддю каналу LOS. Ця модель (3) була використана в [22] для опису системи передачі VLC. Модель лінії зв'язку з використанням передачі VLC LOS представлена на рис. 1.6. Пропускна здатність в цій ситуації може бути визначена підсумовуванням LOS і компонента використання прийнятого сигналу [18]. Коефіцієнт посилення передачі $g_{(LOS)}$ вивчені і представлені в [16], [22], [18] та [19], дається

$$g_{(LOS)} = \left[\frac{(\xi+1)A}{2\pi d^2} \right] \cdot \cos \varphi \cdot T_f(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \quad (4)$$

де кут падіння φ задається $0 \leq \varphi \leq \Phi_m$, $T_f(\varphi)$ це фільтр передачі та $g(\alpha)$ приріст концентрації. d являє мінімальну відстань між світлодіодом і PD. Варто зазначити, що $g_{(LOS)}$ нуль для $\varphi > \Phi_m$ [8]. У [20] канал VLC деталізований

з великою кількістю опцій розподілу, та різні ситуації оцінюються для характеристики середовища передачі. Різниця між прямою LOS і не прямий LOS підкреслено. Канал моделюється, як запропоновано в [22], з урахуванням прямого зв'язку між передавачем і приймачем, включаючи шляхи відображення, як представлено в [21], [23].

В системі NLOS VLC світлові промені від світлодіода досягають PD після одноразового або багаторазового відображення, це пов'язано з перешкодою між передавачем і приймачем. У типовій лінії зв'язку NLOS між передавачем і приймачем імпульсна характеристика каналу розглядається як нескінченна сума світлових променів після багатьох відображень [24], [25] і може бути виражена як

$$H_{NLOS} = \sum_{k=0}^{\infty} h^{(k)} \quad (5)$$

де $h^{(k)}$ імпульсний відгук променів, що проходять через $k^{(th)}$ шлях. Але це рівняння можна перебудувати. У цьому випадку передача характеризується рівнянням передачі з використанням матриці передачі LOS, помноженої на коефіцієнт ρ характеризує зв'язок NLOS [20]. Для link NLOS (1) стає:

$$r_i = H_{NLOS} s_i + \omega_i + \rho H_{LOS} s_i + \omega_i \quad (6)$$

1.7.2. Багатоканальні системи VLC

Системи зв'язку з великою кількістю несучих можуть бути реалізовані по каналу VLC з використанням більш одного кольорового світлодіода для подачі сигналу повідомлення в канал. У цій ситуації у нас є кінцеві числа n і z світлодіодів і фотодетекторів, Використовуваних в якості антени і детекторів відповідно. n можна розділити на число m груп світлодіодів для отримання кількості світлодіодів на групу. Матриця передачі в системах VLC з декількома несучими задається як

$$H_{multi} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,n} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ h_{z,1} & h_{z,2} & \dots & h_{z,n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

де записи $h_{i,j}$ представляють посилення зовнішнього інтерфейсу між світлодіод і відповідний PD, $h^{i,j}$ представляють посилення перехресних перешкод між i^{th} світлодіоди і j^{th} PD. Якщо немає перехресних перешкод, H_{multi} стає діагональною матрицею $h_{i,j}$ записів. Пропускна здатність каналу C_{multi} в VLC з декількома несучими визначається:

$$C_{multi} = \Gamma C_{CISO} \quad (8)$$

де $\Gamma = \min(n,z)$ і C_{CISO} дається у (2). RGB-LED є найбільш використовуваними низькочастотними світлодіодами, матриця передачі каналу $H_{3 \times 3}$ у випадку одного RGB-LED передавача задається:

$$H_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} h_{rr} & h_{rg} & h_{rb} \\ h_{gr} & h_{gg} & h_{gb} \\ h_{br} & h_{bg} & h_{bb} \end{bmatrix} \quad (9)$$

де діагональні записи (h_{rr} , h_{bb} , h_{gg}) представляють канал LOS між одним світлодіодом і відповідним йому PD, а решта записи (h_{rg} , h_{rb} , h_{gr} , h_{br} , h_{bg}) являє собою перехресні переговори між каналами.

1.8. Приймач VLC

Основним елементом у приймачі VLC є фотодетектор, який використовується для збору світлового випромінювання [18]. У приймачах VLC використовуються два основні типи фотоприймачів: фотодіод і фототранзистори. Цифрова камера, що складається з масиву фототранзисторів, є хорошим пристроєм для прийому сигналу VLC в інтелектуальних пристроях, таких як смартфони і ноутбуки [26]. Як описано в [22], повна система приймача складається з таких компонентів, як концентратори, оптичні фільтри, підсилювачі та еквалайзери, необхідні для захоплення максимального світла, необхідні для перетворення прийнятого сигналу в повідомлення. Промені

проходять через концентратор і оптичний фільтр, перш ніж вони досягнуть ядра детектора. Архітектура приймача VLC представлена на рис. 1.7.

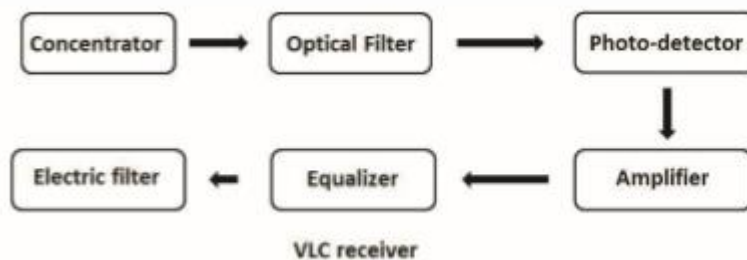


Рисунок 1.7 – Архітектура приймача VLC

1.8.1. Оптична приймаєльна потужність

З огляду на миттєву потужність світлодіода, $\rho_{LED}(t)dt$, середня оптична потужність, створювана одним світлодіодом, визначається в [20], [24]

$$P_{LED} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left[\int_{-T}^T \rho_{LED}(t) dt \right] \quad (10)$$

Отримана потужність P_{PD} розраховується з використанням посилення передачі (g). У разі системи зв'язку LOS VLC, P_{PD} дано [26]

$$P_{PD} = P_{LED} \times g_{(LOS)} \quad (11)$$

де $g_{(LOS)}$ коефіцієнт посилення передачі, визначений у (4). Ця потужність залежить від довжини хвилі, як показано в [22]. Але три інших фактори також беруться до уваги: посилення фільтра T_f (ϕ), приріст концентрації $g(\alpha)$ і порядок розподілу Ламберта (ξ) (див рівняння 4).

1.8.2. Розподіл світла від світлодіодів

Завдяки швидкому розвитку технологій твердотілого освітлення, світлодіоди розроблені для генерації 10-120 люмен кожен з дуже хорошою ефективністю. Внутрішнє освітлення вимагає від 400 до 1200 люкс в одній кімнаті. Одного світлодіода недостатньо, що означає наявність безлічі світлодіодів, що є перевагою для рівномірності освітлення, необхідного для

комфортного візуального враження. Ідеальна світлодіодна оптична модель - ідеальна ламбертовській, що означає, що інтенсивність поширення пропорційна косинусу кута огляду. Але в реальному світі деякі світлодіоди можуть бути представлені недосконалим ламбертовцем. Ми виділяємо далекі області освітлення, в яких діапазон освітленості світлодіода приблизно в 5 разів перевищує його максимальний розмір. Розсіювання, що створюється багатьма джерелами світла, збільшує кількість шляхів в каналі VLC. p_a збільшується, число (β) дозволених шляхів збільшується відповідно до співвідношення $\beta = \alpha^{p_a}$, де α кількість світлодіодів на групу. Отже, збільшення кількості світлодіодів підвищує рівномірність освітлення і робить реалізацію більш складною в приміщенні. В цьому випадку ефективна методика вирівнювання потрібна для подолання ефектів розкиду затримок внаслідок ефектів багатопроменевого поширення. Як правило, всі вони виготовлені за принципом емісії Ламберта. Лінія передавач-приймач в VLC ґрунтується на цьому принципі. На рис.1.8 показано розподіл світла від світлодіода. Цей розподіл привласнює каналу VLC багатоканальну середу. Ламбертівську ξ дано [21]

$$\xi = -\frac{\ln 2}{\ln(\theta_{0,5})} \quad (12)$$

де $\theta_{0,5}$ представляє напівкут, відповідний половині отриманої оптичної сили ($P_r/2$). Важливою характеристикою цього розподілу є інтенсивність випромінювання $k(\varphi)$ Ламбертівського передавача. Він використовується для визначення посилення каналу, зазначеного в (4). $k(\varphi)$ задається для каналів SISO [13]

$$k(\varphi) = \frac{\xi+1}{2\pi} \cos^\xi(\varphi) \quad (13)$$

У [27] версія променевої інтенсивності передавача Ламберта з декількома входами - система з одним виходом (MISO), пов'язана з числом N входів вивчається з урахуванням кількості передавальних антен. Це розширює канал VLC, запропонований для одного користувача, розрахованого для сценарію з багатьма користувачами

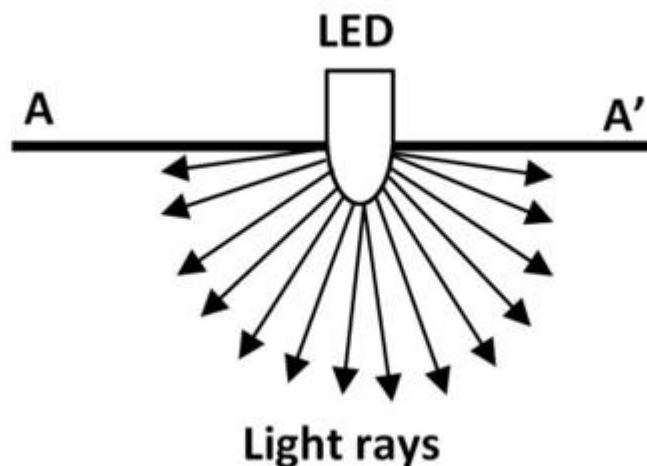


Рисунок 1.8 – Розсіювання світла від світлодіодів (розподіл Ламберта);
(A - A') представляє поверхню Ламберта у вигляді профілю

1.8.3. Інші параметри, що впливають на сигнал, що приймається

При проектуванні розподілу світла світлодіодами необхідно ретельно проаналізувати деякі інші параметри: розподіл просторової інтенсивності світла, оптичну силу і спектральну щільність. На додаток до впливу типу розподілу, багато параметрів можуть впливати на канал зв'язку. До них відносяться: освітленість, пов'язана з інтенсивністю струму в світлодіодах, кількість джерел в матриці світлодіодів (рівномірне освітлення і відстань між джерелами), зовнішні джерела світла (перешкоди), порядок випромінювання Ламберта ξ , і природа поверхні стіни (багатоколіїні сценарій і розв'язний шлях) [23]. Отже, коефіцієнт помилок по бітам (BER), коефіцієнт помилок по символам (SER) і відношення сигнал / шум (SNR) є функціями цих параметрів. Раніше це було проаналізовано авторами і узагальнено на рис. 1.9.

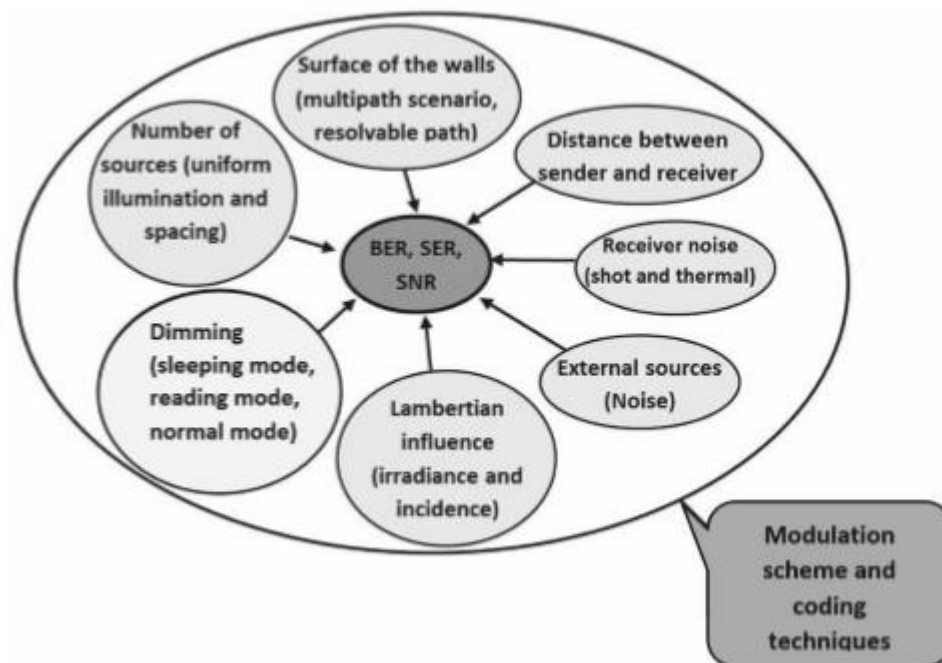


Рисунок 1.9 – Фактори, що впливають на канал передачі VLC

1.9. Шум і SNR в системах VLC

1.9.1. Шум

У системах VLC джерела шуму включають сонячне світло, лампи розжарювання і флуоресцентне світло в приміщеннях або на відкритому повітрі [14]. Але крім шуму, присутнього в навколишньому середовищі, приймач при його роботі виробляє шум. Це пов'язано з впливом фотонів на поверхню приймача. Описано два основних типи джерела шуму: постріл і теплової шум. Тепловий шум є явищем флуктуації енергетичної рівноваги, а дробовий шум, створюваний поточними коливаннями, відноситься до випадкових природу поглинання фотонів і рекомбінації електронних дірок. Він може бути змодельований з використанням розподілу Пуассона і являє собою білий шум [28]. На додаток до того, що генерується фотонами світла, існує компонент, званий темновим струмом, який впливає на дисперсію шуму пострілу ($\sigma_{\text{shot}}^2 = \sigma_{\text{light}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2$). Доведено, що дисперсія шуму пострілу має дві складові, пов'язані з прямим і оточуючим світлом. Це докладно описано в [29], де дисперсія дробового шуму визначається як функція електричного заряду (q), отриманої середньої оптичної потужності (P_r), ширина смуги шуму (B),

фоновий струм (I_{bg}), чутливість R_r фотоприймача і фактор, пов'язаний з шириною смуги шуму (ζ). Тепловий шум також визначається як залежить від таких факторів, як постійна Больцмана (K), абсолютна температура (T_k), площа детектора (A), коефіцієнт посилення по напрузі розімкнутого контуру (G) і коефіцієнт шуму польового транзисторного каналу (η). Але флуктуації струму через напівпровідник через дробового шуму можуть бути розподілені з використанням перетворення Фур'є як [30]

$$I_n(t) = \sum_{k=1} i_k(t), \quad k \in N \quad (14)$$

Практично дуже важко розділити дробові і теплові шуми. але дисперсія σ^2_n повного шуму дорівнює сумі дисперсій (σ^2_{shot}) шуму пострілу і (σ^2_{th}) теплового шуму (15).

$$\sigma^2_n = \sigma^2_{shot} + \sigma^2_{th} \quad (15)$$

σ^2_{shot} и σ^2_{th} Різнів [24], [26] як

$$\sigma^2_{shot} = B[2qI_{bg}\zeta + 2qP_r\gamma R_r] \quad (16)$$

$$\sigma^2_{th} = \frac{8\pi K T_k}{G} \eta A \zeta B^2 + \frac{16\pi K T_k \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 \zeta_{th} B^3. \quad (17)$$

1.9.2. Оптичний інтерференційний шум

Не можна вивчати шум по каналу VLC, не згадуючи про оптичні перешкоди, які виникають на оптичній лінії зв'язку між світлодіодами та фотодетектор. Слід зазначити, що в середовищі передачі існує фоновий шум, що виходить від сонячного світла. Цей фоновий шум може супроводжуватися лампами розжарювання і флуоресцентним шумом. Це викличе фоновий струм в фотодетекторі. Але цей фоновий струм був врахований при формулюванні дисперсії шуму пострілу, наведеної в (16).

1.10. Стандартизація VLC

Для регулювання передачі в технології VLC робоча група IEEE 802.15.7 Інституту інженерів з електротехніки та електроніки пропонує схеми і методи. Стандарт IEEE 802.15.7 описує фізичний рівень (PHY) технології VLC в трьох частинах: PHY I, PHY II і PHY III. Конкретні схеми модуляції і методи кодування призначені для кожного з цих рівнів. PHY працює від 11,67 кбіт / с до 266,6 кбіт / с, PHY II працює від 1,25 Мбіт / с до 96 Мбіт / с, а PHY III працює від 12 Мбіт / с до 96 Мбіт / с. PHY III, присвячений кільком оптичним джерел з використанням CSK. PHY I і PHYII використовують такі схеми, як OOK і VPPM. Інші організації зі стандартизації існують в VLC. В Японії консорціум видимого світла (VLCC) надає спільну платформу для дослідників, університетів і галузей промисловості для вдосконалення технології VLC. До складу VLCC входять: корпорація Nippon Electric Company (NEC), Panasonic, корпорація Toshiba, Samsung Electronics, Casio Computer, лабораторії Nakagawa і корпорація Sharp. Діяльність консорціуму VLCC полягає в розробці стандартів для технології VLC. VLCC пропонує використовувати VPPM для реалізації систем зв'язку в технології VLC. В Європі Дослідницький форум Wireless World (WWRF) також працює над технологією VLC. Його робоча група відповідає за дослідження середовища VLC. Інші організації, такі як Асоціація телекомунікаційних технологій в Південній Кореї, також вивчають технологію VLC.

1.11 Основні відомості про технологію SDR

1.11.1 Короткі відомості про технологію SDR

Програмно-конфігуруєме радіо (Software Defined Radio -SDR) є радіоустаткування, в якому всі або більшість функції фізичного рівня виконуються в програмному вигляді, а функції, виконувані апаратно, повинні оперативно модифікуватися вимогам робочого стандарту зв'язку. Програмна реалізація більшості функцій по обробці високочастотних сигналів і

оперативне програмне управління апаратурою забезпечують кардинальне підвищення функціональних можливостей радіостанції шляхом підтримки роботи в різних сервісах, широкій смузі частот і в різних стандартах зв'язку.

На інтуїтивному рівні програмно-конфігуруєме радіо визначають як напрям розвитку радіозв'язку, покликаний об'єднати на єдиній апаратній платформі роботу радіостанцій різних типів і різних стандартів. Передбачається, що програмно-конфігуруєме радіо реалізує функції радіоприймача і радіопередавача в програмному вигляді або за допомогою програмно-керованих апаратних компонентів, які в силу своєї фізичної природи не можуть бути реалізовані програмно, як, наприклад, підсилювач потужності або антена.

У термінах концептуальної моделі відкритих систем зв'язку OSI-7 програмно-конфігуруєме радіо визначається як радіостанція, в якій всі або більшість функцій фізичного рівня виконуються в програмному вигляді і можуть бути програмно реконфігуріровані відповідно до вимог стандарту зв'язку і/або змінюватися іншим програмно-керованим обладнанням.

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) визначає програмно-конфігуруєме радіо як програмно конфігуруєме обладнання, в якому радіочастотні параметри можуть бути встановлені або змінені за допомогою програмного забезпечення та/або обладнання, за допомогою якого це досягається.

Програмне зміна стосується діапазону частот, типу модуляції, вихідної потужності, але не обмежується цими параметрами.

Федеральна комісія зв'язку США визначає програмно конфігуруєме радіо як радіоустаткування (приймач), в якому такі параметри режиму роботи, як діапазон частот, тип модуляції і вихідна потужність можуть бути змінені за допомогою програмного забезпечення без змін в апаратних компонентах, використовуваних для випромінювання і прийому радіочастот.

Програмно-конфігуроване радіо передбачає істотні зміни апаратної частини трансивера і вимог, що пред'являються до апаратної частини.

Апаратура програмно-конфігуруемого приймача повинна, перш за все, забезпечувати перетворення прийнятого високочастотного модульованого сигналу з метою його максимально точного (без втрати достовірності прийому) подання до цифрового вигляду за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Апаратура передавача повинна забезпечувати пряме формування модульованого сигналу і посилення потужності. Функції високочастотної апаратної частини приймача програмно-конфігурованого радіо зводяться до забезпечення енергетичного потенціалу радіоканалу - посилення потужності в передавачі і малошумливе посилення прийнятого сигналу в приймачі. Для користувача програмно-конфігуруєме радіо дозволяє реалізувати наступні функції:

- оперативну зміну поточної конфігурації радіостанції з мінімальними витратами часу і коштів;
- оперативне додавання нових функцій і можливостей без дорогої зміни апаратної частини;
- здешевлення поточного обслуговування апаратної частини, загальної для значної кількості радіозасобів;
- використання однієї і тієї ж радіостанції в різних мережах і для різних застосувань.

1.11.2 Архітектури SDR

У традиційному супергетеродинному приймачі обробка сигналу повністю виконують електронними схемами (див. рис.1.12а). Частота сигналу знижується до проміжної частоти (ПЧ), після чого проводиться обробка.

У перших SDR-приймачах (див. рис.1.12б) замість демодулятора використовувався АЦП. Демодуляція і частково фільтрація сигналу проводилися в сигнальному процесорі. Сучасні АЦП набагато швидше, тому цифровий сигнальний процесор (DSP – digital signal proces) може виконувати більше функцій. Для роботи DSP необхідно знати амплітуду і фазу сигналів. Прийнятий сигнал розділяється на дві компоненти: синфазну (I) і квадратурну (Q), зміщену на 90° .

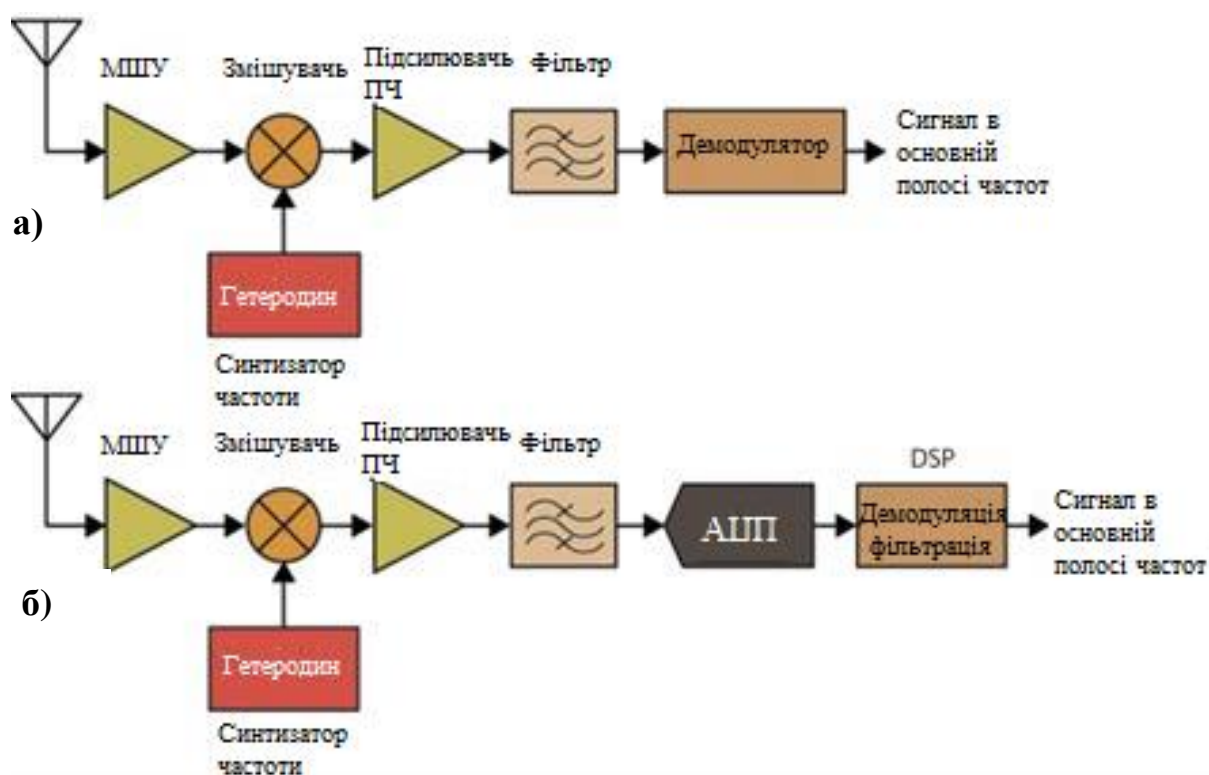


Рисунок 1.10 - Структурна схема супергетеродинного приймача (а) і перших SDR (б)

Схема сучасного SDR-приймача показана на рис.1.13. Вхідний сигнал посилюється малошумливим підсилювачем і ділиться на компоненти I і Q шляхом змішування з сигналом гетеродина з синтезатора частот в ФАПЧ (для отримання квадратурної компоненти він зміщується на 90°). Частота

гетеродина підлаштовується під частоту сигналу, щоб різниця вихідних сигналів змішувачів дорівнювала нулю за відсутності модуляції. Для модульованого сигналу вона дорівнює сигналу основної смуги або вихідного модульованому сигналу. Ця архітектура отримала назву пряме перетворення або перетворення з нульовою проміжною частотою.

