

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій**  
(повне найменування інституту, факультету)

**Кафедра радіотехніки та телекомунікацій**  
(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)  
магістра  
(ступінь вищої освіти)

на тему **МЕТОД ПОКРАЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ТА ЧУТЛИВОСТІ  
РАДІОМЕТРУ ШЛЯХОМ РЕАЛІЗАЦІЇ НА HACKRF SDR**

Виконав(ла): студент(ка) 2м курсу, групи БКз-913м

Спеціальності \_\_\_\_\_

172 «Електронні комунікації та радіотехніка»  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) \_\_\_\_\_

«Інформаційні мережі зв'язку»

БЕЛИМЕНКО О.Ю.  
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ЛОГАЧОВА Л.М.  
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**  
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Інформаційної безпеки та електронних комунікацій  
 Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій  
 Ступінь вищої освіти магістр  
 Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»  
 (код і найменування)  
 Освітня програма (спеціалізація) Інформаційні мережі зв'язку  
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри РТТ  
 к.ф.-м.н., доц. Сергій САМОЙЛИК  
 «    » грудня 2024 року



**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**

БЕЛИМЕНКУ Олександрю Юрійовичу

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Метод покращення стабільності та чутливості радіометру шляхом його реалізації на HackRF SDR

керівник проєкту (роботи) ст.викладач ЛОГАЧОВА Людмила Михайлівна

(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «15» жовтня 2024 року №416


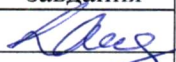
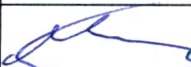

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Технічні характеристики SDR HackRF

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Призначення та типи радіометрів. Принципи роботи радіометра та розробка апаратної частини. Розробка програмного забезпечення для реалізації радіометра на SDR та реалізація вимірювального експерименту. Установка оцінювання та постановка експерименту. Аналіз отриманих результатів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) презентація роботи в PowerPoint

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	ЛОГАЧОВА Л.М., ст. викладач		
Нормо-контроль	МОРОЗ Г.В., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання «02» вересня 2024 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Пошук та вивчення наукових джерел	2.9-1.10	всього
2	Вибір апаратної та програмної платформи для реалізації радіометра	2.10-14.10	всього
3	Розробка структури та схеми радіометра	14.10-24.10	всього
4	Написання програмного забезпечення	24.10-2.11	всього
5	Тестування розробленого радіометру на SDR та порівняння з класичним радіометром	2.11-2.12	всього
6	Оформлення пояснювальної записки	8.12	всього
7	Перевірка ПЗ на добросовісність	10.12	всього
8	Створення презентації у Power Point	16.12	всього
9	Захист		

Студент(ка)

  
 (підпис)

Олександр БЕЛИМЕНКО  
 (ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

  
 (підпис)

Людмила ЛОГАЧОВА  
 (ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 80 с., 3 табл., 35 рис., 16 джерел.

РАДІОМЕТР, ПРОГРАМНО ВИЗНАЧЕНЕ РАДІО, ПЕРЕДАВАЧ, ПРИЙМАЧ, АНАЛОГОВО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПІДСИЛЮВАЧ.

Мета роботи – дослідження проблеми побудови радіометрів на сучасних електронних компонентах та засобах, а також збільшення чутливості та стабільності роботи радіометрів.

Об'єкт дослідження – принцип та алгоритм побудови радіометра на основі програмно визначеного радіо (SDR).

Предмет дослідження – пристрій на основі SDR HackRF що виконує функції радіометра для частотного діапазону від 100МГц до 6000МГц.

У магістерській роботі досліджується використання програмно визначеного радіо (SDR) для створення радіометра, який здатний виконувати ту саму операцію, що й традиційний радіометр, і пропонує додаткові можливості, яких немає в традиційних радіометрах. Традиційний радіометр потребує ретельного проектування, щоб забезпечити правильну роботу. За допомогою максимально швидшої оцифровки радіочастотного сигналу та обробки цього сигналу в програмному забезпеченні апаратна конструкція радіометра на базі SDR може бути спрощена.

## ЗМІСТ

	С.
Скорочення та умовні позначки .....	7
Вступ.....	8
1 Призначення та типи радіометрів.....	10
1.1 Цифрові радіометри.....	10
1.2 Програмно визначені радіорадіометри .....	11
1.3 Пом'якшення радіочастотних перешкод (RFI).....	12
2 Принципи роботи радіометра та розробка апаратної частини .....	14
2.1 Основи роботи радіометра .....	14
2.1.1 Вимірювання потужності радіометром .....	15
2.1.2 Показники продуктивності радіометра .....	18
2.2 Основи програмно визначеного радіо .....	23
2.3 Платформа для розробки програмно визначеного радіо .....	25
2.3.1 Апаратна платформа.....	25
2.3.2 Програмна платформа .....	32
3 Розробка програмного забезпечення для реалізації радіометра на SDR та реалізація вимірювального експерименту .....	35
3.1 Вимоги до апаратного та програмного забезпечення .....	35
3.2 Відображення традиційних функцій радіометра в програмному забезпеченні .....	36
3.2.1 Вимірювання потужності.....	36
3.2.2 Згладжування даних .....	38
3.2.3 Обмеження та фільтрація пропускнуої здатності.....	43
3.3 Програмно визначений графічний інтерфейс радіометра .....	44
4 Проведення експериментів та аналіз отриманих результатів .....	47
4.1 Установка оцінювання та постановка експерименту .....	47