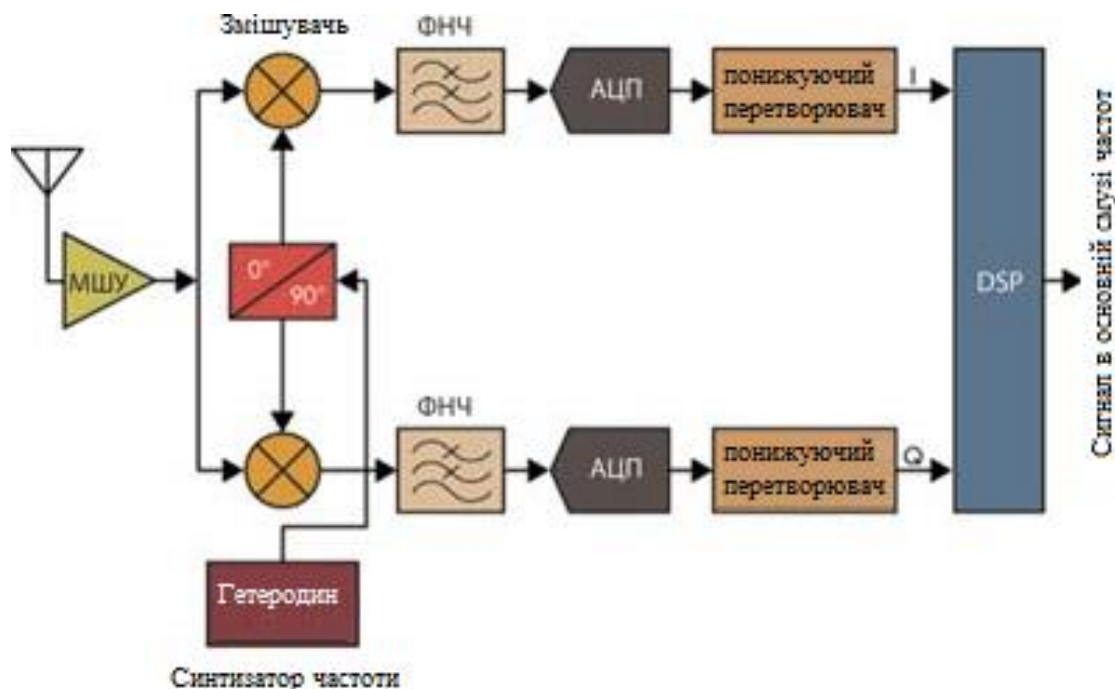


Рисунок 1.11 - Схема сучасного SDR-приймача

Після фільтрації сигналів основної смуги в ФНЧ вони оцифровуються в парі АЦП. Далі в цифровому перетворювачі частота сигналу знижується до робочого діапазону сигнального процесора.

У сучасних передавачах DSP-модулятор розділяє передані дані на I і Q і передає їх на підвищувальний перетворювач (див. Рис.1.14) і ЦАП. Сигнал фільтрується і надходить в змішувач для підвищення частоти до частоти передачі. Потім сигнал проходить через підсилювач і подається на антену. У міру збільшення швидкодії перетворювачів схема спрощується. Останні моделі представляють собою фільтр і МШУ (див. Рис.1.15). Комерційні приймачі використовують смугу до 30 МГц.

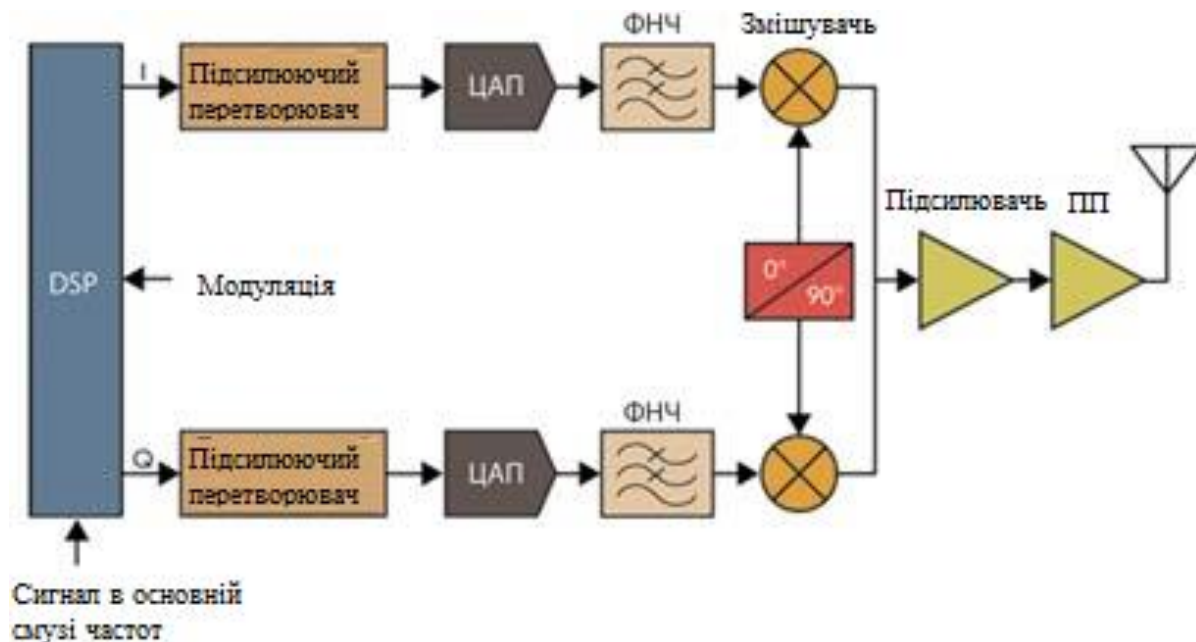


Рисунок 1.12 - Схема сучасного SDR-передавача

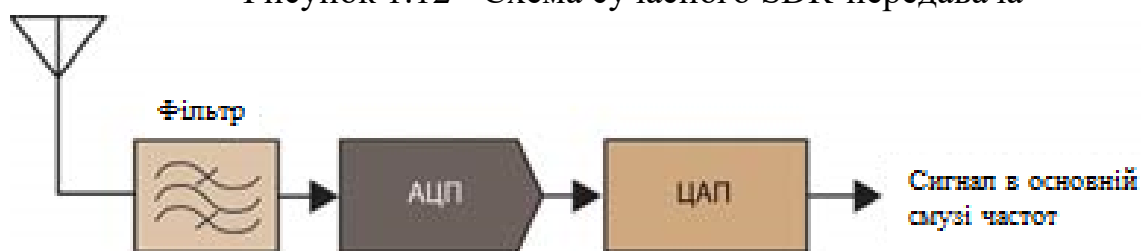


Рисунок 1.13 - Найпростіша апаратна реалізація SDR

Цифровим методом виконуються наступні функції: фільтрація (НЧ, ВЧ, смугові і заграждаючі фільтри), модуляція (AM, FM, PM, FSKM, BPSK, QPSK, QAM, OFDM, ін.), Демодуляція, вирівнювання, стиснення і відновлення, аналіз спектра, передспотворення.

Нові типи модуляції і пов'язані з ними процедури, мають загальний термін «форма сигналу» (waveform). Змінивши програмне забезпечення, радіо переналаштовується на іншу частоту і протокол передачі.

Перевага SDR полягає в простоті апаратної частини. Стандартні радіочастотні схеми скорочуються до мінімуму, їх вартість знижується. Сигнальний процесор бере на себе більшу частину функцій, які раніше виконувалися в аналогових схемах. Цей підхід дуже вдалий, враховуючи гнучкість програмної реалізації і можливість компенсації деяких небажаних ефектів, які виникають в апаратній частини. Більш того, програмна реалізація дозволяє усувати несправності, змінювати і доповнювати функціонал

пристрою і покращувати його характеристики з мінімальними витратами. Зокрема SDR дозволяє швидко додавати нові типи модуляції, протоколи передачі і т.д. У разі апаратної реалізації це вимагало б виготовлення нової схеми. Недоліки у SDR теж є. По-перше, це складність програмного забезпечення, витрати на розробку, в т.ч. часові, більше енергоспоживання і в деяких випадках обмежений частотний діапазон.

1.12 Основні відомості про USRP

Пристрої серії USRP представляють собою високопродуктивну апаратну основу для програмно-конфігурованих радіосистем (Software-Defined Radio, SDR), що дозволяють швидко проектувати і реалізовувати потужні, гнучкі програмно-які визначаються системи радіозв'язку. Апаратні комплекси ідеально підходять для додатків, що вимагають високої РЧ, продуктивності і великої пропускної здатності. Такі програми включають в себе розробку фізичного рівня прототипів, широкий спектр протоколів бездротового доступу і когнітивного радіо, моніторинг ефіру, запис і відтворення радіосигналів, а також розгортання бездротової мережі датчиків. Дані продукти пропонують можливість роботи з когерентними багатоканальними системами MIMO з високою пропускною здатністю і динамічним діапазоном.

Кожна пристрій оснащений високошвидкісними АЦП і ЦАП, потужною ПЛІС і містить слот для установки дочірніх РЧ плат, що визначають діапазон частот сигналів. Типові комплектації використовують дочірню плату WBX.

Інтерфейс Gigabit Ethernet слугує для підключення до керуючого хост-комп'ютера. Це дозволяє користувачеві обробляти дані в широкій смузі в режимі реального часу при прийомі і передачі даних одночасно (повний дуплекс).

USRP Hardware Drive є офіційним драйвером для всіх продуктів Ettus. USRP Hardware Driver підтримує такі ОС як: Linux, Mac OSX, Windows.

Основні можливості:

- Модульна архітектура
- Діапазон частот від постійного струму до 6 ГГц
- Двоканальний АЦП 100 Мвиб / с, 14 біт
- Двоканальний ЦАП 400 Мвиб / с, 16 біт
- Цифрові перетворювачі DDC / DUC с дозволом 25 мГц
- Підключення Gigabit Ethernet для безперервного обміну даними з ПК до 50 Мвиб / с

- Когерентні системи MIMO
 - Інтерфейс розширення 2 Гбіт / с
 - ПЛІС Spartan 3A-DSP 1800 (N200)
 - ПЛІС Spartan 3A-DSP 3400 (N210)
 - 1 MB High-Speed SRAM
 - Допоміжні цифрові лінії введення-виведення
 - Джерело опорного сигналу TCXO 2.5 ppm
 - Стабільність частоти 0.01 ppm з опцією GPSDO
 - На базі програмного забезпечення GNU Radio, LabVIEW™ і Simulink™
- Пристрої USRP можуть бути пов'язані один з одним для створення когерентної багатоканальної системи в режимі MIMO (Multiple Input Multiple Output). Два блоки можуть бути з'єднані, щоб реалізувати повну конфігурацію 2x2 MIMO, використовуючи спеціальний кабель розширення MIMO. Зовнішній сигнал PPS і опорний сигнал також можуть бути використані для створення великих багатоканальних систем. Підключення MIMO здійснюються через роз'єми на передній панелі кожного блоку.

1.12.1 Елементи лицьовій панелі

Передня панель пристрою містить роз'єми для підключення і світлодіоди для індикації стану пристрою (рис.1.14).



Рисунок 1.14 – Лицьова панель USRP N200

Роз'єми передньої панелі позначаються наступним чином (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – позначення роз'ємів передньої панелі

Маркування роз'єму	Опис
RF1	Введення-виведення РЧ сигналу 1
RF2	Введення-виведення РЧ сигналу 2
REF CLOCK	Введення і виведення опорного сигналу 10 МГц
PPS IN	PPS IN Введення і виведення сигналу PPS
MIMO EXPANSION	Підключення кабелю розширення MIMO для формування когерентної системи
GB ETHERNET	Підключення кабелю Ethernet для зв'язку з ПК
POWER	Електроживлення постійного струму

1.12.2. Світлодіоди на передній панелі

На передній панелі розташовано 6 світлодіодів, які можуть бути корисними для налагодження програмних і апаратних проблем. Призначення світлодіодів наступні (табл 1.3).

Таблиця 1.3 – Призначення світлодіодів

Світлодіод	Функція
A	Передача
B	Підключення кабелю MIMO
C	Прийом
D	Завантаження прошивки
E	Опорний сигнал
F	Завантаження CLPD

1.13 GNURadio

GnuRadio є вільним і відкритим джерелом програмного забезпечення, що розширює інструментарій та забезпечує можливості програмного радіомовлення. Він використовується в основному в якості програми управління SDR пристрою, яка готує дані для обробки сигналу. Операція обробки сигналу закінчується пізніше спеціалізованим модулем. GNURadio пропонує легко пераштовуєму радіосистему, що дозволяє користувачам створювати різні пристрої без необхідності покупки декількох дорогих радіостанцій. Його можна використовувати для створення додатків, отримання даних з цифрових потоків або передавати дані в цифрові потоки. Потім ці потоки передаються з використанням апаратних засобів.

GnuRadio має фільтри, каналні кодери, елементи синхронізації, еквайзери, демодулятори, вокодер, декодери і багато інших елементів (блоків). Також GnuRadio включає в себе спосіб підключення цих блоків і управління передачею даних від одного блоку до іншого. Якщо знайти блок, який відсутній, можна легко створити і додати його. Будь-який тип даних може передаватися від одного блоку до іншого (наприклад, біти, байти, вектори або більш складні типи даних).

При створенні програмних симуляторів, для розробки можливо використовувати візуальне середовище GNURadio Companion або бібліотеки,

написані на мовах C ++ і Python [33]. Блоки створюються в C ++, а графи будуються і працюють на Python. В основному C ++ використовується для низкорівневого програмування, в той час як, Python для високорівневого, для того, щоб створювати графи і блоки з більш високим рівнем. На рис.1.15 наведена загальна структура GnuRadio.

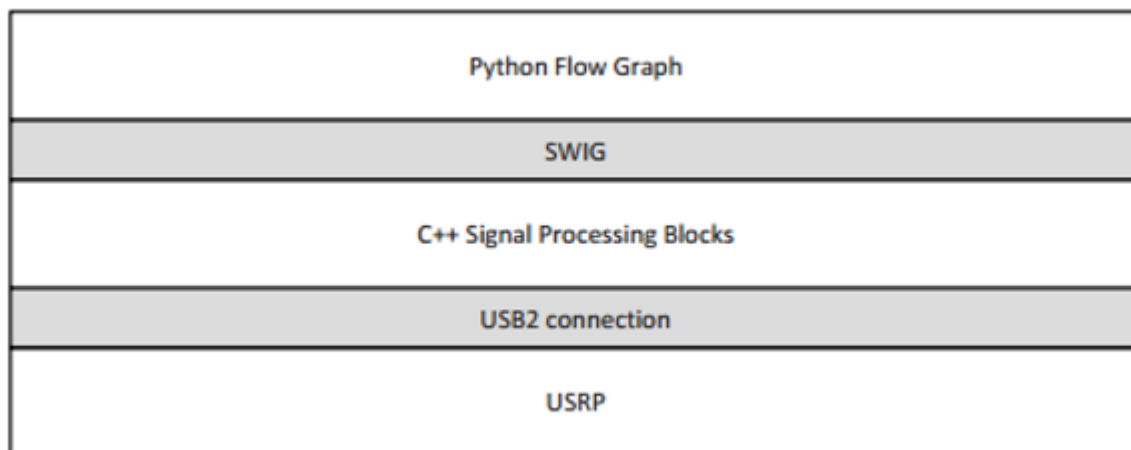


Рисунок 1.15 - Загальна структура GNURadio.

1.13 Архітектура програмного забезпечення GNU Radio.

Всі схеми в GNU radio будуються з блоків. Блок - це елементарна одиниця обробки сигналу, "чорний ящик" з декількома входами і виходами. Виходи одних блоків можна з'єднувати з однотипними входами інших блоків, будуючи блок-схеми. Блоки можна з'єднувати як програмно (всередині програм на Python або C ++), так і в графічному редакторі (GNURadio companion). Алгоритм обробки сигналу всередині блоку реалізується на C ++ (з асемблерними вставками), для всіх блоків існує обв'язка на Python.

Блоки, з яких будується проект, діляться на наступні основні категорії:

Source. Джерело сигналу, служить постачальником цифрових даних представляють сигнал. Наприклад, це блоки osmoscom Source, RTL-SDR Source (SDR-радіоприймачі), Signal Source (синтез періодичного сигналу), Wav File Source (рис.1.16), File Source (потоківі дані з файлу), і т. д. Джерело сигналу має тільки вихідний коннектор (out), розташований в діаграмі праворуч від блоку.

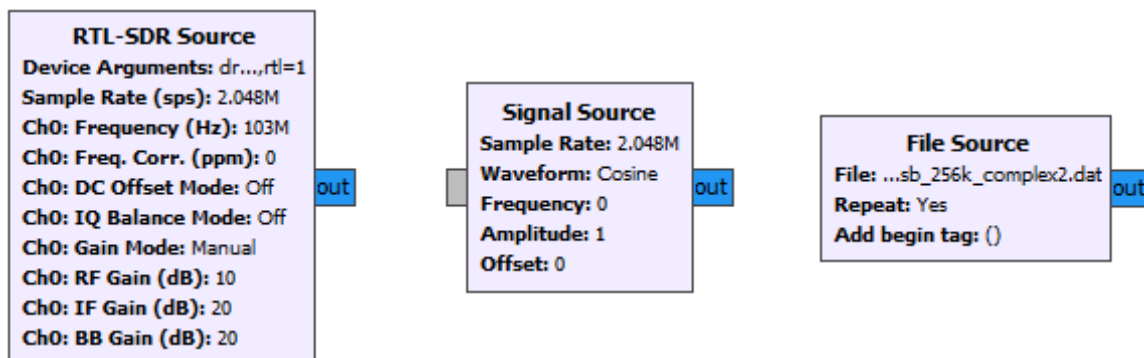


Рисунок 1.16 – Приклад блоків вхідних сигналів

Sink. Одержувач сигналу, служить для кінцевої обробки приходять даних - наприклад для візуалізації або виведення у вигляді звуку на аудіо-карту РС. Прикладами можуть служити WX GUI Waterfall Sink (відображення спектру в часі в вигляді водоспаду), Scope Sink (осцилограма)(рис1.17). Одержувач сигналу має тільки вхідний конектор (in), розташований в діаграмі праворуч від блоку.

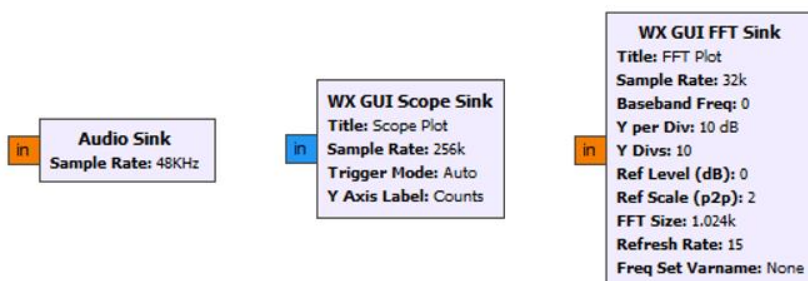


Рисунок 1.17 – Приклад блоків кінцевої обробки сигналів

1.13.1 Проміжні блоки.

Це фільтри, помножувачі, інтерполятора, дециматри і т. Д. Служать для пробразованія сигналів, і мають як вхідні конектори (in), так і вихідні (out)(рис.1.18).

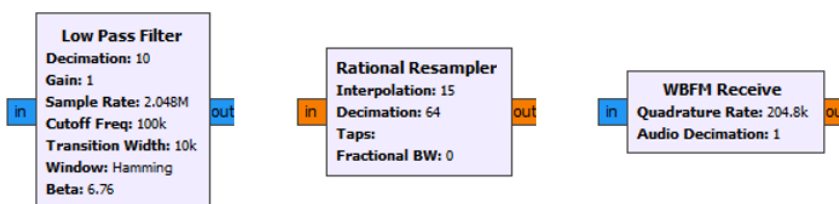


Рисунок.1.18 – Приклад проміжних блоків

Блоки Source і Sink можуть бути в одному з 2 станів: Enabled (блок активний), Disabled (блок відключений, він не використовується в проекті). Проміжні блоки (через який проходить сигнал) також можуть бути пропускним, коли цей блок веде себе просто як лінія з'єднання входу з виходом, так як Обробка сигналу в блоці відключена.

1.13.2 Візуальні керуючі блоки

Це движки (слайдери), які служать для плавного регулювання будь-якої величини (наприклад зміни частоти настройки або рівня сигналу)(рис.1.19), радиокнопки, галочки і т. П. (Часто їх називають елементи GUI, або блоки GUI). Візуальні керуючі блоки не мають конекторів, вони просто створюють значення змінної для проекту GNU Radio.

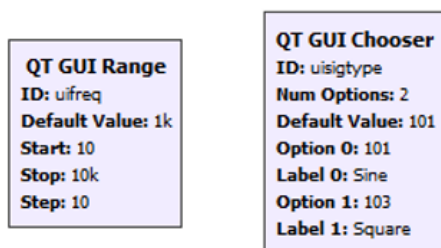


Рисунок 1.19 – Візуально керуючі блоки

До візуальних блокам також можна віднести кошти відображення спектру (FFT Sink, Frequency Sink) і форми сигналу (Scope Sink).

Приклад вигляду візуальні блоки управління (рис1.20):

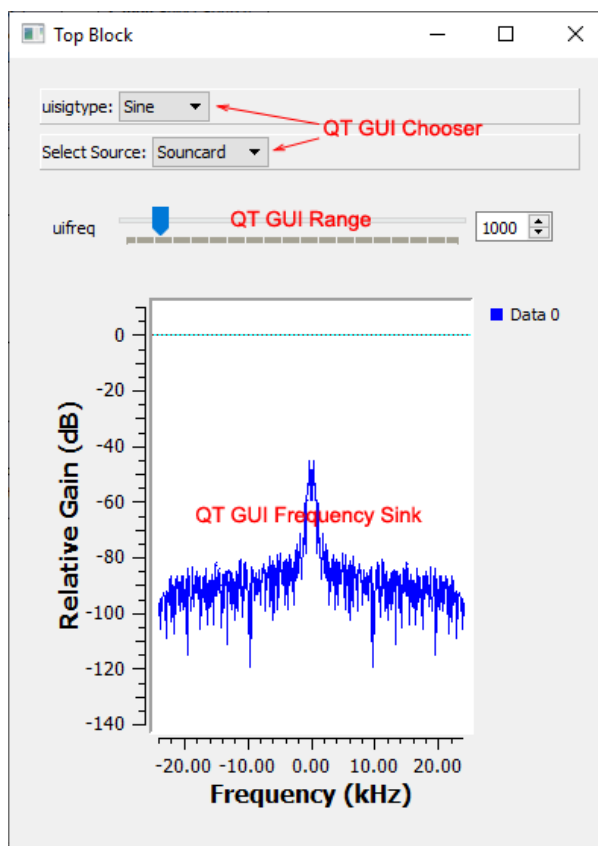


Рисунок 1.20 – Приклад візуального блоку

Візуальні блоки бувають двох видів: QT і WX. Це префікси, що відображають спосіб створення блоку, причому блоки QT і WX часто несумісні один з одним. В даний час найбільше функціональних блоків WX, проте в майбутньому розробники GNU Radio планують повністю перейти на блоки QT.

1.13.3 Невізуальні блоки

Створюють глобальні змінні, константи, опції. Служать для зручності управління проектом GNU Radio (рис.1.21), щоб будь-яку величину можна було ставити тільки в одному місці. Самий гарний приклад - змінна `samp_rate` (блок `Variable`), яка автоматично створюється разом з новим проектом, (`samp_rate` визначає частоту дискретизації за замовчуванням для різних блоків цифрової обробки). Також до невізуальні блокам можна віднести блок `Options`, в якому визначаються опції проекту (розмір вікна, заголовок, опис і т.д.).

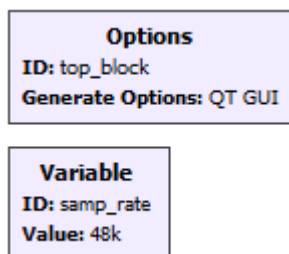


Рисунок 1.21 – Приклад невізуальних блоків

1.13.4 Управління розміщенням візуальними блоками

У всіх блоків GUI є властивість Grid Position, що дозволяє управляти розміщенням елементів управління на формі запущеного проекту. Для кожного параметра Grid Position можна використовувати 2 або 4 числа. Перші 2 числа вказують номер рядка (row) і стовпці (column) на відображається формі (обидва номери відраховуються відносно 0). Це можна уявити як сітку, в якій стільки рядків і стовпців, скільки Вам потрібно.

Якщо в параметрі Grid Position використовуються 4 числа, то значення перших двох залишається таким же (номер стовпчика і рядка). Однак решту 2 числа задають, на скільки стовпців і рядків триває блок GUI. Наприклад, якщо на верхньому рядку форми є 3 елементи управління - блоку GUI (у яких параметри Grid Position [0,0], [0,1] і [0,2]), то можна управляти розмірами блоків GUI в першому ряду, вказуючи Grid Position як [1,0,1,3] (тут квадратні дужки вказані просто для зручності читання, насправді в параметрі Grid Position їх вставляти не треба). На рис 1.22 показано як приклад вікно запущеного GRC-проекту, де верхні п'ять рядків графіка FFT займає 5 рядків і 4 стовпчика. Важливо пам'ятати, що нумерація рядків і стовпців починається від нуля, так що наступна порожній рядок після графіка FFT буде 5, де розміщено два GUI-блоку, що показують частоту (в стовпчиках 1 і 3).



Риснок 1.22 – Управління візуальними блоками

1.13.5 Частота оцифровки сигналу

Найважливіший параметр системи SDR - частота, з якою оцифровуються вхідні дані (радіосигнал). Це частота оцифровки, або частота вибірок АЦП, англійський термін *Sample Rate* (в проєкті GRC задається значенням змінної *samp_rate*). Чим вище ця частота, тим ширше огляд спектра SDR-радіоприймача. Наприклад, якщо Ви хочете приймати сигнал в смузі частот 1 МГц, то необхідно, щоб частота вибірок була не меншою 2 МГц. Однак якщо Ви хочете виконати складні перетворення сигналу, або хочете перейти до обробки звукових частот, то слід знизити діапазон частот і зменшити частоту вибірок.

Блоки GRC виконують дві функції для управління поточною частотою вибірок - децимація і інтерполяція. Децимація ділить частоту вибірки на ціле число, а інтерполяція домножує. Наприклад, коли ви робите децимації сигналу на 4, то по суті ділите *sample rate* на 4. Інтерполяція на 3 потроює *sample rate*. Часто децимація і інтерполяція використовується для отримання малих значень коефіцієнта ділення частоти вибірок. Наприклад, щоб підняти *sample rate* 1000 кГц до стандартній частоті вибірок звукової карти 44.1 кГц, Ви могли б спочатку виконати інтерполяцію сигналу на 441, після чого децимації на 1000.

1.13.6 Коннектори та типи даних

Коннектори блоків мають колір, який показує тип даних цього коннектора. Синій для комплексних даних (Complex), помаранчевий для даних з плаваючою комою (Float), темно-зелений для 32-бітних цілих зі знаком (Int), жовтий для 16-бітних цілих зі знаком (Short), фіолетовий для 8-бітних зі знаком (Char)(рис 1.23).

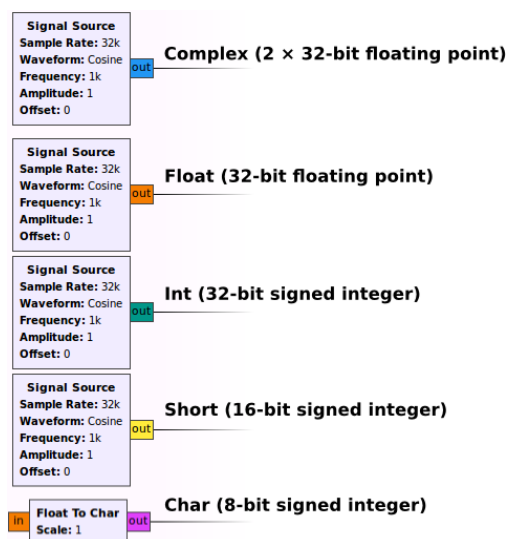


Рисунок 1.23 – Коннектори блоків

Входи і виходи блоків (їх відповідні коннектори) можна з'єднувати один з одним. Для цього спочатку робиться клік мишею на одному коннекторі, потім ще один клік на іншому коннекторі. Виходить лінія зв'язку зі стрілочкою, яка показує напрямок даних. При створенні з'єднань існують прості правила. По-перше, не можна з'єднувати один з одним виходи. По-друге, повинні збігатися типи даних на кінцях лінії зв'язку (рис 1.24).

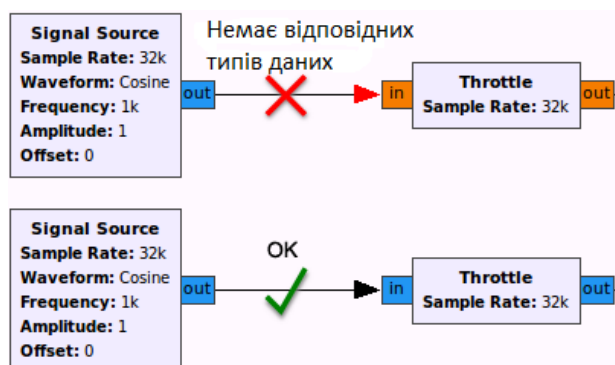


Рисунок 1.24 – приклад з'єднання блоків

Помилки в проєкті (неправильні зв'язки, помилково налаштовані або нез'єднані блоки) середовище розробки GNU Radio Companion показує червоним кольором.

1.13.7 Блоки які найчастіше використовуються

В таблиці 1.4 представлені основні блоки, які використовуються найчастіше, з їх коротким описом.

Таблиця 1.4 – основні блоки GNU Radio

Де знаходиться	Блок	Функція
невізуальні блоки		
Core Channelizers ->	Frequency Xlating FIR Filter	Виконує перетворення спектру частот сигналу, з можливістю децимації FIR-фільтри. Може використовуватися як каналізатор - для виділення вузької смуги частот з широкопasmового сигналу приймача.
Core -> File Operators	File Source	Сигнал, записаний в файл.
Core -> Filters	Hilbert	Перетворення Гільберта.
	Low Pass Filter	Фільтр нижніх частот.
Core -> Level Controllers	ACG, AGC2, ACG3	Блок АРУ. Параметр Reference задає значення, до якого потрібно підлаштовувати сигнал. Параметри Attack Rate і Decay Rate задають швидкість наростання і швидкість спаду посилення.
Core -> Math Operators	Add	Підсумовує (лінійно мікшує) кілька сигналів (за замовчуванням два сигналу).
	Multiply	Множення сигналів. Нелінійна операція, відповідна роботі змішувача радіоприймача. Якщо помножити одну частоту на іншу, то на виході вийде сума і різниця частот.
	Multiply Const	Множення на константу. Константою може бути змінна, що задається графічним

		елементом управління, наприклад WX GUI Slider.
Core -> Misc	Throttle	Регулює потік вибірок сигналу так, щоб середня частота вибірок не перевищувала <code>samp_rate</code> . Цей блок зменшує навантаження на процесор і запобігає зависання виконуваного проекту, проте погіршує роботу проекту в реальному часі (зокрема, звук Audio Sink стає переривчастим). Блок слід використовувати тільки в додатках GUI, де немає ніякого іншого блоку, що обмежує швидкість надходження вибірок. Частота вибірок повинна контролюватися джерелом (Source) або одержувачем (Sink) сигналу, наприклад USRP або звукова карта.
Core Resamplers ->	Rational Resampler	Блок передискретизації сигналу (децимація і інтерполяція).
Core -> Type Converters	Complex To Float	Перетворення потоку комплексних вибірок сигналу (IQ) в два потоки сигналу - дані реальної складової (<code>re</code>) і уявної (<code>im</code>).
	Complex To Mag	Перетворення сигналу з комплексного в речовинний формат. Може використовуватися для отримання обвідної, або обчислення модуля з високочастотного радіосигналу (демодуляція AM).
	Float To Complex	Перетворення двох потоків даних (<code>re</code> і <code>im</code>) в комплексний сигнал (IQ).
Core -> Variables	Variable	Перемінна
Waveform Generators	Signal Source	Синтез періодичного сигналу Constant (постійний струм, DC), Cosine і Sine (синусоїдальний сигнал, Cosine і Sine відрізняються один від одного по фазі на 90 °), Square (прямокутний сигнал), Triangle (трикутник), Saw Tooth (пила).
Візуальні блоки		
Core -> Deprecated	Selector	Перемикач шляхів поширення сигналу (аналог мультиплектора).
Core -> GUI Widgets -> QT (или WX)	Chooser	Вставляє в форму орган управління, дає можливість вибрати одну з величин списку. Список задається в форматі [значення1, значення2, ..., ЗначенняN]. Дозволяє управляти вибором опцій блоків.

		Наприклад, змінювати форму сигналу (Sine, Square).
	Range	Регулятор (слайдер), дозволяє змінювати або редагувати величину (змінну).
	Slider	
	Text	Додає на форму виконуваного проекту текстове поле введення, що дозволяє змінювати значення змінної.
Core -> Instrumentation - > QT (или WX)	FFT Sink	Графік спектру сигналу. Встановіть параметр Average Alpha в 0 для автоматичної установки. Залиште параметр Window Size незаповненим для створення вікна з розміром за умовчанням, або введіть (ширина, висота) в точках. Використовуйте параметр настройки сітки Grid Position (рядок, стовпець, інтервал рядки, інтервал стовпчика) для налаштування розташування графічного елементу у вікні. Використовуйте Notebook Param (notebook-id, page-index) для позиціонування графічного елементу на потрібній сторінці.
	Histo Sink	Гістограма вибірок сигналу.
	Number Sink	Смуга, що показує рівень сигналу.
	Frequency Sink	Відображення частоти.
	Scope Sink	Відображення форми сигналу у часовій області (осцилограф).
	Waterfall Sink	Відображення зміни спектра в часі в вигляді водоспаду.

Висновки до розділу 1

В межах даного розділу в достатній мірі розкрито відомості про технологію передачу даних з використанням видимого світла. Розглянуто технологію програмно керованого радіо SDR та принципи побудови та основні технічні характеристики, сутність приймачів сімейство пристроїв Universal Software Radio Peripheral (USRP) від Ettus Research, . Отримано відомості, що послуговували не тільки основою для розуміння технологічного аспекту їх роботи, але й ключем до якісного вивчення властивостей розглянутого програмного забезпечення.

Починаючи з пункту 1.8 виконувався аналіз особливостей програмного забезпечення GNU Radio для роботи з програмно-конфігурованим радіо та наведено основні технічні характеристики трансивера USRP. Отримано усі необхідні дані для проведення досліджень з використанням означених програмних засобів.

В наступному розділі буде запропоновано варіант програмно-апаратної реалізації стенду зв'язку з використанням видимого світла, на базі трансивера USRP

2. СТВОРЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИДИМОГО СВІТЛА

В межах даного розділу я пропоную варіант реалізації стенду для дослідження передачі даних з використанням видимого світла який базується на використанні програмно-конфігурованого радіо, яке працює під управлінням програмного забезпечення GNU Radio

2.1. Проектування стенду VLC

Стенд для комунікації в видимому світлі забезпечує платформу для дослідження, вимірювання та розробки технології VLC. За останні кілька років в світі було запропоновано кілька установок для випробувань у видимому світлі. Випробувальні стенди зазвичай демонструють односпрямовану зв'язок невеликої відстані з метою підвищення швидкості передачі даних по лінії VCL [34] [35]. Ці випробувальні стенди використовувалися для подачі точних інформаційних сигналів від генератора сигналів на канал VLC і прийому їх за допомогою високошвидкісного осцилографа або аналізатора спектра.

Тестовий стенд VLC моделюється, як показано на рис.2.1, і складається з частин від джерела даних через світловий канал до приймача даних. Модель також надає структуру і деталі для процесу проектування випробувального стенду.

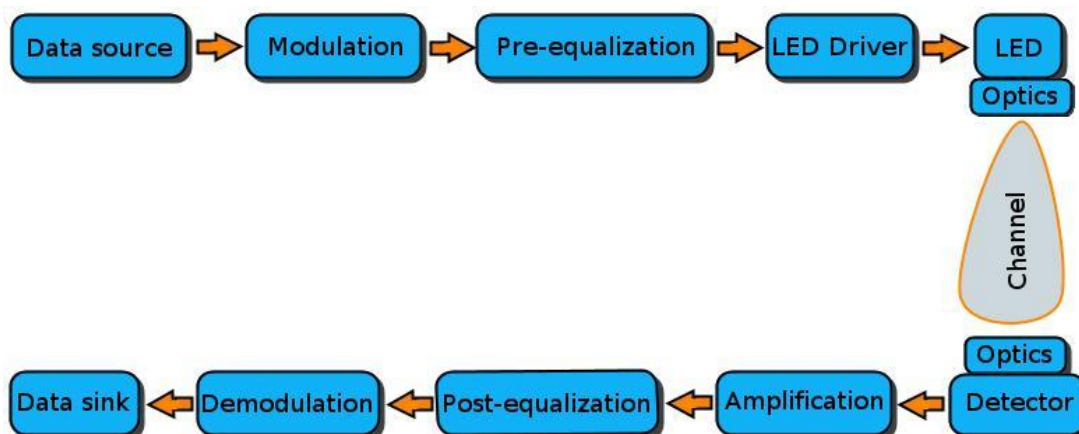


Рисунок 2.1 - Модель передачі VLC.

Процес проектування розділений на менші частини для отримання більш чіткої структури дослідження. Всі деталі розроблені окремо, щоб бути якісними та перевіреними.

Процес проектування розпочався з визначення вимог випробувального стенду та вибору відповідної платформи для реалізації. Основні критерії для проектуванням випробувального стенду є:

1. Масштабованість.
 - а) Варіації з типами і кількістю світлодіодів.
 - б) Доступні варіанти схем модуляції.
 - в) Підключення до іншого програмного забезпечення.
 - г) Підключення до інших засобів зв'язку
2. Зручність використання
 - а) Легко змінити за допомогою програмного забезпечення
 - б) Просте підключення до різного обладнання і мереж
3. Можливість представити реальні сценарії з технологією VLC

Щоб відповідати заявленим критеріям, випробувальний стенд пропонується впровадити з пристроями USRP SDR [36], які надають універсальну і економічно ефективну платформи для проектування системи. Конструкції системи можуть бути легко змінені і продубльовані, а використовувані параметри, такі як частоти, підсилення і фільтрація, просто контролюються в реальному часі за допомогою програмного забезпечення [37]. Крім того, безліч прикладів програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом є на GitHub [38]. Пристрої USRP можуть обробляти безліч функцій під час сеансів зв'язку без необхідності їх налаштування вручну. На рис. 2.2 зображено пропонуєма схему випробувального стенду VLC.

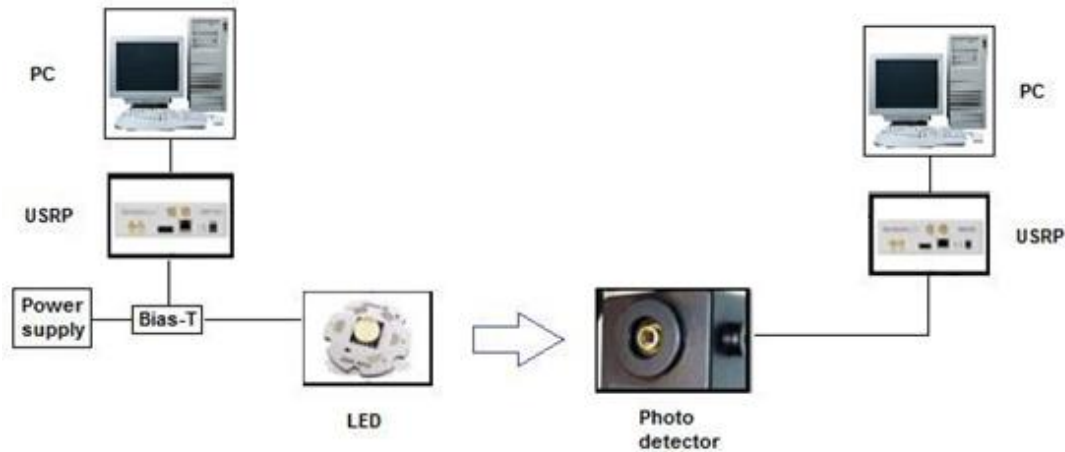


Рисунок 2.2 - Структура стенду для зв'язку у видимому світлі.

Як видно з рисунка 2.2, конструкція випробувального стенду VLC досить проста, оскільки обробка сигналів і підключення обробляються в пристроях USRP і персональних комп'ютерах. Єдиними зовнішніми компонентами є світлодіоди, детектори та схеми управління світлодіодами. Ланцюги драйверів світлодіодів складаються з джерел живлення, підключених до ланцюгів Bias-T. Використання зовнішнього джерела живлення забезпечує широкий динамічний діапазон для використовуваних рівнів напруги і струму, забезпечуючи достатні рівні потужності практично для всіх видів світлодіодних компонентів. Інші важливі зміни в випробувальному стенді будуть зроблені в програмному забезпеченні

2.2. Передавач VLC

VLC-передавач представляє собою джерело світла з модуляцією інтенсивності світла, метою якого є перетворення інформаційних даних в світловий сигнал з використанням модуляції. Перетворення електричного сигналу в світло повинне бути максимально лінійним для досягнення оптимальних умов передачі. Нелінійність, викликана світлодіодом і світлодіодним драйвером, може бути виправлена за допомогою технологій попередньої корекції. Структура базового передавача VLC визначена на рис.2.3.



Рисунок 2.3 - Основні частини передавача VLC.

Як видно зі структури, передавач містить шість частин від джерела даних до оптики передавача, які представляють собою оптичний передавач, світлодіод, драйвер світлодіода, попереднє вирівнювання, модуляцію і джерело даних. Джерело даних, модуляція та попереднє вирівнювання реалізовані в пристрої USRP та драйвері світлодіодів, світлодіодах та оптиці передавача із зовнішнім компонентами. Попередня корекція також може бути реалізована за допомогою зовнішніх ланцюгів.

2.2.1. Світлодіод

Світлодіод (LED) є основним компонентом VLC подвійного призначення, що поєднує в собі функціональність освітлення і бездротовий зв'язок. Світлодіод може забезпечити дуже високу ширину смуги модуляції для зв'язку. Так як сила світла LED була поліпшена протягом 21 століття світлодіоди стали звичайним компонентом пристроїв освітлення. Світлодіоди широко застосовуються для внутрішнього освітлення, автомобільних і громадських вуличних ліхтарів. Законодавство з енергоефективності також прискорило використання світлодіодних ламп.

Компонент LED являє собою діод, виготовлений з напівпровідникового матеріалу, який випромінює світло певної довжини хвилі. Колір випромінюваного світла залежить від використовуваних матеріалів і структури світлодіода. Для цілей освітлення потрібний білий світ з кількома довжинами хвиль світла. Існує два основних способи отримання білого світла з використанням світлодіодних компонентів. Найпоширеніший і дешевший спосіб - використовувати синій

світлодіод з люмінофорним покриттям. Інший спосіб - використовувати багатобарвні світлодіоди, такі як RGB, які об'єднують основні кольори для отримання білого світла. Люмінофорне покриття поверх синього світлодіода поширює спектр генерованого синього світла на інші кольори, і видимий світ є білим. Інший спосіб - використовувати багатобарвні світлодіоди. Багатобарвний світлодіод може випромінювати, наприклад, червоний, синій і зелений світло, де суміш цих джерел світла сприймається як білий світ. [39]

Світлодіодний компонент вимагає правильних умов живлення при створенні видимого світла. Світлодіод залишається вимкненим при пороговому рівні напруги, але на цьому рівні інтенсивність випромінюваного світла збільшується майже лінійним чином, споживаючи більше струму для проходження через компонент. Робота VLC заснована на цій лінійній залежності потужності і світловіддачі світлодіода. Лінійна залежність світлової віддачі світлодіода LZC-00MC40 від прямого струму показана на рис.2.4 [40]

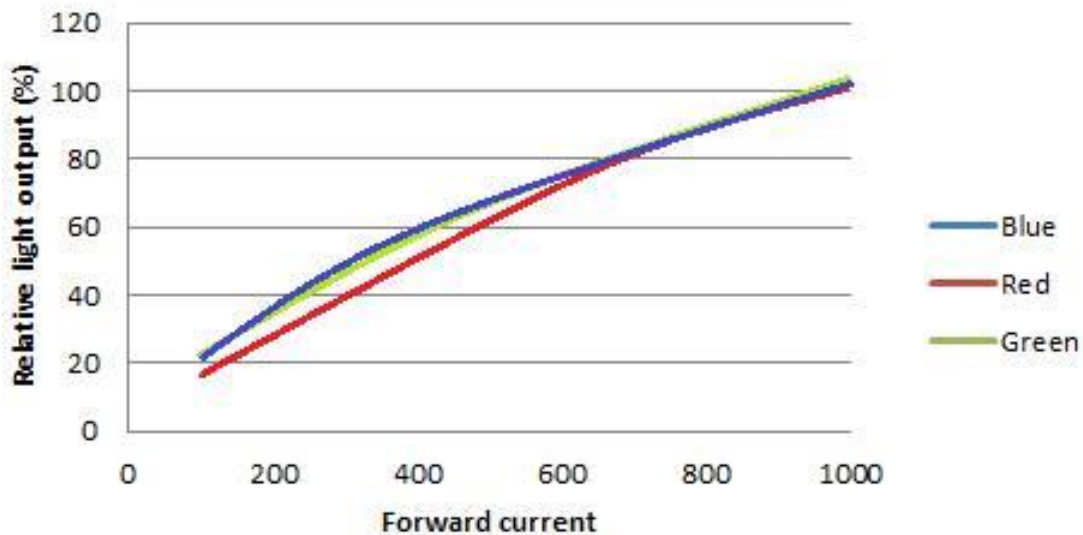


Рисунок 2.4 - Відносна потужність світла в залежності від прямого струму світлодіода RGB.

Відносний світловий потік буде збільшуватися майже лінійно за рахунок прямого струму у всіх трьох кольорах світлодіода. Існує максимум 10% різниці світлового потоку між кольорами на нижчих рівнях струму. Зміни можна

розглядати як зміну кольору і дисбаланс виходу білого світла. Щоб уникнути колірної дисбалансу, використовувальних струмові рівні повинні регулюватися окремо або приблизно 750 мА струм, як виробник компонент рекомендує [40].

Відносну лінійність світлового виходу слід також знаходити в прямій напрузі поведінка світлодіода, оскільки сигнал інформаційних даних VLC модулюється в різниці напруг. Тому що ніяких цифр від залежності вихідної напруги від світла не було наведена у технічному паспорті виробника, співвідношення між світловою потужністю та пряма напруга повинна бути індукована з інформації, зображеної на рис. 2.4 і Рис.2.5 [40].

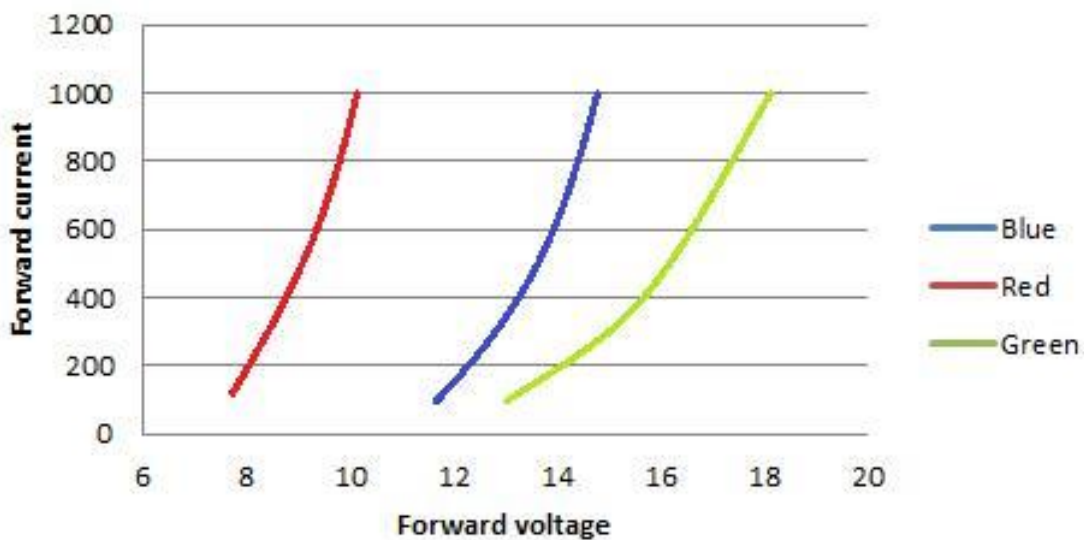


Рисунок 2.5 - Прямий струм в порівнянні з прямим напругою індикатора RGB.

Крива прямого струму проти прямої напруги світлодіода RZ LZC-00MC40 На рисунку 2.5 показано, як кореляція має деяку лінійність між струмом і напруга при використанні напруги вище порогового рівня. Лінійність краща, коли використано рівень струму понад 400 мА. Переважно використовувати типовий рекомендований 750 Рівень струму мА, пояснений раніше для забезпечення належної лінійності також напруги модуляція.

Крива прямого струму в залежності від прямого напруги RGB-світлодіода LZC-00MC40 на рис. 2.5 показує, як кореляція має деяку лінійність між струмом і напругою при використанні напруги вище порогового рівня. Лінійність краще при використанні рівня струму понад 400 мА.

Температура світлодіодного компонента робить деякий негативний вплив на вихідну інтенсивність світлодіода, що слід враховувати при проектуванні системи VLC. Перша важлива річ полягає в тому, що відносна інтенсивність світлового потоку зменшується одночасно з нагріванням світлодіодного компонента. Наприклад, світловий вихід RGB LED LZC-00MC40 зменшується приблизно на 70% з червоним, на 20% з зеленим і на 10% з синім світлом, коли температура компонента підвищується з 20 ° C до 120 ° C [40]. Це слід враховувати при розробці детектора VLC і діапазону його виявлення. Детектор повинен бути спроектований для роботи з світлодіодом, який досяг робочої температури і інтенсивності світлового потоку. Іншим дефектом нагрівання світлодіода є зрушення довжини хвилі, який може вплинути при використанні вузькосмугових оптичних фільтрів. Зрушення довжини хвилі RGB-світлодіоди LZC-00MC40 може становити кілька нанометрів, що робить його не таким серйозним для VLC, як зниження інтенсивності. Температура світлодіода при нормальному використанні залежить від охолодження світлодіода, використовуваних рівнів потужності, навколишньої температури і самого компонента.

Оскільки смуга пропускання компонентів нормальної світлодіодного підсвічування була обмежена до десятків МГц, для досягнення більш високих швидкостей передачі даних були винайдені більш швидкі компоненти [41]. Три основних типи світлодіодних компонентів з більш високою пропускну здатністю - це світлодіод з резонансною порожниною (RCLED), світлодіод з крайовим випромінюванням і мікро-світлодіод. RCLED використовується для зв'язку по пластиковому волокну, забезпечуючи дуже широку смугу модуляції. Швидкість передачі даних, досягнута за допомогою RCLED, перевищила 1 Гбіт/с, але слабкість компонента полягає в низькій інтенсивності видимого світла, що робить його непридатним для використання на великих відстанях у вільному просторі зв'язку [42]. Світлодіод з крайовим випромінюванням має кращу вихідну інтенсивність, ніж RCLED, і може забезпечувати швидкість передачі даних більш сотень Мбіт / с [42].

2.2.2. Світлодіодний драйвер

Призначення обладнання управління світлодіодами полягає в тому, щоб правильно сумістити світлодіод передавача і керувати ним в лінійному напрузі - області оптичної потужності. Інша основна мета - забезпечити швидкий час наростання і спаду світлодіодів, що впливає на максимальну швидкість передачі даних системи VLC. Крім того, розсіювання потужності і ослаблення сигналу даних повинні бути розглянуті і зведені до мінімуму.

У літературі найбільш широко використовуваним світлодіодним драйвером є схема Bias-T, в якій ідея заснована на додаванні напруги зсуву до сигналу даних і пошуку комбінації для світлодіода передавача [41]. У деяких роботах були розроблені різні транзисторні схеми для посилення сигналу до достатніх рівнів збудження світлодіодів [43]. На Рис 2.6 визначає тип моделюється ланцюга Bias-T

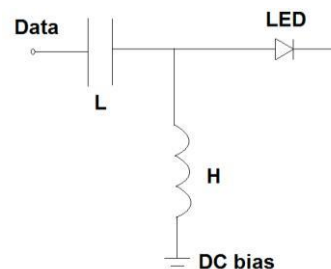


Рисунок 2.6 - Схема Bias-T

Схема заснована на зсуві світлодіода до нормального рівня інтенсивності освітлення шляхом використання постійної напруги і додавання до неї сигналу інформаційних даних від джерела сигналу. Рівень зсуву також знаходиться в середині лінійної області виведення світлодіодів.

Доданий індуктор і конденсатор в ланцюзі захищають джерело живлення і джерело даних від сигналів, що заважають. Конденсатор блокує постійний струм (DC), але пропускає сигнал даних змінного струму (AC). Індуктор блокує сигнал даних змінного струму і захищає джерело живлення, не впливаючи на напругу зсуву постійного струму. Опір X_f розрахованого конденсатора можна розрахувати як

$$X_f = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4)$$

де F - частота, а C - ємність. Коли частота $f = 0$, імпеданс $X_f = 0$ і це означає що ланцюг постійного струму розірвано. Постійний струм може протікати через конденсатор без будь-яких послаблень [44]. Конденсатор ланцюга Bias-T був виготовлений шляхом підключення мікросхеми постійного струму блоку BLK-89 до виходу пристрою USRP. Блок постійного струму має низькі втрати на введення 0,01 дБ в діапазоні частот 100 МГц. Максимальна вхідна напруга постійного струму становить 50 вольт, що було досить для цього застосування. [45]

Індуктор був підключений до виходу блоку живлення. Вибір відповідного індуктора досить простий. Максимальний постійний струм не повинен перевищувати допустимий рівень струму. Частота власного резонансу не повинна перебувати в використовуваній смузі частот.

Схема Bias-T в випробувальному стенді VLC визначає максимально допустимі рівні напруги та струму. Максимальна напруга пропонується 50 вольт, обмежених блоком постійного струму. Максимальний рівень струму пропонується 1,02 А, обмежений індуктором. Для дотримання обох меж максимальна вихідна потужність випробувального стенду становитиме близько 50 Вт. Межі напруги і струму можна регулювати, змінюючи значення конденсатора і індуктора.

2.2.3. Попереднє вирівнювання

Ширина смуги модуляції світлодіода передавача може бути збільшена за допомогою методу попередньої корекції [46]. Однією з причин попереднього вирівнювання є можливість підвищення лінійності світлодіодів при перетворенні інтенсивності світла в електричну. Для посилення лінеаризації можна використовувати аналоговий або цифровий метод предспотворень [47]. У цьому випробувальному стенді також може бути реалізована технологія для поліпшення ширини смуги модуляції і лінійності.

2.2.4. Схеми модуляції

Інформація в системі VLC може передаватися з використанням як сигналів основної смуги частот, так і схем модуляції смуги пропускання, що забезпечують нову платформу реалізації для технології бездротового зв'язку. Вибір схеми модуляції повинен бути зроблений з урахуванням, наприклад, потреби в швидкостях передачі даних, рівні сигналу і вартості обладнання зв'язку. Не існує ідеальної схеми модуляції, доступною для всіх систем VLC, але кожна з них має деякі особливі переваги.

У більш ранніх системах VLC в основному використовувалися модуляції основної смуги частот, такі як двохпозиційна модуляція (OOK), імпульсна модуляція положення (PPM), амплітудно-імпульсна модуляція (PAM), широкої смуги (PWM) в якості їх варіацій [48]. Швидкості передачі даних були на початку, як в стандартах JEITA, близько декількох кбіт / с або не більше декількох Мбіт / с, обмежені пропускнуою здатністю світлодіодного передавача і обмежені здатністю придушення багатопроменевих перешкод [49] [50]. Після декількох поліпшень методів пост і попередньої корекції і модуляції швидкості передачі даних були збільшені до більш ніж 100 Мбіт / с. Найвищі швидкості передачі даних VLC були досягнуті при використанні більш досконалих методів модуляції, таких як OFDM і DMT, з використанням деякого методу мультиплексування або з використанням методів з декількома входами і кількома виходами (MIMO) [53] [54] [55].

2.2.5. Передавальна оптика

Світловий промінь світлодіода передавача може бути модифікований з використанням оптичних лінз, дзеркал, розсіювачів, фільтрів і просторових модуляторів для забезпечення поліпшення умов освітлення, що приводять до поліпшення якості зв'язку та потужності сигналу лінії VLC. Внутрішня оптика світлодіодних компонентів зазвичай забезпечує широкий світловий промінь, який можна поліпшити, додавши зовнішню передню лінзу до світлодіоду, як це робиться

для світлодіодного компонента, який додається до ламп освітлення. Найбільш поширена передавальна оптика заснована на стисненні світлодіодного світла з широким променем до більш вузького променя для збільшення інтенсивності світла в зоні виявлення. Для цієї мети можна використовувати багато видів оптики. Лінза також може використовуватися протилежним чином для розширення світлового променя, забезпечуючи кращу зону охоплення і мобільність приймача.

Активне оптичне формування променя - ефективний спосіб поліпшити мобільного зв'язку VLC. Регулювання спрямованого світлового променя зв'язку до ідеального вирівнювання для приймача поліпшить потужність сигналу і ставлення сигнал/шум (SNR), що призведе до більш високої швидкості передачі даних і якістю зв'язку. Переваги цієї технології полягають в поліпшенні швидкості передачі даних і охоплення за рахунок використання мінімальної потужності світла і декількох джерел світла.

2.3. Приймач VLC

Всі частини приймача VLC, представлені на рис.2.7, повинні працювати лінійно для точного виявлення. Структура приймача VLC може бути розділена на шість частин від оптики до приймача даних.



Рисунок 2.7 - Основна частини приймача VLC.

2.3.1. Посилення сигналу

Виявлений сигнал зв'язку може бути посилений для правильної демодуляції. Посилення може бути зроблено в трьох різних місцях на випробувальному стенді. Перший спосіб - використовувати підсилювачі всередині детекторів. Другий спосіб - використовувати внутрішнє обладнання пристрою USRP.

Третє місце - це використання зовнішнього підсилювача, підключеного між детектором та USRP.

Найбільш поширеним типом посилення сигналу є трансїмпедансним посилення. Трансїмпедансний підсилювач може бути реалізований з операційним підсилювачем з резистором зворотного зв'язку. Посилення може бути змінено шляхом перемикання зворотнього зв'язку в ланцюзі [54].

Використання програмного забезпечення для регулювання посилення в пристрої USRP є найбільш практичним способом реалізації посилення приймача в випробувальному стенді. У програмному забезпеченні GNU Radio і Python є параметри для налаштування значень посилення, які налаштовують вбудовані програмовані підсилювачі в пристроях USRP. Діапазон регулювання складає близько 0-31,5 дБ в пристроях USRP, також можна використовувати автоматичне регулювання посилення (AGC) [56]. AGC дозволяє програмному забезпеченню регулювати налаштування посилення під час зв'язку, що підвищує мобільність в випробувальному стенді.

Для кращого посилення в випадках мобільності можна використовувати адаптивний зовнішній підсилювач. Адаптивний підсилювач змінює посилення при зміні вхідного сигналу. Він також може бути використаний для фільтрації складової постійного струму сигналу. Одна проста ідея - додати адаптивний детектор мінімальної напруги для відстеження мінімального рівня напруги сигналу і диференційний підсилювач для зняття напруги [57].

2.3.2. Фільтрація електричних сигналів і пост-еквалізація

Ідея полягає в тому, щоб відхилити заважаючі сигнали і передати тільки сигнал даних. На випробувальному стенді можуть використовуватися внутрішні фільтри USRP або деякі зовнішні фільтри. Внутрішні фільтри легко налаштовуються за допомогою програмного забезпечення, але при цьому використовуються ресурси комп'ютера і USRP. Зовнішні фільтри не вимагають ресурсів комп'ютера, але налаштування значень частот означає зміну компонентів.

Найбільш ефективний спосіб поліпшити сигнал, що приймається - відфільтрувати від нього постійну складову. Це можна зробити, додавши в систему фільтр верхніх частот або блокуючий конденсатор. Ефект блокування конденсатора був пояснений в розділі апаратного забезпечення драйвера світлодіода. Фільтр верхніх частот блокує сигнал при частоті зрізу і пропускає все більш високі частоти. Ці прості методи не можуть бути використані з деякими модуляціями, які мають значні компоненти постійного струму, такі як ООК [73].

Заважаючи низькочастотні сигнали від штучного освітлення також можуть бути відфільтровані за допомогою фільтра верхніх частот. Щоб впровадити цей тип фільтра в випробувальний стенд VLC, частоту зрізу фільтра можна було б встановити приблизно до 1 МГц. При використанні дочірньої плати Basic-RX в приймачу частоти нижче 1 МГц також будуть ослаблені [58].

Пост-еквалізація може використовуватися, щоб допомогти синхронізації і демодуляції, посилюючи виявлений сигнал. У [59] автори досягли швидкості передачі даних 10 Мбіт / с при використанні звичайного білого світлодіода з пропускну здатністю 1 МГц, покритого люмінофором, з модуляцією ООК і відстанню 0,1 метра після реалізації базового RC-вирівнювання зі схемою попереднього спотворення. Швидкість передачі даних понад 100 Мбіт / с також була досягнута завдяки використанню деяких схем пост-еквалізації для посилення демодуляції ООК [60].

2.4. Обробка сигналів

Обробка сигналів завжди необхідна при відправці або отриманні будь-яких цифрових інформаційних сигналів даних. У випробувальному стенді сигнал обробляється з використанням пристрою USRP, підключеного до персонального комп'ютера як на стороні передавача, так і на стороні приймача.

2.4.1. Програмне забезпечення для обробки сигналів

Підключення з декількох програмних платформ, представлених на рис.2.8, до пристроїв USRP забезпечується за допомогою апаратних драйверів UHD і NI-USRP. Драйвери встановлюються на платформи Linux, Mac OSX і Windows, які забезпечують універсальне підключення пристроїв. Драйвер UHD можна використовувати з програмним забезпеченням кодеків GNU Radio, MATLAB, Simulink і Python і NI-USRP з програмним забезпеченням LabVIEW. Обидва драйвера сумісні і встановлюються в пристроях USRP.

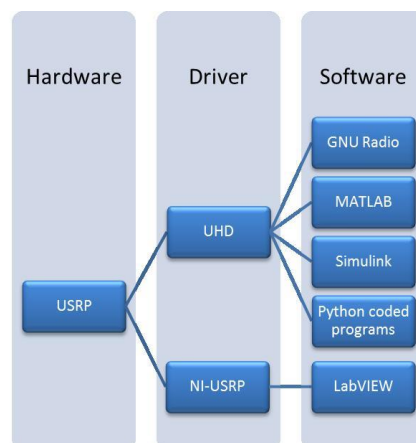


Рисунок 2.8 - Підключення програмного забезпечення до пристроїв USRP.

В процесі впровадження GNU Radio та програмне забезпечення на основі коду Python в основному використовувались для тестування та вимірювання функціональності тестового стенду. Програмне забезпечення з відкритим кодом GNU Radio було легко застосувати в тестовому стенді.

GNU Radio має адаптивний графічний інтерфейс для створення програмного забезпечення для використання з пристроями USRP. Графічний інтерфейс дає користувачеві можливість використовувати зумовлені комунікаційні блоки, і, поєднуючи їх разом, ви отримуєте повну зв'язок.

2.5. Розробка структурної схеми дослідження

Для передачі сигналів в оптичному тракті необхідно підключити персональний комп'ютер TX через USB під'єднати SDR трансивер, вихід якого через коаксіальний кабель під'єднаний до інжектору постійного струму (Bais-T) на

який подається напруга 0,2V та до виходу якого під'єднана LED лампа з драйверами.

Для приймання оптичних сигналів необхідно підключити фотодетектор через коаксіальний кабель до SDR трансивер, який через USB розем підключається до комп'ютера RX.

Блок схема передавача та приймача VLC представлені на рис.2.9.

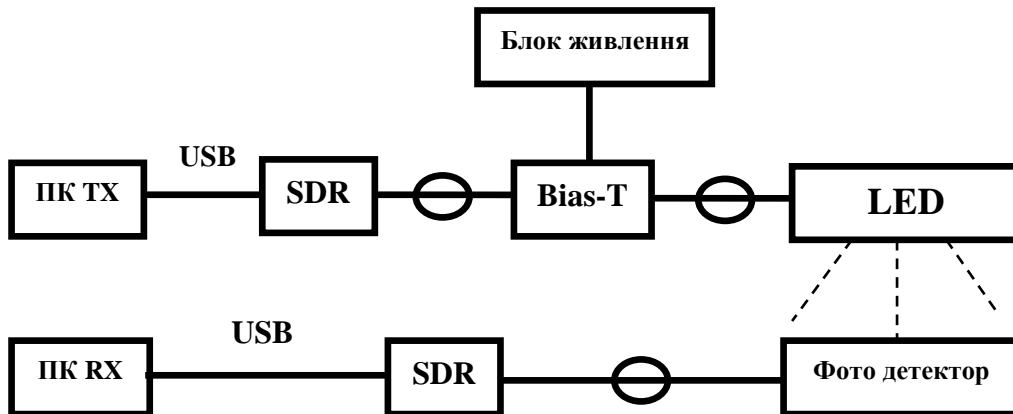


Рисунок 2.9 – Блок схема дослідження передачі сигналів в оптичному тракті

2.6. Опис роботи системи

Сигнальний ланцюжок VLC зображена на рис.2.10

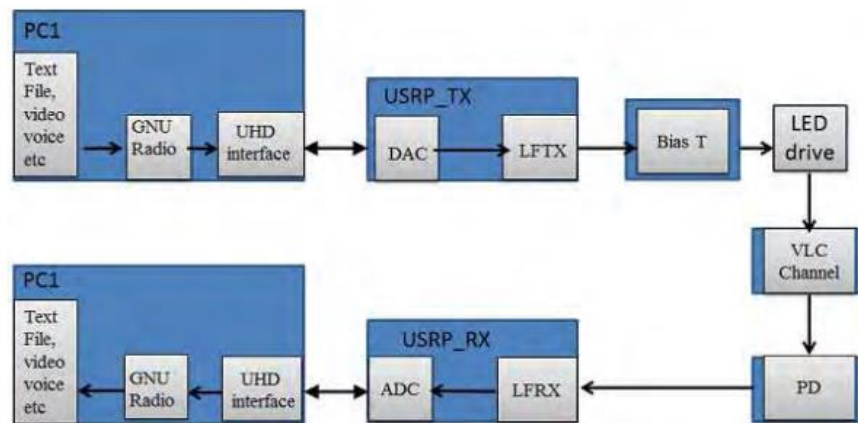


Рисунок 2.10 – Сигнальний ланцюжок VLC

Текстовий файл, відео і голос передаються в програмне забезпечення GNU Radio, яке використовується для обробки протоколи обробки рівня MAC. Наприклад, текстові дані пакетуються, а потім дискредитуються в цифровому вигляді з використанням блоків обробки сигналів GNURadio. Різні параметри такі як частота дискретизації, швидкість передачі даних, схема модуляції і т.д., можна налаштувати, змінивши блоки обробки сигналів усередині GNURadio. Потім цифрові зразки пересилаються в USRP з використанням інтерфейсу апаратного драйвера USRP (UHD) через USB-порт. Потім сигнал передається на дочірню плату LFTX для модуляції смуги пропускання. Вихідний сигнал драйвера передається по оптичному каналу. Потім інтенсивність прийнятого світла виявляється приймачем і перетворюється в електричний струм на основі прямого виявлення з використанням комерційного фотодетектора. Дочірня плата LFRX в приймачі використовується для демодуляції прийнятого сигналу несучої, в той час як USRP приймач виконує перетворення з аналогового в цифровий. Цифрова вибірка з USRP пересилається на приймаючий ПК через USB-порт з використанням інтерфейсу (UHD). На приймаючій стороні програмне забезпечення GNURadio використовується для обробки отриманих сигналів через блоки обробки сигналів. Потім вихідні дані відправляються в текстовий файл, медіаплеєр та інші елементи.

Висновки до розділу 2

В даному розділі було розроблено апаратно програмну реалізацію стенда для дослідження передачі сигналів у видимому світлі. Отримано інформацію про апаратну частину стенду в якості якої виступає трансивер USRP, та програмну частину яка керує трансивером, програмне забезпечення GNU Radio. Описано принцип роботи стенду та його основні елементи,

В третьому розділі на основі програмного комплексу GNU Radio буде проведено експериментальне дослідження передачі сигналів у видимому світлі.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ СТЕНДУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИДИМОГО СВІТЛА В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕНІ GNU RADIO

3.1 Дослідження передачі з модуляцією PSK

На рисунку 3.1 зображена блок схема для дослідження модуляції PSK

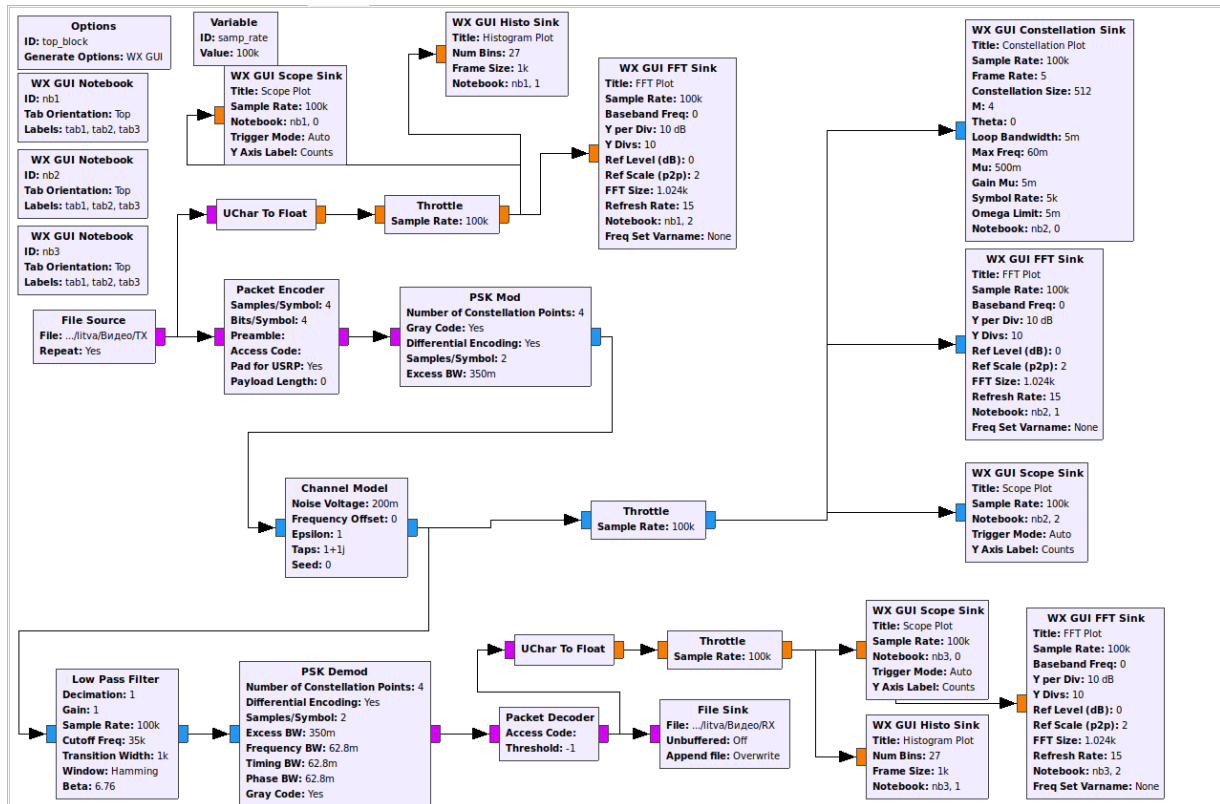


Рисунок 3.1 – блок схема дослідження модуляції PSK

Як можна бачити з малюнка 3.1, ми читаємо данні з файлу TX.txt (вміст файлу TX.txt зображений на рис.3.2) який записаний на жорсткому диску комп'ютера (блок File Source), потім з частотою вибірки 100кГц сигнал потрапляє на вхід пакетного енкодера (Packet Encoder) пакетів, котрий перетворює потік в 4х-бітний код. Цей потік поступає на фазового маніпулятора (PSK mode), потім сигнал потрапляє на вхід дросель трансформатор який використовується для того, щоб середня швидкість не перевищувала конкретну швидкість (Throttle), після чого сигнал з частотою вибірки 100кГц потрапляє до блоку Add де до сигналу додається шум (Noise Source), з виходу блоку Add сигнал потрапляє на фільтр нижніх частот (Low Pass Filter) де виділяється частота 20кГц, після чого сигнал

потрапляє на декодр фазової маніпуляції (PSK Demod) і після на декодр пакетів (Packet Decoder) і останній блок на який потрапляє сигнал – це блок File Sink який використовується для запису прийнятого повідомлення у файл на жорсткий диск комп'ютера.

Також на цій схемі присутні блоки графічного відображення сигналу, блоки сімейства WX GUI. Та допоміжні блоки Variable.

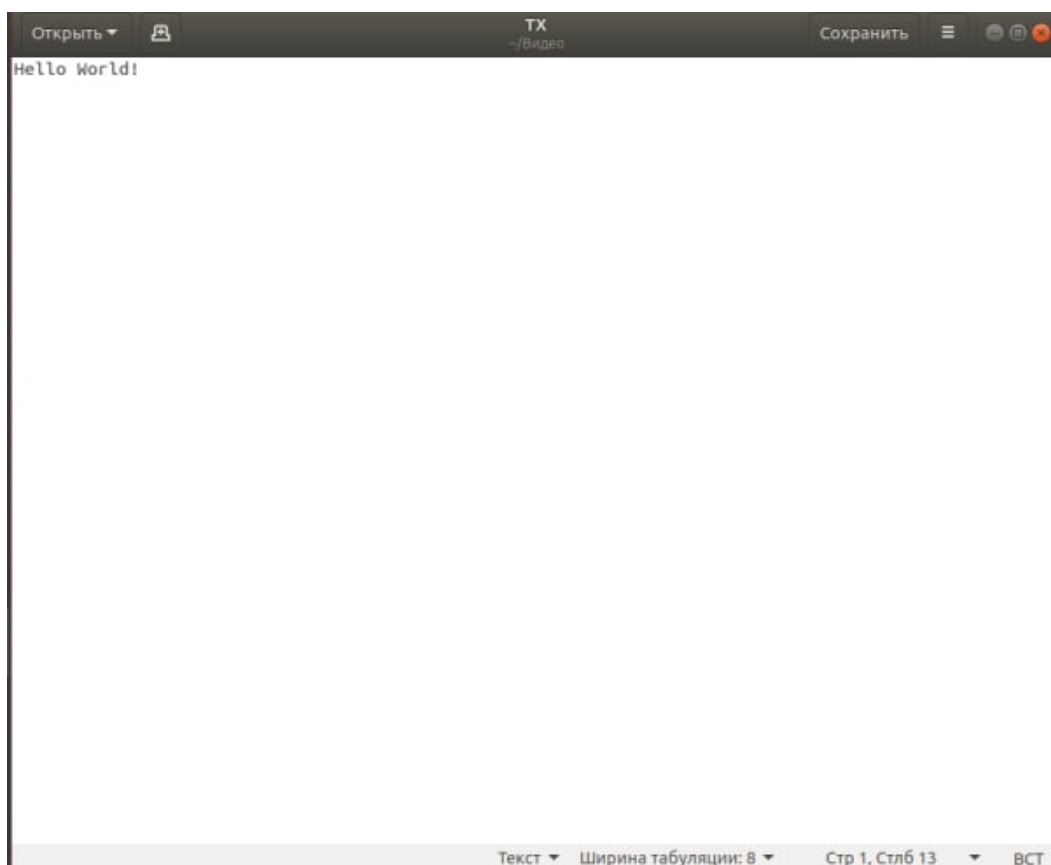


Рисунок 3.2 – Вміст файлу TX.txt

Далі розглянемо окремо передавач, канал і приймач з яких складається схема, та окремо кожен блок в цій схемі.

3.1.1 Передавач

Відповідно до рисунку 3.1 блок схема передавача зображена на рис.3.3

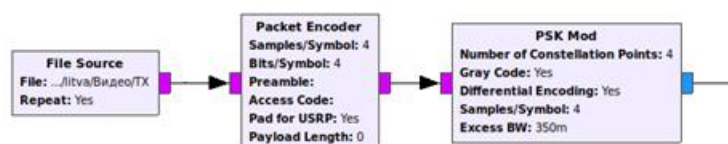


Рисунок 3.3 – Блок схема передавача

Блок схема передавача складається з наступних блоків:

1. Блоку вхідних даних (File Source) (рис 3.4) в якому можна змінити ID блоку, вказати шлях до файлу (File), тип виходу (Output Type), повторення (repeat) довжину vec (vec Length).

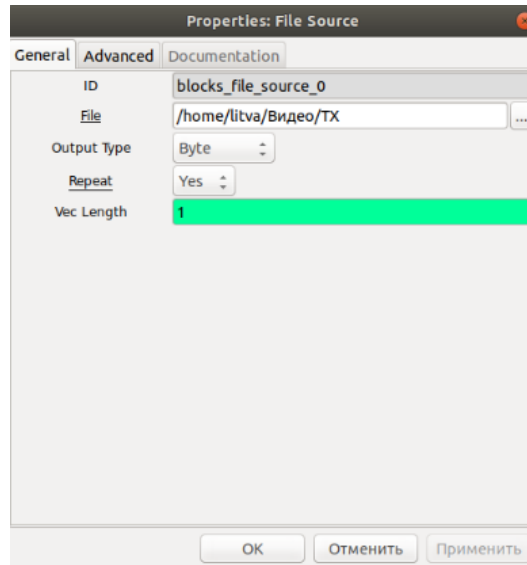


Рисунок 3.4 – Блок вхідних даних File source

2. Пакедного кодеру (Packet encoder) (рис 3.5) в якому вказується ID блоку, тип введення (Input Type), зразки на символ (Samples/Symbol), біт на символ (Bit/Symbol), преамбула (preamble), код підтвердження (Access Code), накладка для USRP (Pad for USRP), довжина корисного навантаження (payload length).

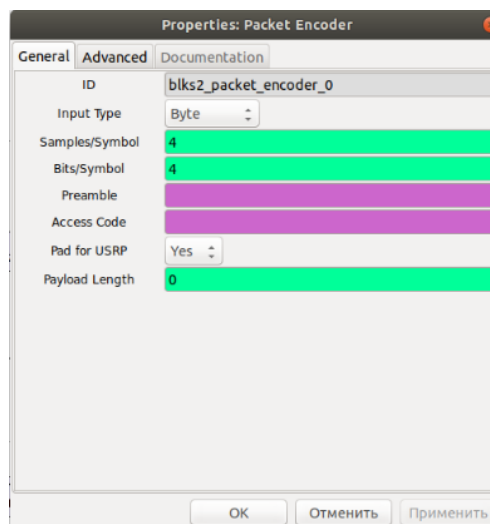


Рисунок 3.5 – пакедного енкодеру Packet encoder

3. PSK модулятора (PSK Mode) (рис 3.6) в якому можна змінити ID блоку, номер сузір'я (Number of Constellation), додати код Грея (Gray Code) та диференціальне кодування (Differential Encoding) , вказати зразки на символ(Samples/Symbol).

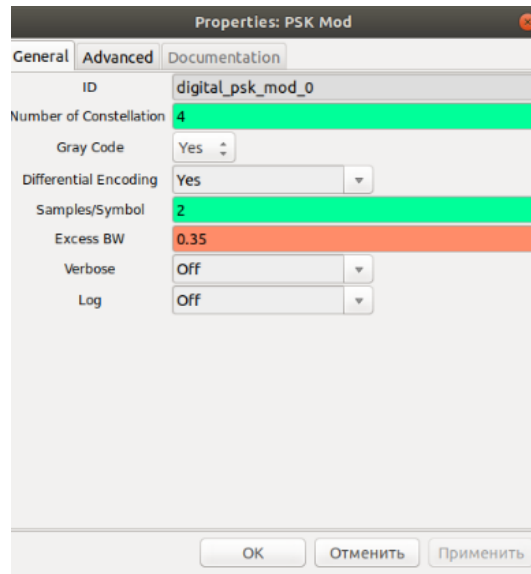


Рисунок 3.6 – блок PSK модулятора.

3.1.2 Канал зв'язку

Ми можемо протестувати даний передавач, навіть не маючи ніякої апаратури - для цього є спеціальний блок Channel Model (рис.3.7) - модель каналу зв'язку. Там можна задати шум, зсув частоти та ін (рис.3.8).

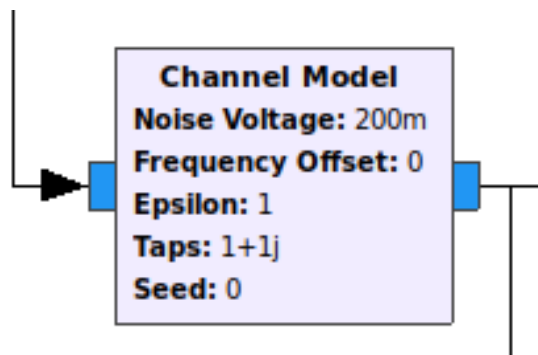


Рисунок 3.7 – Каналу зв'язку

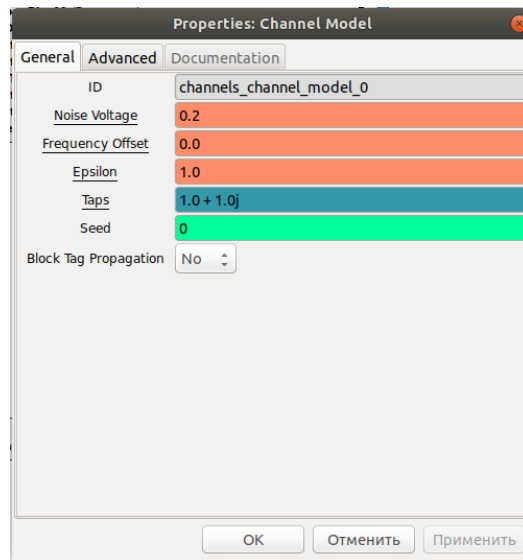


Рисунок 3.8 – Блок каналу зв'язку

3.1.3 Приймач

Відповідно до рисунку 3.1 блок схема приймача зображено на рис.3.9.

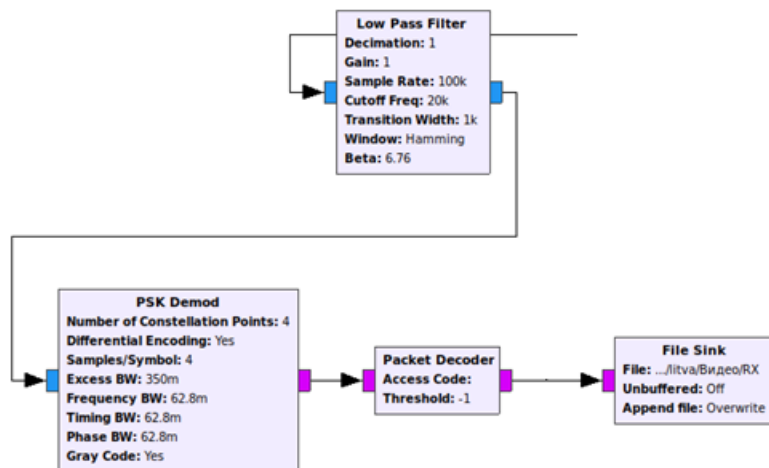


Рисунок 3.9 – Блок схема приймача

Блок схема приймача складається з наступних блоків:

1. фільтр нижніх частот (Low Pass Filter)(Рис.3.10) в якому можна задати ID блоку, Децимацію (Decimation), Посилення (Gain), Частоту вибірки (Sample Rate), Частота відсікання (Cutoff Freq), ширину переходу (Transition Width), вікно (Window)

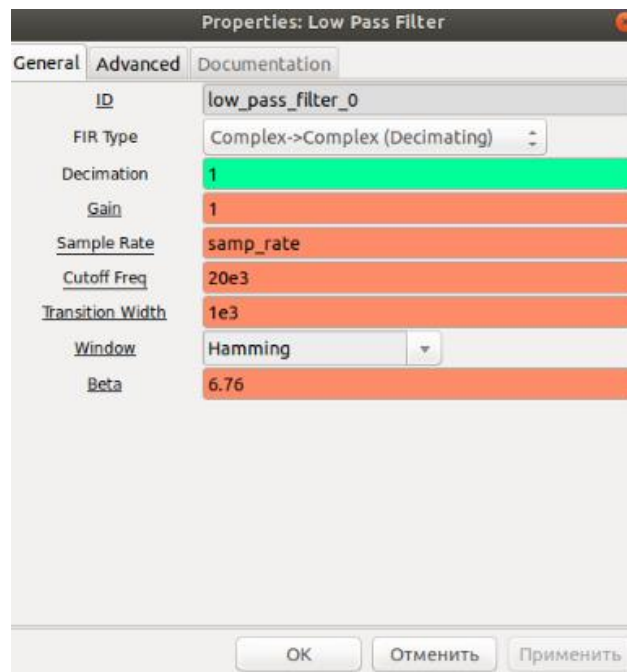


Рисунок 3.10 – Блок фільтра нижніх частот

2. Демодулятор PSK (PSR Demod) (рис.3.11) в якому задається ID блоку, номер сузір'я (Number of Constellation), можливо додати диференціальне кодування (Differential Encoding), вказати зразки на символ (Samples/Symbol).

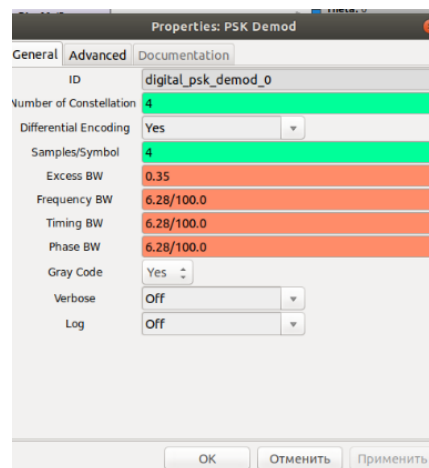


Рисунок 3.11 – Блок демодуляції PSK.

3. Пакетний декодр (Packet Decoder) (Рис.3.12) в якому задається ID блоку тип вихідних даних (Output Type), код підтвердження (Access Code).

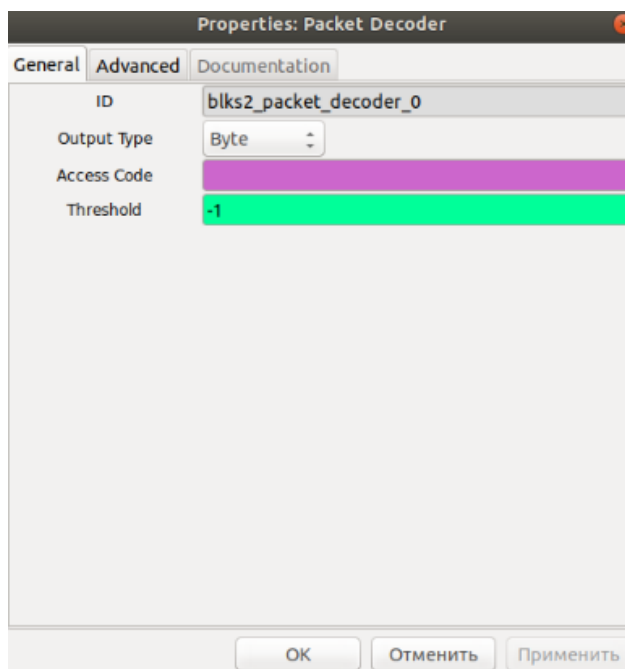


Рисунок 3.12 – блок пакетного декодера

4. Блок вихідних даних (File Sink) (рис.3.13) в цьому блоці вказується місце на персональному комп'ютері буде записаний прийнятий файл, а також вказується ID блоку та тип даних.

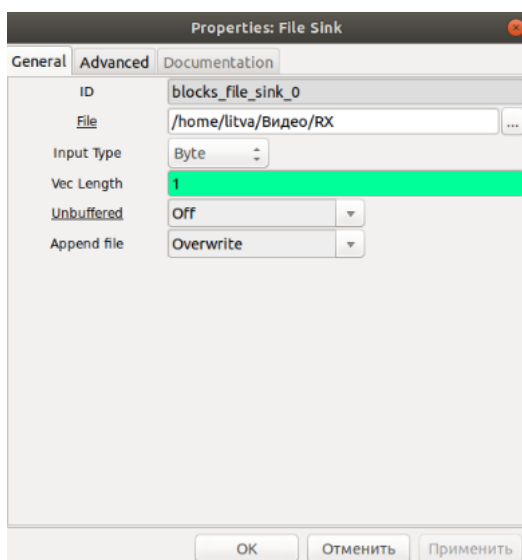


Рисунок 3.13 – Блок запису вихідних даних.

3.1.4 Тестування Блок схеми

Запустивши блок схему отримали наступні результати:

Сигнал текстового повідомлення на виході блоку file source

Графік спектру сигналу(рис.3.14). Відображення форми сигналу у часовій області(рис 3.15)

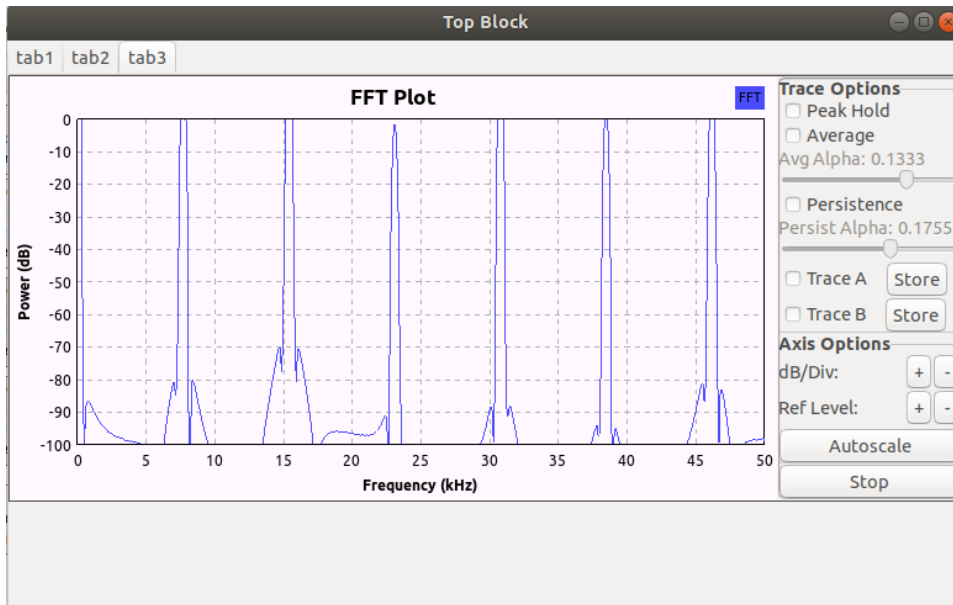


Рисунок 3.14 – Спектр сигналу що передається

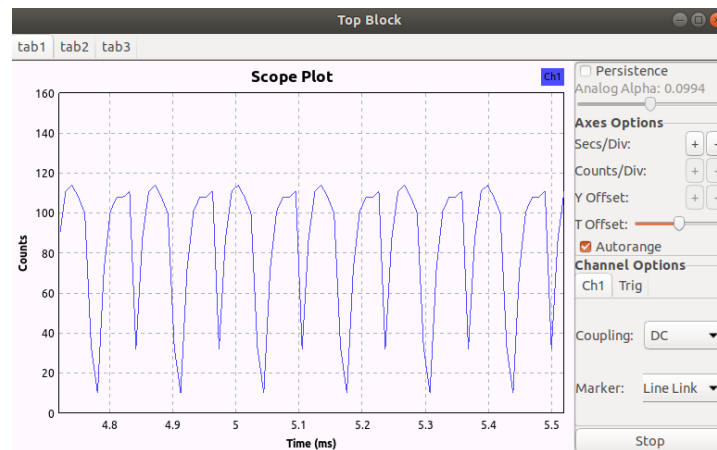


Рисунок 3.15 – відображення сигналу що передається

Після проходження модулятора PSK спектр сигналу (рис.3.16), відображення сигналу у часовій області(рис.3.17) та сигнальне сузір'я(рис 3.18) виглядають наступним чином:

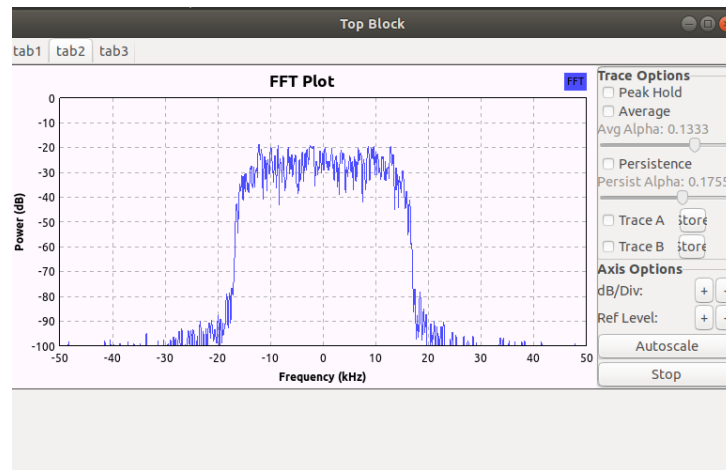


Рисунок 3.16 – Спектр сигналу після модулятора

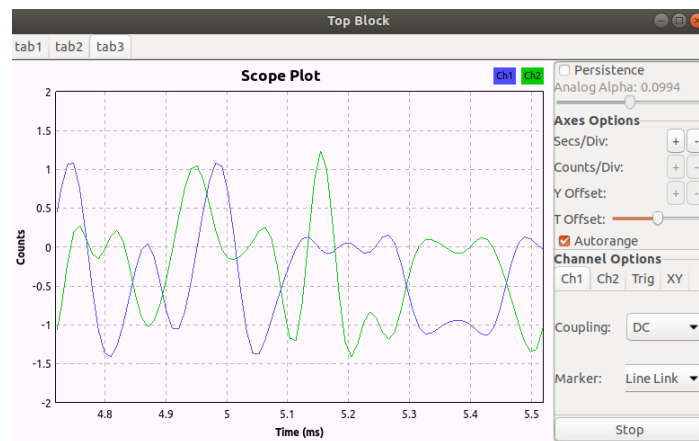


Рисунок 3.17 – Відображення форми сигналу у часовій області

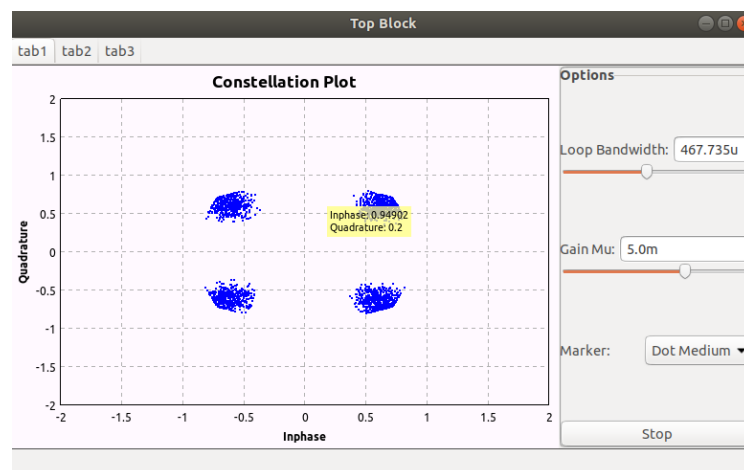


Рисунок 3.18 – сигнальне сузір'я

На приймальній частині прийняли наступний сигнал, відображення спектра сигналу (рис.3.19), відображення сигналу у часовій області (рис 3.20).

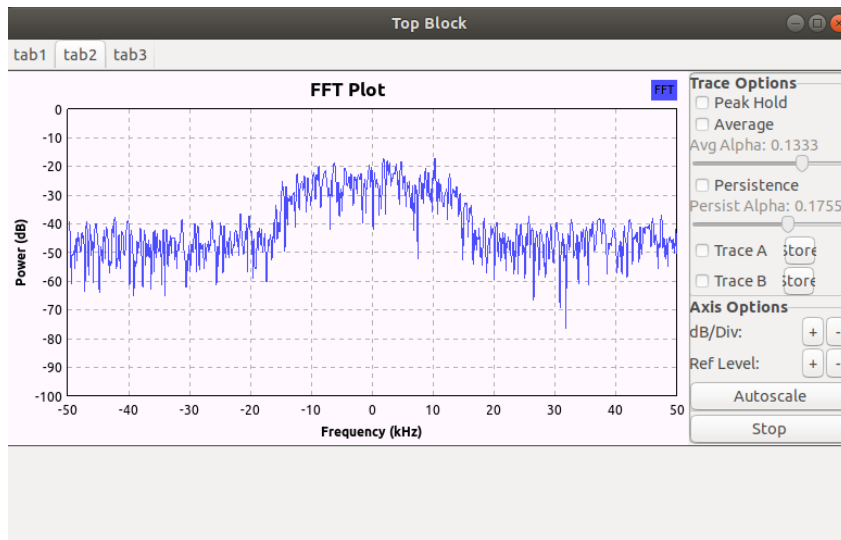


Рисунок 3.19 – спектр сигналу на вході фільтра нижніх частот



Рисунок 3.20 – форма сигналу у часовій області на вході фільтра нижніх частот

На рис 3.21 та 3.22 зображений спектр сигналу та відображення сигналу у часовій області на виході фільтра нижніх частот.

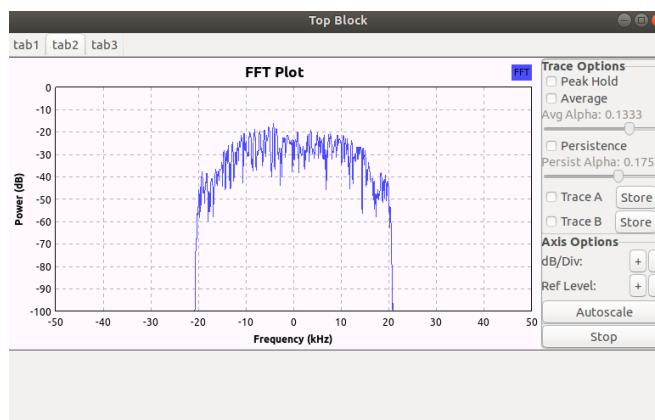


Рисунок 3.20 - Спектр сигналу після фільтрації



Рисунок 3.21 – форма сигналу у часовій області після фільтрації

Після демодуляції та декодування отримали наступне спектр сигналу (рис.3.22), форму сигналу (рис.3.23).

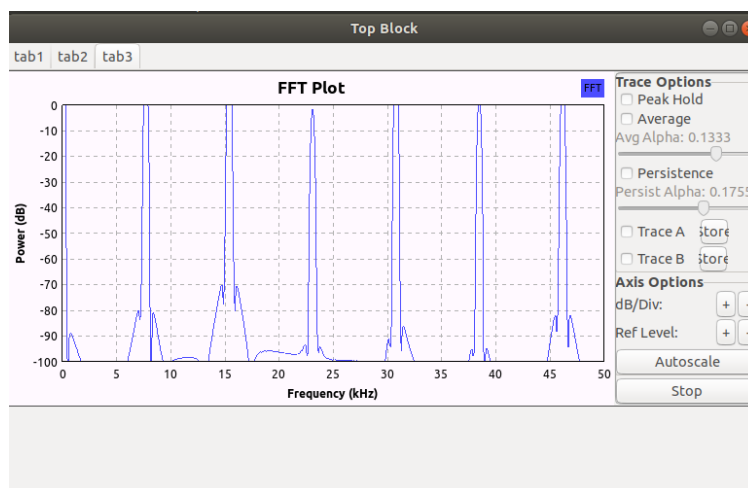


Рисунок 3.22 - Спектр сигналу

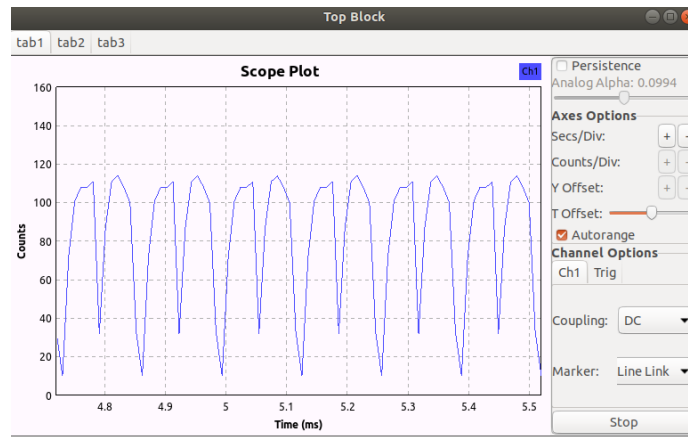


Рисунок 3.23 – форма сигналу

Переходячи в директорію в яку було записано txt файл з отриманим повідомленням бачимо що повідомлення було передано успішно (рис 3.24)

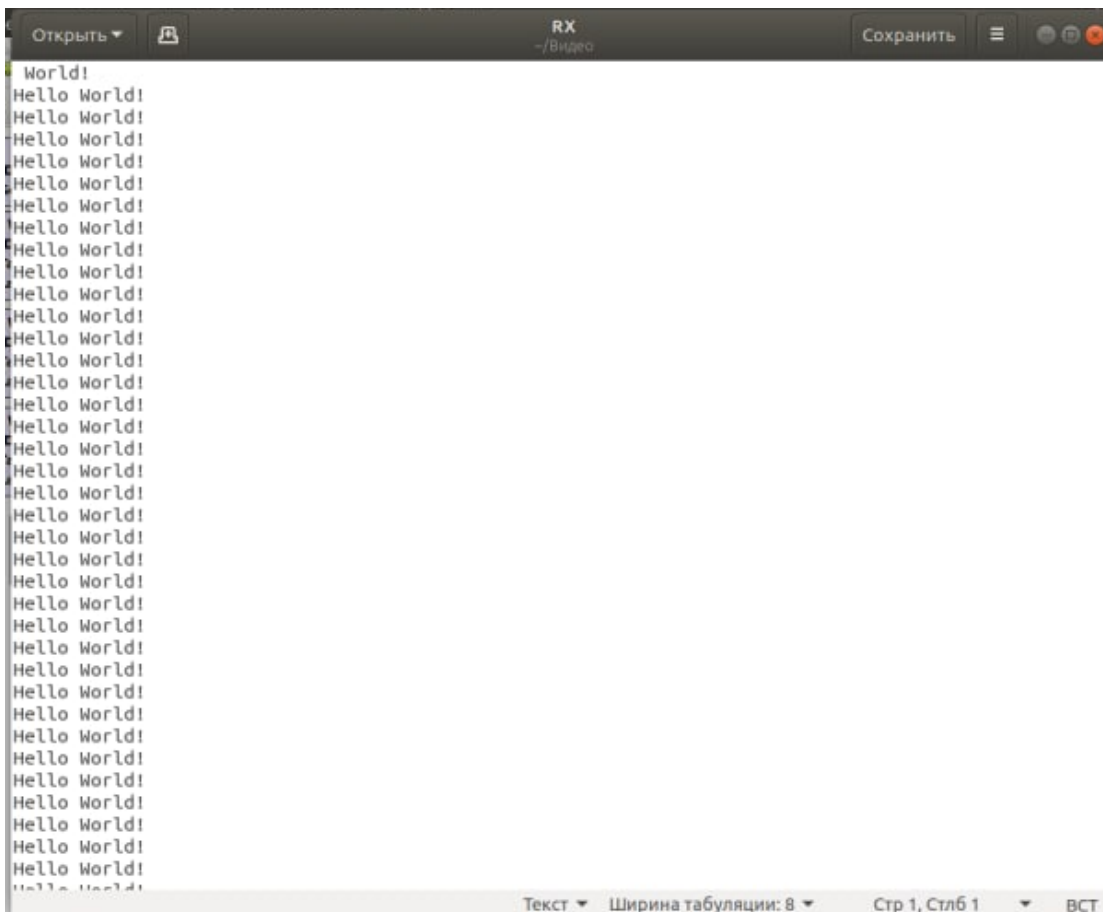
A screenshot of a terminal window titled "RX" with a subtitle "-/Видео". The terminal displays a list of received messages: "World!" followed by 20 instances of "Hello World!". The window has a menu bar with "Открыть" and "Сохранить" options, and a status bar at the bottom showing "Текст", "Ширина табуляции: 8", "Стр 1, Стлб 1", and "ВСТ".

Рисунок 3.24 – Отримане повідомлення

3.2. Дослідження передачі з модуляцією 8PSK

Для дослідження 8PSK модуляції блок схема залишається незмінною (рис 3.1), але необхідно внести зміни до блоку модуляції PSK (PSK mode) на передатчику, та до блоку демодуляції PSK (PSK demode) (рис.3.25).

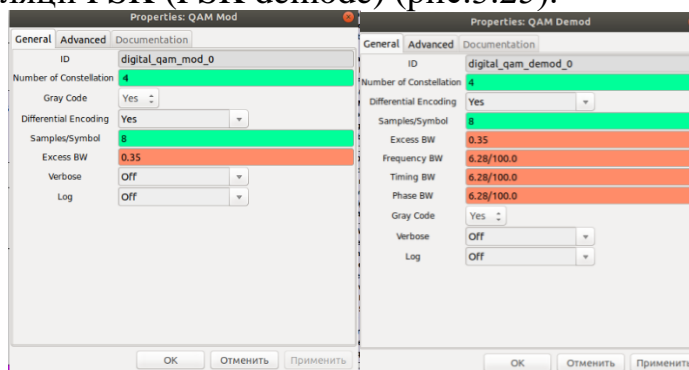


Рисунок 3.25 – Блоки які необхідно змінити

Після модулятора отримали сигнальне сузір'я яке зображене на рис 3.26

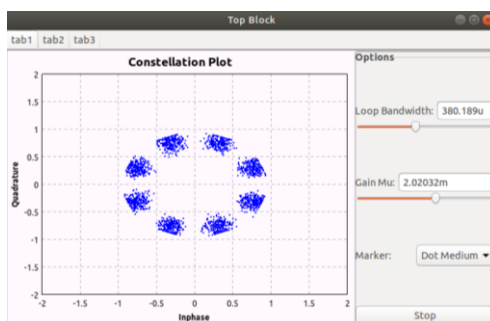


Рисунок 3.26 – Сигнальне сузір'я 8PSK

3.3 Дослідження передачі з модуляцією QAM

Модулятор PSK в GNU Radio, що зображений на рис. 3.27 передає текст “Hello World” який записаний в блокноті і збережений на жорсткому диску комп’ютера.

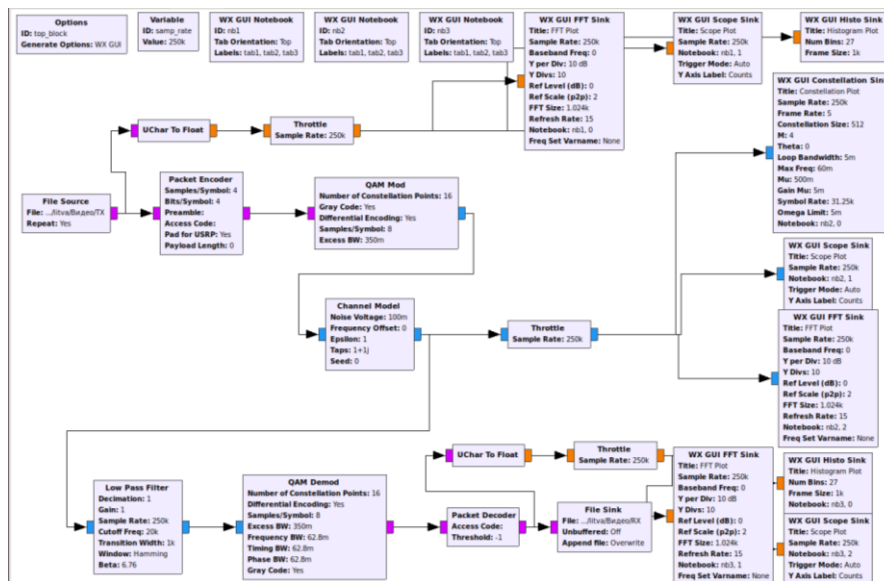


Рисунок 3.27 – Блок схема для програмування приймача та передавача в GNU Radio

Як можна бачити з малюнка 3.27, ми читаємо данні з файлу TX.txt (рис.3.2) який записаний на жорсткому диску комп’ютера (блок File Source), потім з частотою вибірки 100кГц сигнал потрапляє на вхід пакетного енкодера (Packet Encoder) пакетів, котрий перетворює потік в 4х-бітний код. Цей потік поступає на Квадратурно-амплітудний модулятор (QAM mode), потім сигнал потрапляє на вхід дросель трансформатор який використовується для того, щоб середня швидкість не перевищувала конкретну швидкість (Throttle), після чого сигнал з частотою вибірки 250кГц потрапляє до блоку Add де до сигналу додається шум (Noise Source), з виходу блоку Add сигнал потрапляє на фільтр нижніх частот (Low Pass Filter) де виділяється частота 20кГц, після чого сигнал потрапляє на Квадратурно-амплітудний демодулятор (PSK Demod) і після на декодр пакетів (Packet Decoder) і останній блок на який потрапляє сигнал – це блок File Sink який

використовується для запису прийнятого повідомлення у файл на жорсткий диск комп'ютера.

Також на цій схемі присутні блоки графічного відображення сигналу, блоки сімейства WX GUI. Та допоміжні блоки Variable.

Далі розглянемо окремо передавач, канал і приймач з яких складається схема, та окремо кожен блок в цій схемі.

3.3.1 Передавач

Відповідно до рисунку 3.28 блок схема передавача зображена на рисунку

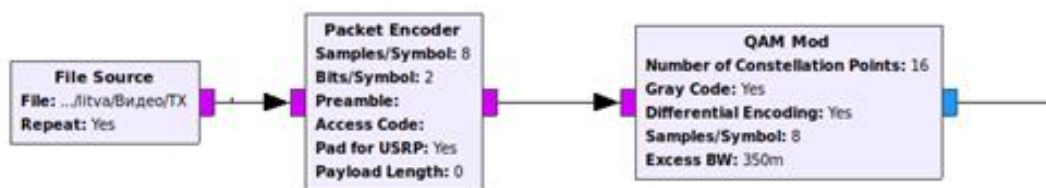


Рисунок 3.28 – блок схема передавача

Блок схема передавач складається з наступних блоків.

1. Блок вхідних даних (File source) (опис див. в п. 3.1.1).
2. Пакетний енкодер (Packet Encoder) (опис див. в п. 3.1.1).
3. Квадратурно-амплітудний модулятор (Qam Mod)(рис.3.29) в ньому ми можемо задати ID блоку, номер сузір'я, додати код Грея, вказати зразки на символ(Samples/Symbol).

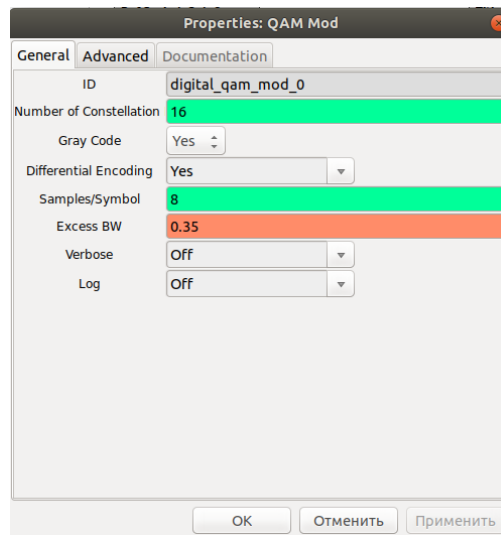


Рисунок 3.29 – блок модуляції QAM

3.3.2 Канал передачі

Канал передачі був описаний в розділі 3.1.2

3.3.3 Приймач

Блок схема приймача зображена на рис.3.31



Рисунок 3.30 – блок схема приймача

Блок схема приймача складається з наступних блоків:

1. Фільтр нижніх частот (Low Pass Filter)(описаний в пункті 3.1.3)
2. Квадратурно-амплітудний демодулятор (QAM Demod)(рис.3.31) в якому вказується ID блоку, номер сузір'я (Number of Constellation), можливо додати диференціальне кодування (Differential Encodng), вказати зразки на символ(Semples/Symbol).

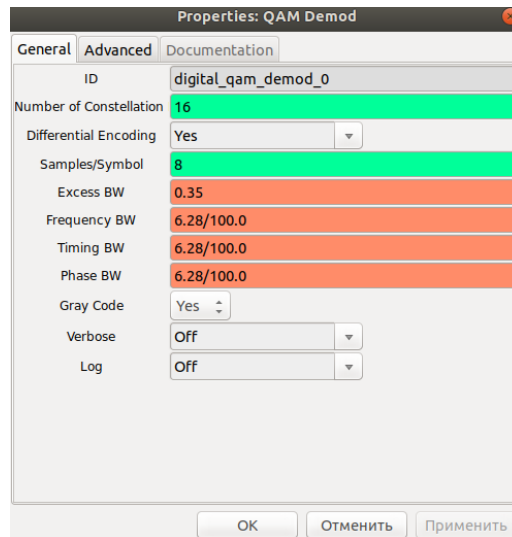


Рисунок 3.31 – блок демодуляції QAM

3. Пакетний декодер (Packet Decoder) (описаний в пункті 3.1.3)
4. Блок вихідних даних (File sink)(описаний в пункті 3.1.3)

3.3.4 Тестування блок схеми

Запустивши блок схему отримали наступні результати:

Сигнал текстового повідомлення на виході блоку file source

Графік спектру сигналу(рис.3.32). Відображення форми сигналу у часовій області(рис 3.33).

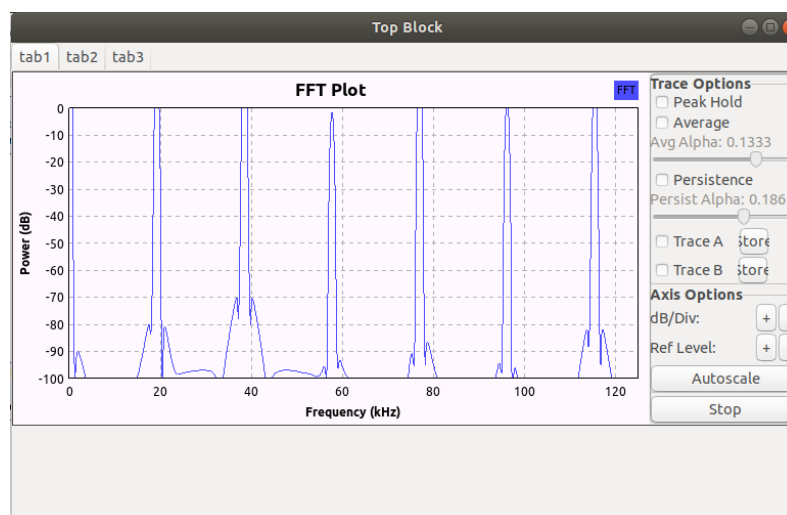


Рисунок 3.32 – спектр сигналу що передається



Рисунок 3.33 – відображення сигналу що передається у часовій області

Після проходження модулятора QAM отримали: спектру сигналу(рис.3.34), сигнальне сузір'я(рис.3.35) та відображення форми сигналу у часовій області (рис.3.36)

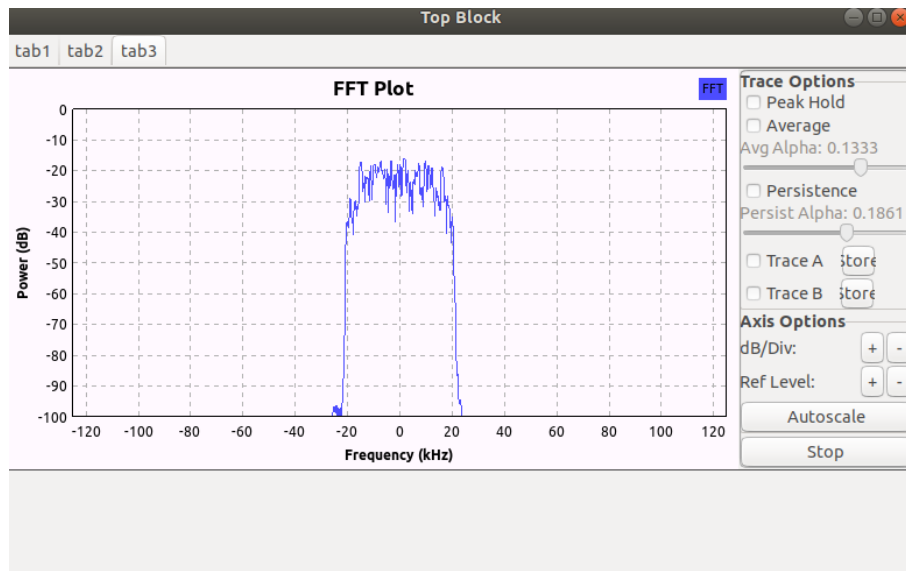


Рисунок 3.34 – спектр сигналу

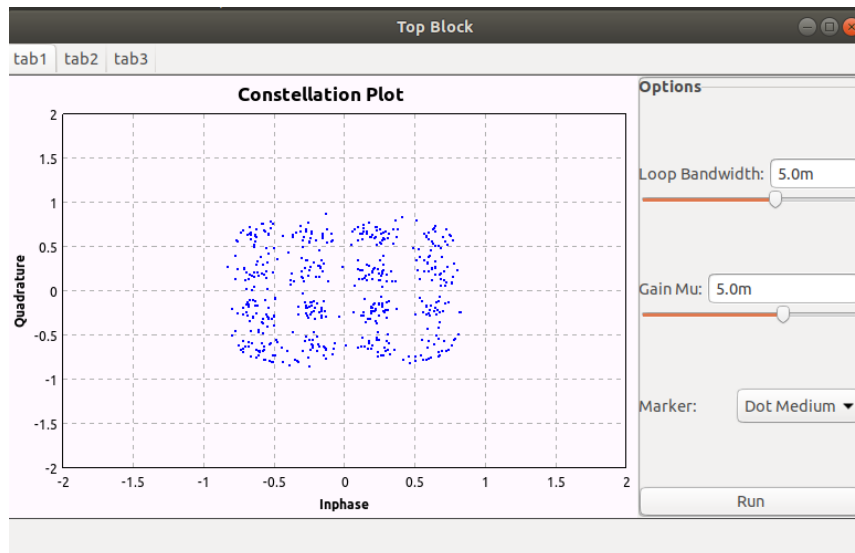


Рисунок 3.35 – сигнальне сузір'я

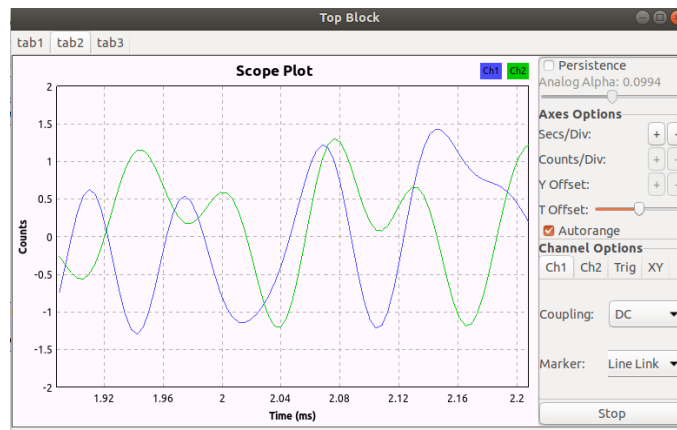


Рисунок 3.36 – відображення форми сигналу у часовій області

Після каналу спактр сигналу (рис.3.37), та відображення сигналу у часовій області (рис.3.38) виглядають наступним чином:

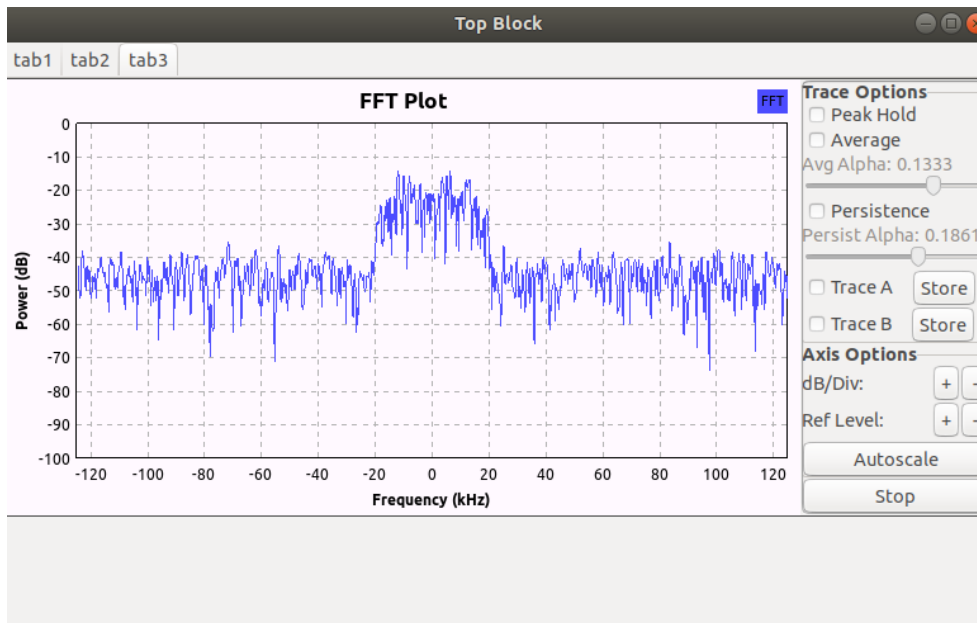


Рисунок 3.37 – спектр сигналу після проходження каналу.

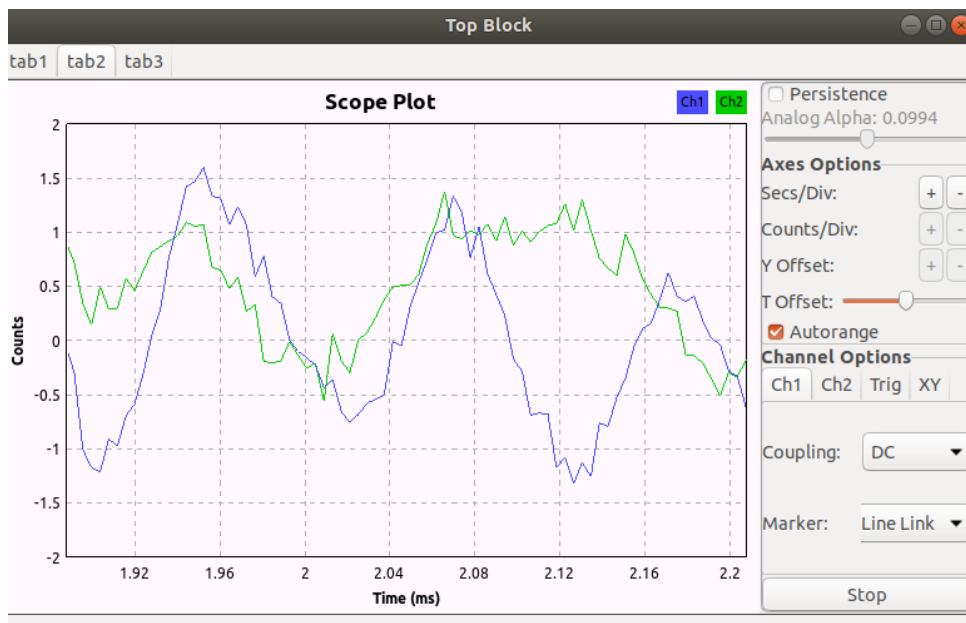


Рисунок 3.8 – відображення сигналу у часовій області після проходження каналу.

Після фільтрації сигнал змінився наступним чином (рис.3.39-3.40)

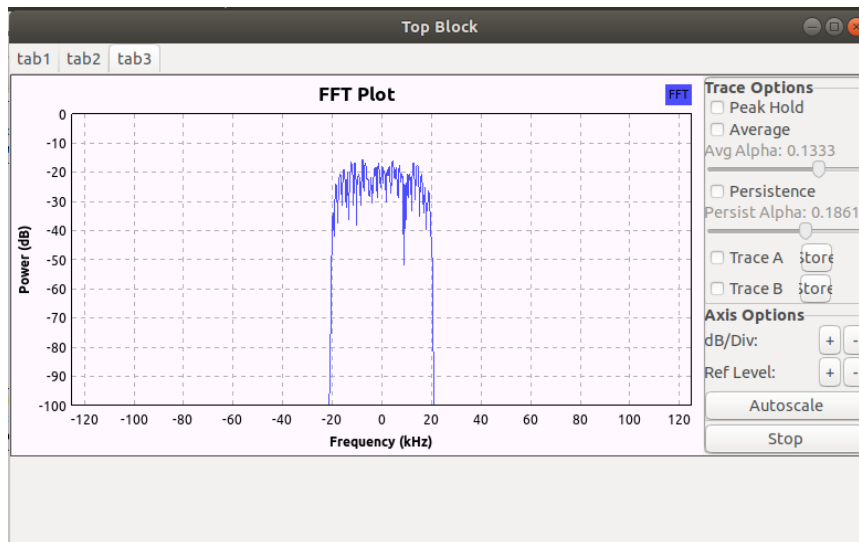


Рисунок 3.39 – спектр сигналу після фільтрації

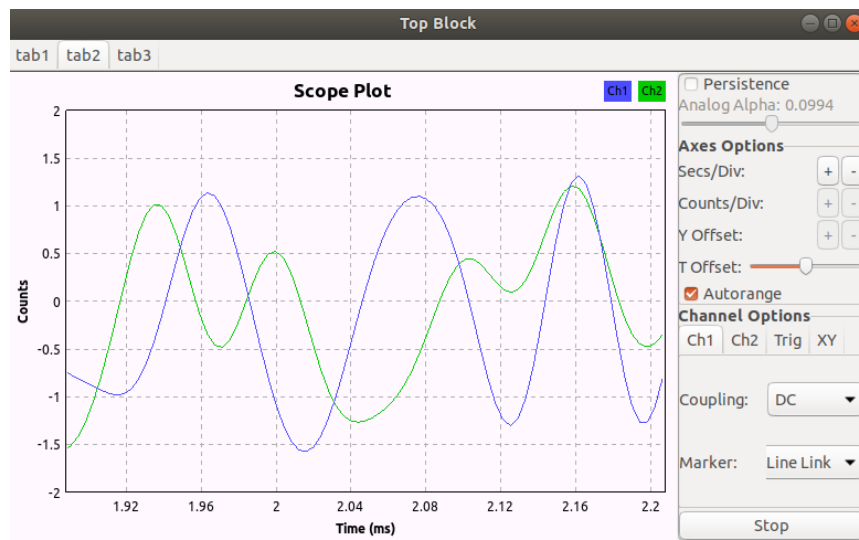


Рисунок 3.40 – відображення сигналу в часовій області

Після демодуляції та декодування отримали наступний спектр сигналу (рис.3.41), та відображення сигналу у часовій області, (рис.3.42).

3.4 Дослідження передачі з гаусівською двохпозиційна частотна маніпуляція з мінімальним зсувом (GMSK)

За допомогою модуляції GMSK спробуємо передати транспортний відео потік формату H.264

Блок схема дослідження модуляції GMSK зображена на рис.3.44

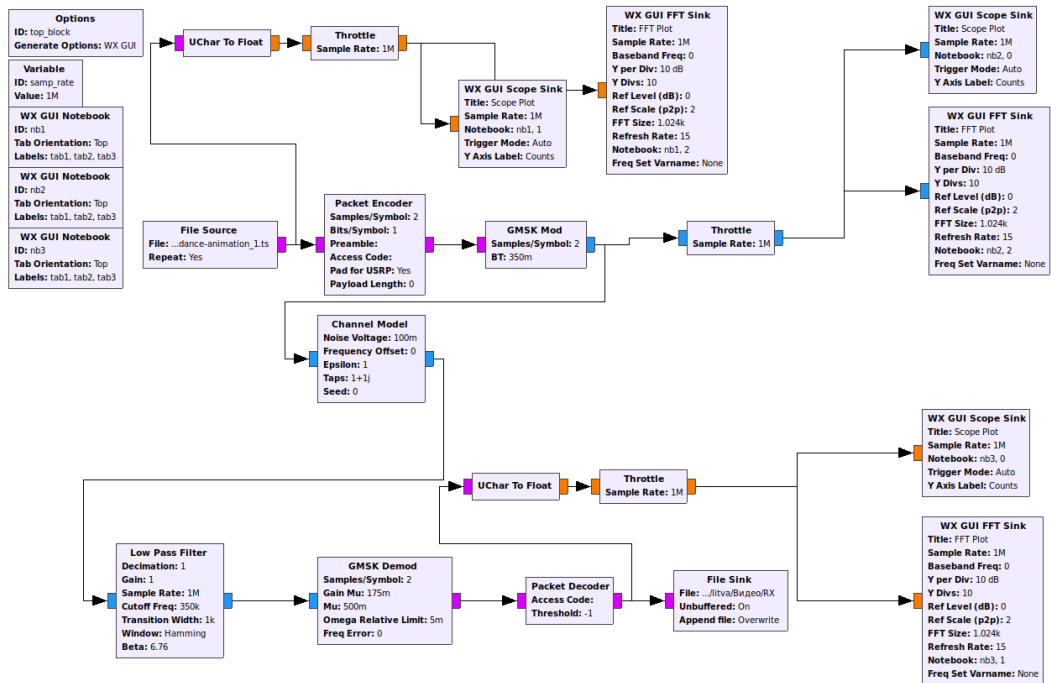


Рисунок 3.44 – Блок схема дослідження передачі з модуляцією GMSK.

Як можна бачити з малюнка 3.44, ми читаємо транспортний відео потік dance_animation_1.ts який записаний на жорсткому диску комп'ютера (блок File Source), потім з частотою вибірки 1МГц сигнал потрапляє на вхід пакетного енкодера (Packet Encoder) пакетів, котрий перетворює потік в бітний код. Цей потік поступає на Частотний модулятор Гауса з мінімальним зрушенням (GMSK mode), після чого сигнал подається на блок модулювання каналу зв'язку. Після каналу зв'язку сигнал потрапляє на фільтр нижніх частот (Low Pass Filter) де виділяється частота, далі сигнал потрапляє на Частотний демодулятор Гауса з мінімальним зрушенням (GMSK Demod) і після на декодер пакетів (Packet Decoder) і останній блок на який потрапляє сигнал – це блок File Sink який використовується для запису прийнятого повідомлення у файл на жорсткий диск комп'ютера.

Також на цій схемі присутні блоки графічного відображення сигналу, блоки сімейства WX GUI. Та допоміжні блоки Variable.

Далі розглянемо окремо передавач, канал і приймач з яких складається схема, та окремо кожен блок в цій схемі.

3.4.1 Передавач GMSK

Блок схема передавача GMSK зображена на рис 3.45

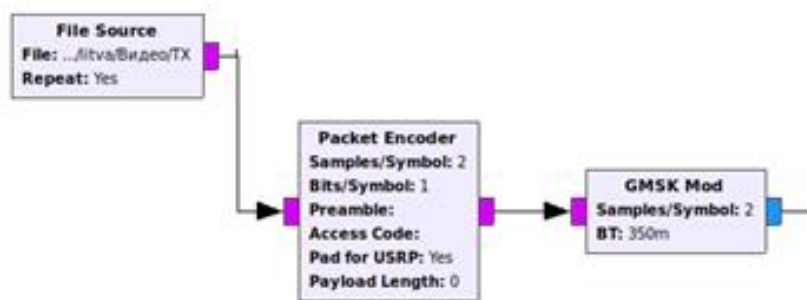


Рисунок 3.45 – блок схема передавача GMSK

Блок схема передавач складається з наступних блоків.

1. Блок вхідних даних (File source) (опис див. в п. 3.1.1).
2. Пакетний енкодер (Packet Encoder) (опис див. в п. 3.1.1).
3. Частотний демодулятор Гауса з мінімальним зрушенням (GMSK Mod) (рис.3.46) в ньому ми можемо задати ID блоку, вказати зразки на символ(Samples/Symbol), Пропускна здатність фільтра(BT).

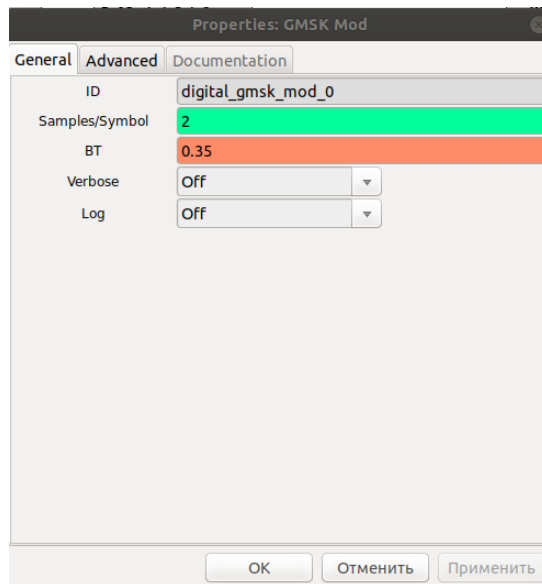


Рисунок 3.46 – Блок модуляції GMSK

3.4.2 Канал зв'язку

Канал передачі був описаний в розділі 3.1.2

3.4.3 Приймач GMSK

Блок схема приймача GMSK зображена на рис 3.47

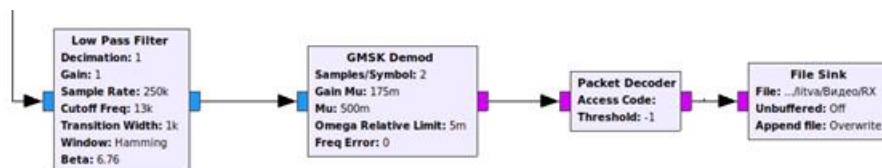


Рисунок 3.47 – блок схема приймача

Приймач складається з наступних блоків:

1. Фільтр нижніх частот (Low Pass Filter)(описаний в пункті 3.1.3)
2. Демодулятор GMSK (GMSK Demod)(рис.3.48) в якому вказується ID блоку, вказати зразки на символ(Semples/Symbol), Помилка частоти, Фракційна затримка.

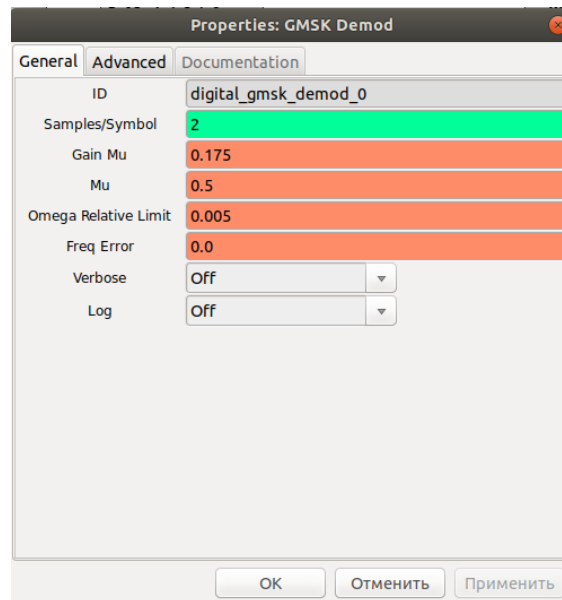


Рисунок 3.48 – блок демодуляції GMSK

3.4.4 Тестування блок схеми

Запустивши блок схему отримали наступні результати:

Відображення сигналу у часовій області та спектр сигналу після модуляції GMSK зображені на рис. 3.49-3.50

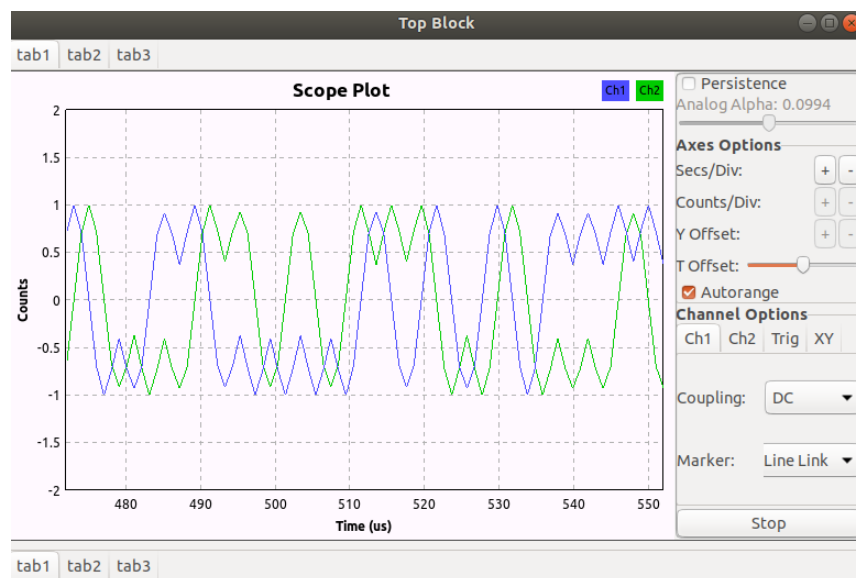


Рисунок 2.49 – Відображення сигналу у часовій області після модулятора GMSK

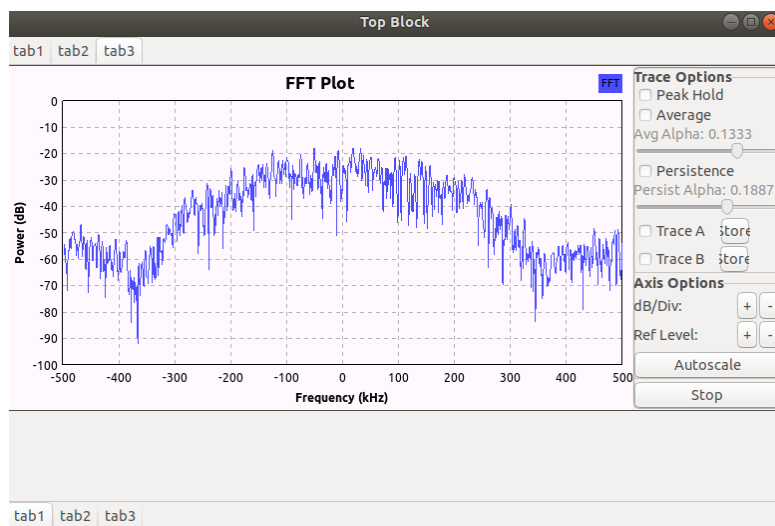


Рисунок 2.50 – Спектр сигналу після модулятора GMSK

Після того як передача файлу закінчилась, переходячи в директорію в яку вказувався шлях в блоці вихідних даних file sink та відкриваємо записаний файл які отримали при передачі. Бачимо що транспортний потік був переданий успішно передано успішно (рис 3.51)



Рисунок 2.51 – Прийняте відео у форматі транспортного потоку.

Висновок до розділу 3

Було розроблено програмну реалізацію приймача та передавача в програмному середовищі GNU Radio для дослідження зв'язку з використанням видимого світла. Протестовано програмну реалізацію з модуляціями PSK-4, PSK-8, QAM-8, QAM-16, GMSK в ході даного тестування вдалося передати текстовий файл txt, який був прийнятий без помилок. В ході тестування отримано відображення сигналу після блоку вхідних даних, після модуляції, після проходження каналу зв'язку та після декодування та демодуляції. За допомогою модуляції GMSK вдалося передати відео у форматі транспортного потоку H.264

4. СТАРТАП ПРОЕКТ

Метою даного розділу є створення інноваційного бачення, маркетинговий аналіз майбутніх здобутків при реалізації технології передачі даних у видимому світлі, а також оцінка можливості введення у комерцію основних науково-технічних розробок, описаних в попередніх розділах магістерської дисертації шляхом розробки концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів

4.1 Опис ідеї проекту застосування передачі даних у видимому світлі при комерційному застосуванні

У цьому розділі буде висвітлено інноваційний підхід до впровадження технологій передачі даних у видимому світлі, яке вже створене або тільки планується. Проект направлений на підвищення завадостійкості, зменшення інерційності та збільшення швидкості передачі даних, розгрузити радіоканал.

У таблиці 4.1 проаналізовано зміст ідеї, запропонованої ймовірні спрямованості її використання і головні вигоди, які має можливість отримати користувач продукту, в межах яких треба знаходити групи ймовірних покупців.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Технологія передачі даних у видимому світлі, що дає можливість збільшити швидкість передачі даних, розгрузити радіоканал, та дає	1. Підвищення рівня безпеки бездротової передачі, забезпечення конфіденційності.	Користувачі зможуть з більшою швидкістю обмінюватись даними. Збільшиться рівень безпеки від хакерських проникнень. Зменшаться витрати на електроенергію та в покупці обладнання. Дасть

<p>можливість використовувати дану технологію в місцях де неможливо використовувати РЧ</p>	<p>2. Збільшення швидкості обміну даними 3. Підводний зв'язок 4. Використовувати в IoT</p>	<p>можливість використовувати дану технологію у місцях де неможливо використовувати РЧ, Наприклад під водою, що є плюсом для воєнних цілей та зв'язку між аквалангістами та підводними лодками.</p>
--	--	---

У таблиці 4.2 проведено аналіз сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту у порівнянні з продуктом потенційних конкурентів.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

No п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	pureLifi	Philips			
1	легкий апгрейд обладнання	Так	Ні	Ні			Так
2	Топологія	Точка-точка	Точка-точка	Точка-точка		Так	

3	Швидкість передачі даних	~3,5 Гбіт/с	~3,5 Гбіт/с	~3,5 Гбіт/с			Так
4	Площа охоплення	~10м	~10м	~10м		так	
5	легко адаптована	Так	Ні	Ні		так	
6	Затримка	Мікросекунди	Мікросекунди	Мікросекунди		так	
7	Вартість впровадження	Відносно низька	Висока	Висока			Так

Конкуренти володіють лише частковим функціоналом, який реалізований в даному проекті. Серед сильних сторін визначені легка адаптованість, низька вартість, та легкий апгрейд обладнання.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Технологічна здійсненість ідеї проекту наведена у таблиці 4.3. У таблиці наведено ідею проекту, яку можливо впровадити, технологію реалізації ідеї, проаналізовано наявність технологій реалізації у світі та їх доступність.

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненість ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Використання технології SDR для організації зв'язку у видимому світлі	Використання трансиверу SDR під управлінням програмного забезпечення GNU Radio	Наявна	Доступна

Обрана технологія реалізації проекту: використання трансиверу SDR який керується програмним забезпеченням GNU Radio

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У таблиці 7.4 проаналізовано потенційний ринок стартап-проекту. Загалом проект відповідає вимогам ринку.

Таблиця 4.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж	?
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	?

Виходячи із отриманих даних та необхідності впровадження технології передачі даних у видимому світлі можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження

У таблиці 4.5 проаналізовано характеристику потенційних клієнтів проекту, а саме потреби, що формує ринок, цільові сегменти ринку, різну поведінку потенційних клієнтів, вимоги споживачів до товару.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап–проекту

No п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Збільшення швидкості передачі даних та збільшення полоси пропускання	Звичайні люди	Різні відмінності	<ul style="list-style-type: none"> • Збільшення швидкості передачі даних • Підвищення рівня безпеки бездротового зв'язку • Можливість обміну даними у місцях де неможливо використовувати РЧ • Зменшення факторів впливу на здоров'я людини.

У таблиці 4.6 представлено фактори загроз, що перешкоджають входженню проекту до ринку

Таблиця 4.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція
1	Відсутність зацікавленості у продукті	Успіх системи залежить від підтримки користувачів, адже з великою імовірністю люди не будуть звертати увагу на нову технологію передачі даних, а виберуть вже перевірені часом рішення.	Робота з користувачами, що буде означати створення бази клієнтів, які будуть рекомендувати цей продукт.
2	Ріст конкурентів	Можливі нова реалізація технології від конкурентів	Модернізація реалізації, проведення додаткових досліджень.
3	Економічний, політичний	Падіння економіки світу або якоїсь великої держави зі стабільно. економікою	Знаходження нових ринків збуту

У таблиці 4.7 представлено фактори можливостей, що перешкоджають входженню проекту до ринку.

Таблиця 4.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Потреба в технічному обслуговуванні	Технічна допомога та обслуговування клієнтів	Створення цілодобової консультаційної підтримки для клієнтів

2	Збільшення кількості світлодіодного освітлення	Розширення мережі передачі даних у видимому світлі	Збільшення покриття
3	Зменшення ціни на електричні компоненти	Зменшення собівартості продукту, що призведе до зростання попиту	Вихід на нові ринки збуту

У таблиці 4.8 проведено ступеневий аналіз конкуренції ринку, а саме аналіз особливостей конкурентного середовища, як проявляється дана характеристика та вплив на діяльність підприємства, тобто можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною.

Таблиця 4.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Олігополія	Не дуже багато конкурентів	Зменшення цін на продукт Підвищення якості продукту
2. Міжнародна	Замовники товару це звичайні люди по усьому світу	Потрібно збільшувати ринок збуту
3. Внутрішньогалузева	Тема предмету стосується до одної галузі	Підвищення якості Зменшення цін

4. Товарно–видова	Конкуренція між товарами одного виду	Розроблення кращої продукції, ніж у конкурентів
5. Цінова	Зменшення собівартості продукту	Зменшення вартості

У таблиці 4.9 проведено більш детальний аналіз конкуренції в галузі за М. Портером. У ній приведено аналіз прямих та потенційних конкурентів, постачальників, клієнтів та замінників продукту.

Таблиця 4.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	pureLifi, Philips	Гнучкі ціни, Патент на продукт	Змінні витрати постачальників	Рівень чутливості до зміни цін	Ціна, лояльність споживачів

Висновки	Конкуренція не інтенсивна, кожен працює в окремому регіоні	Можливість виходу в ринок висока. Потенційні конкуренти присутні	Постачальник може диктувати умови: ціни на послуги	Кожен клієнт потребує індивідуального підходу для вирішення його задач	з обмежень для роботи на ринку з боку товарів-замінників в даний момент не існує
----------	--	--	--	--	--

В результаті проведення аналізу таблиці 4.9, можна зробити висновок, що можливість виходу на ринок з огляду на конкурентну ситуацію є високою. Для виходу на ринок товар в першу чергу повинен пропонувати унікальні характеристики, які відсутні у продуктах конкурентів.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (таблиця 4.2), вимог споживачів до товару (таблиця 4.5) та факторів маркетингового середовища (таблиці 4.6 та 4.7), визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності, що надається у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Динаміка галузі	Проблема розвантаження спектру РЧ ресурсу наразі є дуже важливою.

2	Вартість кінцевого продукту	Використання більш доступних матеріалів та відсутність великого збільшення кінцевої ціни відносно собівартості робить продукт дешевшим за продукти конкурентів.
3	Після продажне обслуговування	Підтримка щодо використання системи після її продажу

За визначеними факторами конкурентоспроможності було проведено аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту. Порівняльний аналіз наведено у таблиці 4.11

Таблиця 4.11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з власною системою						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Динаміка галузі	3							✓
2	Вартість кінцевого продукту	1					✓		
3	Після продажне обслуговування	2						✓	

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (таблиця 4.12).

Таблиця 4.12 - SWOT-аналіз стартап проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Інноваційні технології • Легко адаптована • легкий апгрейд обладнання 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Слабкий імідж компанії • Слабкий маркетинг • Мало оборотних коштів • Невідома торгівельна марка
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Нові потреби клієнтів • Тенденції попиту 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Продукти-замінники

Після опрацювання SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки та приблизний час виведення стартап-проекта на ринок. У таблиці 4.13 проаналізовано альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту, ймовірність отримання ресурсів та строки реалізації.

Таблиця 4.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Малий бізнес	Переважно готові	Дуже високий	Низька	Легко
2	Всеукраїнські оператори	Не готові	Дуже високий	Низька	Важко

Цільовими групами обрано компанії малого бізнесу, що зацікавлені у вході нової технології передачі даних

Базові стратегії в обраних сегментах ринку представлені у таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Динамічний розвиток з використанням маркетингу та встановлення бізнес-контактів	Підняття рейтингу компанії шляхом маркетингу, встановлення конкурентоспроможних цін	Незалежність від посередника, який утримує кошти за свої послуги	Стратегія лідерства по витратах
2	Динамічний розвиток завдяки висвітленню унікальних характеристик надаваних послуг	Унікальність послуг, для збільшення лояльності клієнта	Легкий апгрейд обладнання	Стратегія диференціації

Залежно від міри сформованості галузевого ринку, характеру конкурентної боротьби, необхідно обрати одну з трьох стратегій конкурентної поведінки: розширення первинного попиту, оборонну або наступальну стратегію або ж застосувати демаркетинг або диверсифікацію (таблиця 4.15).

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект першопрохідцем на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів	Чи буде компанія копіювати основні характеристики	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект не є першопрохідцем	Компанія буде шукати нових користувачів	Компанія буде копіювати найкращі з характеристик конкурентів	Стратегія наслідування лідеру за для економії фінансових ресурсів

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (таблиця 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки була розроблена стратегія позиціонування (таблиця 4.16).

Таблиця 4.16 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту

1	Висока доступність	Стратегія диференціації	Використання трансивера SDR який дуже легко апгрейдити	Доступність, якість, швидкість
---	-----------------------	----------------------------	---	-----------------------------------

4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Маркетингова програма - це намічений для планомірного здійснення, об'єднаний єдиною метою та залежний від певних строків комплекс взаємопов'язаних завдань і адресних заходів соціального, економічного, науково-технічного, виробничого, організаційного характеру з визначенням ресурсів, що використовуються, а також джерел одержання цих ресурсів. Основну увагу слід приділяти вибору, значенню та формі інструментів маркетингу, їх об'єднанню в найбільш оптимальний з погляду визначеної мети комплекс, а також розподілу фінансових ресурсів у межах бюджетування маркетингу.

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (таблиця 4.17).

Таблиця 4.17 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентом
1	Ціна	Дешевше, ніж у конкурентів	Дешевше, ніж у конкурентів
2	Легкий апгрейд системи	Сервісна підтримка обладнання	Наявність підтримки

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточняється ідея продукту та послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (таблиця 4.18).

Таблиця 4.18 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1. Товар за задумом	Товар забезпечує передачу даних у видимому світлі
2. Товар у реально-му виконанні	Властивості: доступність, цілісність, зручність, прозорість
	Товар представляє собою програмний програмно-конфігуроване радіо, яке працює під управлінням програмного забезпечення GNU Radio та адаптоване під технологію передачі даних у видимому світлі.
	Поставляється у вигляді товару
	Назва: SDR-VLC
3. Товар із підкріпленням	До продажу: відбувається інсталяція та конфігурування системи, проводяться тренінги для клієнта
	Після продажу: відбувається сервісна підтримка клієнта
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: товар буде захищено за рахунок інтелектуальної власності і новітніх розроблених систем (ноу-хау)	

Аналіз системи збуту передбачає визначення ефективності кожного елемента цієї системи, оцінювання діяльності апарату працівників збуту. Аналіз витрат обігу передбачає зіставлення фактичних збутових витрат за кожним каналом збуту і видом витрат із запланованими показниками для того, щоб виявити необґрунтовані

витрати, ліквідувати затрати, що виникають у процесі руху товарів і підвищити рентабельність наявної системи збуту.

Дані щодо визначення системи збуту надаються в таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Попереднє замовлення	Встановлення контактів зі споживачами, їх підтримка	Канал нульового рівня	Збут продукції відбуватиметься безпосередньо через сайт виробника

У таблиці 7.20 проведено аналіз останньої складової маркетингової програми та розроблено концепцію маркетингових комунікацій. До складу концепції входить: специфіка поведінки цільової аудиторії, канали комунікацій, ключові позиції, завдання рекламного повідомлення та концепція рекламного звернення.

Таблиця 4.20 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення
-------	---------------------------------------	--------------------	--	----------------------------------

1	Консервативна поведінка, але відкриті нового,	Соцмережі професійного спрямування, корпоративна пошта	Можливості отримання переліку параметрів абонентів	та	Висвітлити унікальні характеристики продукту
---	---	--	--	----	--

У якості концепції маркетингових комунікацій були обрані інтегровані маркетингові комунікації, де компанія ретельно обмірковує і координує роботу своїх численних каналів комунікації, рекламу в засобах масової інформації, особистий продаж, стимулювання збуту, пропаганду, прямий маркетинг, упаковку товару.

Висновки до розділу 4

В даному розділі був проведений маркетинговий аналіз перспектив впровадження технологій передачі даних у видимому світлі та проведене оцінювання можливостей її ринкового впровадження.

В результаті дослідження визначено, що існує можливість ринкової комерціалізації проекту в першу чергу завдяки використанню технології програмно-конфігурованого радіо, що дозволяє легко апгрейдити та кастомізувати проект.

Конкурентна ситуація надає перспективи впровадження продукту, так як продукція товарів-аналогів має лише частковий функціонал реалізованої системи та володіє низкою критичних недоліків, через які рівень довіри до них залишається незадовільним. В результаті існуючі товари-аналоги не створюють прямої конкуренції на ринку.. Основною проблемою є можливе недовірливе ставлення користувачів

Проведений аналіз підтверджує, що подальша імплементація проекту є доцільною.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

В ході написання магістерської дисертації було виконано поставлені задачі.

Проведено огляд технології VLC, розкрито її основні переваги, основні характеристик та запропонован варіант реалізації стенду для дослідження зв'язку з використанням видимого світла. Запропонований варіант реалізації допоможе скоротити час між лабораторними дослідженнями і виходом готових апаратів на ринок.

В першому розділі в достатній мірі розкрито основні відомості про технологію зв'язку з використанням видимого світла, технологію програмно-конфігурованого радіо, та програмне забезпечення GNU Radio. Отримано відомості, що послугували не тільки основою для розуміння технологічного аспекту їх роботи, але й ключем до якісного вивчення властивостей розглянутого програмного забезпечення

В другому розділі було запропоновано апаратно програмну реалізацію стенду для зв'язку з використанням видимого світла. Описано основні елементи та принцип роботи стенду.

В третьому розділі розроблено програмну реалізацію приймача та передавача в програмному середовищі GNU Radio для дослідження зв'язку з використанням видимого світла. Протестовано програмну реалізацію з модуляціями PSK-4, PSK-8, QAM-8, QAM-16, GMSK. В ході якого був переданий файл txt та транспортний відео потік.

В четвертому розділі проведений маркетинговий аналіз перспектив впровадження технологій передачі даних у видимому світлі та проведене оцінювання можливостей її ринкового впровадження. В результаті дослідження визначено, що існує можливість ринкової комерціалізації проекту. Конкурентна ситуація надає перспективи впровадження продукту, так як продукція товарів-аналогів має лише частковий функціонал реалізованої системи та володіє низкою критичних недоліків. Проведений аналіз підтверджує, що подальша імплементація проекту є доцільною.

Отже, можна зробити висновок, що поставлена мета виконана.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M.Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala, and D. Knipp “Visible light communication using OFDM,” in Proc. 2nd Int. Conf. TestbedsRes.Infrastruct. Develop. Netw. Commun. – 2006. – P. 134.
2. H. Haas and C. Chen, “What is LiFi?” in Proc. 41st Eur. Conf. Opt. Commun., Valencia, Spain, Sep. 27, 2015–Oct. 1, 2015, – pp. 1-3.
3. Won E.T., Kang T., O'Brien D., Visible light communication tutorial IEEE 802.15 VLC SG, [Електронний ресурс]– Режим доступу до ресурсу: http://www.ieee802.org/802_tutorials/2008-03/15-08-0114-02-0000-VLC_Tutorial_MCO_Samsung-VLCC-Oxford_2008-03-17.pdf.
4. WHO/IARC, Radiofrequency Electromagnetic Fields: evaluation of cancer hazards, 2012. [Електронний ресурс]– Режим доступу до ресурсу: http://monographs.iarc.fr/ENG/Publications/REF_Poster2012.pdf.)
5. CELMA, Optical safety of LED lighting, [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://www.lightingeurope.org/uploads/files/CELMAELC_LED_WG\(SM\)011_ELC_CELMA_position_paper_optical_safety_LED_lighting_Final_1st_Edition_July2011.pdf](http://www.lightingeurope.org/uploads/files/CELMAELC_LED_WG(SM)011_ELC_CELMA_position_paper_optical_safety_LED_lighting_Final_1st_Edition_July2011.pdf).
6. Pingree T. L., Dangers of Overexposure to ultraviolet, infrared and highenergy visible light, [Електронний ресурс]–Режим доступу до ресурсу: <http://www.ishn.com/articles/94815-dangers-ofoverexposure-to-ultraviolet-infrared-and-high-energy-visible-light>.
7. IEEE, IEEE Global History Network, [Електронний ресурс]– Режим доступу до ресурсу: http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Wireless_LAN_802.11_Wi-Fi.
8. IEEE Standards Association, [Електронний ресурс]– Режим доступу до ресурсу: <http://standards.ieee.org/develop/project/802.15.7.html>.
9. JEITA, JEITA visible light communication standards, [Електронний ресурс]– Режим доступу до ресурсу: http://www.jeita.or.jp/cgi-bin/standard_e/list.cgi?cateid=1&subcateid=50.

- 10.[Serafimovski N., PureVLC, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: <http://purevlc.co.uk/the-future-of-vlcmodulation-ofdm/>.
структура
- 11.M. Biagi, A. Vegni, and T. D. C. Little, “Lat indoor mimo-vlc localize, access and transmit,” in Optical Wireless Communications (IWOW), 2012 International Workshop on, pp. 1–3, Oct 2012.
- 12.Y. Hong, J. Chen, Z. Wang, and C. Yu Photonics Journal, IEEE, vol. 5, pp. 7800211–7800211, 2013.
- 13.P. M. Butala, H. Elgala, and T. D. Little, “Svd-vlc: A novel capacity maximizing vlc mimo system architecture under illumination constraints,” in Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE, pp. 1087–1092, IEEE, 2013.
- 14.T. Komine and M. Nakagawa Consumer Electronics, IEEE Transactions on, vol. 49, pp. 71–79, 2003.
- 15.Z. Wu, J. Chau, and T. Little, “Modeling and designing of a new indoor free space visible light communication system,” in Networks and Optical Communications (NOC), 2011 16th European Conference on, pp. 72–75, IEEE, 2011.
- 16.K. Lee, H. Park, and J. Barry Communications Letters, IEEE, vol. 15, pp. 217–219, February 2011.
- 17.J. Barry, J. Kahn, W. Krause, E. Lee, and D. Messerschmitt Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 11, pp. 367–379, Apr 1993.
- 18.S. il Choi, “Analysis of vlc channel based on the shapes of white-light led lighting,” in Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2012 Fourth International Conference on, pp. 1–5, July 2012.
- 19.R. Roberts and Z. Xu, “Update on vlc link budget work,” in IEEE 802.15. 7 VLC Standard Meeting, 2009.
- 20.M. Biagi, T. Borogovac, and T. D. Little Journal of Lightwave Technology, vol. 31, pp. 3676–3686, 2013.
- 21.H. Yang, J. W. Bergmans, T. C. Schenk, J.-P. M. Linnartz, and R. Rietman Optics express, vol. 16, pp. 21641–21646, 2008.

22. M. Saadi, L. Wattisuttikulij, Y. Zhao, and P. Sangwongngam *International Journal of Electronics & Informatics*, vol. 2, 2013.
23. J. Tan, K. Yang, M. Xia, and Y. Yang *Opt. Appl*, vol. 41, pp. 507–517, 2011.
24. J. M. Kahn and J. R. Barry *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, pp. 265–298, 1997.
25. X. Zhang, K. Cui, M. Yao, H. Zhang, and Z. Xu, “Experimental characterization of indoor visible light communication channels,” in *Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2012 8th International Symposium on, pp. 1–5, IEEE, 2012.
26. F. Porikli, “Inter-camera color calibration by correlation model function,” in *Image Processing, 2003. ICIIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference on*, vol. 2, pp. II–133, IEEE, 2003.
27. Z. Yu, R. J. Baxley, and G. T. Zhou, “Multi-user MISO broadcasting for indoor visible light communication,” in *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2013 IEEE International Conference on, pp. 4849–4853, IEEE, 2013.
28. J. R. Janesick, “Photon transfer,” *SPIE*, 2007.
29. K. Cui, G. Chen, Z. Xu, and R. D. Roberts, “Line-of-sight visible light communication system design and demonstration,” in *Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2010 7th International Symposium on, pp. 621–625, IEEE, 2010.
30. M. Zhang and Z. Zhang, “Fractionally spaced equalization in visible light communication,” in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2013 IEEE, pp. 4282–4287, IEEE, 2013.
31. R. D. Roberts, S. Rajagopal, and S.-K. Lim, “IEEE 802.15. 7 physical layer summary,” in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011 IEEE, pp. 772–776, IEEE, 2011.
32. A. Yokoi *IEEE P802*, vol. 15, 2008.
33. Valerio D. *Open Source Software-Defined Radio: A survey on GNUradio and its applications // Technical Report*, Donaucitystrasse 1, 1220 Vienna, AUSTRIA, 2008.F

34. Cossu G., Khalid A. M., Choudhury P., Corsini R. and Ciaramella E., 1 Gbps Transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete Multitone DMT modulation, *IEEE Photonic Journal* Volume 4, Number 5, 26 9 2012.
35. Tsonev D., Chun H., Rajbhandari S., McKendry J., Videv S., Gu E., Haji M., Watson S., Kelly A., Faulkner G., Dawson M., Haas H. and O'Brien D., A 3Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED, *IEEE Photonics Technology Letters* Volume 26 Issue 7, pp. 637 - 640, 5 3 2014.
36. Ettus Research, Support: Knowledge Base, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу:: <http://www.ettus.com/kb/detail/usrp-bandwidth>.
37. GNU Radio, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>.
38. GitHub, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: <https://github.com/>.
39. Held G., *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009
40. LedEngin, inc, Data sheet LZC-00MC40RGB LED emitter," [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: <http://www.farnell.com/datasheets/684650.pdf>.
41. Won E.T., Kang T. and O'Brien D., Visible light communication tutorial IEEE 802.15 VLC SG, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: http://www.ieee802.org/802_tutorials/2008-03/15-08-0114-02-0000-VLC_Tutorial_MCO_Samsung-VLCC-Oxford_2008-03-17.pdf.
42. Shin H., Park J. and Song S., Performance evaluation of visible-light transceiver for peripheral interface, *Optical Engineering* 50, 27 1 2011.
43. Rahaim M., Borogovac T., Little T. D. C., Mirvakili A. and Joyner V., Demonstration of a Software Defined Visible Light Communication System, 15 9 2011. [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: http://www.academia.edu/6234514/Demonstration_of_a_Software_Defined_Visible_Light_Communication_System.

44. PCB Heaven, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: http://www.pcbheaven.com/wikipages/The_Capacitor/.
45. Minicircuits, DC block 89 data sheet, URL: www.minicircuits.com.
46. Le-Minh H., O'Brien D., Faulkner G., Zeng L. and Lee K., High-Speed Visible Light Communications Using Multiple-Resonant Equalization, *Photonics Technology Letters* volume 20, 2008.
47. Elgala H., Mesleh R. and Haas H., "Non-linearity effects and predistortion in optical OFDM wireless transmission using LEDs," in *IEEE 10th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, Shenyang Liaoning, China, 2009*.
48. Serafimovski N., PureVLC, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: <http://purevlc.co.uk/the-future-of-vlcmodulation-ofdm/>. (Accessed 18 11 2013).
49. JEITA, JEITA visible light communication standards, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: http://www.jeita.or.jp/cgi-bin/standard_e/list.cgi?cateid=1&subcateid=50. (Accessed 26 9 2014).
50. Xie Z., Kaiyun C., Minyu Y., Hongming Z. and Zhengyuan X., Experimental Characterization of Indoor Visible Light Communication Channels, in *Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), 2012 8th International Symposium on, Poznan, 2012*.
51. Zeng L. B., O'Brien D. C., LeMinh H., Faulkner G. E., Lee K., Jung D., Oh Y. and Won E. T., High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting, *IEEE Journal Selected Areas in Communications* Volume 27 Issue 9, pp. 1654 - 1662, 1 12 2009.
52. Cossu G., Khalid A. M., Choudhury P., Corsini R. and Ciaramella E., 1 Gbps Transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete Multitone DMT modulation, *IEEE Photonic Journal* Volume 4, Number 5, 26 9 2012.
53. Ultra-parallel visible light communications project, Ultra-parallel visible light communications (UP-VLC) project, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: <http://up-vlc.photonics.ac.uk/>. (Accessed 2014 9 25).

54. Ryer A., Light measurement handbook, Newburyport: International Light, Inc, 1998
55. Zeng L. B., O'Brien D. C., LeMinh H., Faulkner G. E., Lee K., Jung D., Oh Y. and Won E. T., High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting, IEEE Journal Selected Areas in Communications Volume 27 Issue 9, pp. 1654 - 1662, 12 2009.
56. National Instruments, Device specification NI-USRP 2920, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375839a.pdf>. (Accessed 2014 9 18).
57. Zhao Y. ja Vongkulbhisal J., Design of Visible Light Communication Receiver for On-Off Keying Modulation by Adaptive Minimum-Voltage Cancellation, ENGINEERING JOURNAL Volume 17 Issue 4, 9 2013.
58. Ettus Research, USRP daughterboards selection guide, [Электронный ресурс]– Режим доступа до ресурсу: http://www.ettus.com/content/files/kb/Selecting_an_RF_Daughterboard.pdf.
59. Liu Y. F., Chang Y. C., Chow C. W. and Yeh C. H., Equalization and predistorted schemes for increasing data rate in in-door visible light communication system, in Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, CA, 2011.
60. Le-Minh H., O'Brien D., Faulkner G., Zeng L., Lee K., Jung D. and Oh Y., 100-Mb/s NRZ visible light communications using a post-equalized white LED, IEEE Photonics Technology Letters Volume 21 Issue 15, 15 5 2009.
- 61.1. O.I Romanov, D.M. Fediushyna, T.T. Dong Model and method of Li-Fi network calculation with multipath Light Signals/2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 10-14 Sept. 2018, **Date Added to IEEE Xplore:** 26 March 2020, **Conference** Kyiv, Ukraine. **DOI:**10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047550, [\(e\)ISBN: 978-1-5386-5264-0](#)
62. O.I. Romanov, M.M. Nesterenko, L.A. Veres. Integration Of Modern Protocols Ip-Telephony In IMS Architecture/2018 International Conference on Information

- and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 10-14 Sept. 2018, **Date Added to IEEE Xplore:** 26 March 2020, Conference Kyiv, Ukraine. **DOI:** 10.1109 / UkrMiCo43733.2018.9047587, [\(e\)ISBN:](#) 978-1-5386-5264-0
63. Oleksandr Romanov, Tho Dong and Mikola Nesterenko The Possibilities for Deployment Eco-Friendly Indoor Wireless Networks Based on LiFi Technology/ 8th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAИT), 2020. <http://dx.doi.org/10.25673/32747>
64. Romanov O., Nesterenko M., Veres L., Kamarali R., Saychenko I. (2021) Methods for Calculating the Performance Indicators of IP Multimedia Subsystem (IMS). In: Ilchenko M., Uryvsky L., Globa L. (eds) Advances in Information and Communication Technology and Systems. MCT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 152. Springer, Cham. http://doi-org-443.webvpn.fjmu.edu.cn/10.1007/978-3-030-58359-0_13
65. F. M. Wu, C. T. Lin, et al. "1.1-Gb/s White-LED-Based Visible Light Communication Employing Carrier-Less Amplitude and Phase Modulation", IEEE Photonics Technology Letters, 2012
66. G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella, "3.4-Gb/s visible optical wireless transmission based on RGB LED," Optics Express, 2012
67. Романов О.І., Донг Т.Т., Сайченко І.О. (2019), « перспективи побудови екологічно безпечних мереж передачі даних з використанням технології LIFI». Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», с. 134-137
68. Романов О.І., Федюшина Д.М., Донг Т.Т. Використання технології VLC для побудови мереж LI-FI та принцип її практичної реалізації. Матеріали 12-ої МНТК «Проблеми телекомунікацій», Київ, 2018 р. С 92-94.