4.2 Аналіз отриманих результатів .....	58
4.2.1 Результати перевірки та калібрування радіометра на основі програмного забезпечення .....	58
4.2.2 Результати оцінки чутливості та стабільності .....	62
4.2.3 Результати експерименту зменшення сигналу перешкод .....	63
4.2.4 Результати експерименту впливу пом'якшення сигналу перешкод на продуктивність.....	68
4.3 Переваги програмно визначеного радіорадіометра.....	73
4.4 Недоліки радіометра на основі SDR .....	75
Висновки .....	76
Перелік джерел посилань .....	78

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- COTS – (Commercial-Off-The-Shelf) комерційна готовість
- FPGA – (Field-Programmable Gate Array) програмована користувачем  
вентильна матриця
- GUI – (Graphical User Interface) графічний інтерфейс користувача
- PGA – (programmable-gain amplifier) підсилювач із програмованим  
коефіцієнтом посилення
- SDR – (Software Defined Radio) програмно визначене радіо
- SoC – (System-on-a-Chip) системи на кристалі
- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
- МШП – малошумний підсилювач
- ПК – персональний комп'ютер

## ВСТУП

Цифрові радіометри досліджувалися і раніше, але існуючі часто використовують спеціальні компоненти. Програмно визначена радіотехнологія набула більшого поширення, і тепер доступні комерційні готові SDR (COTS) з високою продуктивністю. В роботі пропонується використати технологію COTS SDR для реалізації та оцінки радіометра на основі SDR. Це знизить вартість радіометра та допоможе зробити радіометри більш доступними для широкої аудиторії. Розглядається порівняння функціональних можливостей традиційного радіометра та запропонованого радіометра на основі SDR. Потім проводиться експериментальна оцінка продуктивності між традиційним і SDR-радіометром. Крім того, ця робота досліджує, як реалізований радіометр на основі SDR може допомогти зменшити радіочастотні перешкоди.

Дистанційне зондування стосується запису, спостереження та сприйняття об'єктів або подій, які знаходяться віддалено. Оскільки об'єкт інтересу віддалений, ми не можемо фізично взаємодіяти з ним за допомогою локальних методів вимірювання, таких як розміщення датчиків або зондів на об'єкті. Дистанційне зондування можна здійснити кількома способами:

- видиме світло (фотографія та фотограмметрія);
- теплова інфрачервона радіометрія;
- лазерне вимірювання відстані (лідар);
- радіометрія.

Кожен із цих методів має пов'язаний набір плюсів і мінусів, тому дистанційне зондування часто використовує комбінацію методів, щоб скласти повну картину об'єкта. Магістерська робота присвячена приладу, який використовується в радіометрії для захоплення радіочастотних сигналів і називається радіометром.



Радіометрію можна розділити на два методи; активний або пасивний. Активна система – це система, в якій радіочастотний сигнал (або імпульс) генерується і передається об'єкту, що цікавить. Відображення цього радіочастотного сигналу або, в деяких випадках, відсутність відображення дає інформацію про об'єкт. Пасивна система – це система, в якій не генерується радіочастотний сигнал (або імпульс). Натомість цей тип радіометра просто слухає радіочастотну енергію, яка природно генерується об'єктом, або яка може бути відбита від іншого джерела.

Постановка проблеми. Хоча радіометри виявилися чудовим інструментом для дистанційного зондування та використовуються в дослідницьких цілях понад п'ятдесят років, вони не отримали широкого використання. Це пов'язано з тим, що багато традиційних радіометрів мають такі недоліки:

- висока вартість;
- вимагають поглиблених знань для реалізації та використання;
- як правило, створені та розроблені для спеціального застосування.

Використання комерційно готових деталей і рішень допоможе зменшити вартість і потребу в індивідуальному дизайні. Програмне забезпечення використовуватиметься для визначення ключових компонентів радіометра, які традиційно впроваджувалися в апаратному забезпеченні, і для полегшення адаптації до багатьох програм. Зручний графічний інтерфейс користувача (GUI) допоможе зменшити необхідність поглиблених знань, необхідних для впровадження та використання радіометра.

# 1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ТИПИ РАДІОМЕТРІВ

## 1.1 Цифрові радіометри

Цифровий радіометр замінює частини традиційних аналогових компонентів радіометра цифровими компонентами. Два типи цифрових радіометрів включають: гібридний і прямої вибірки.

Гібридний радіометр використовує суміш аналогових і цифрових компонентів. Часто аналоговий вихід напруги від діода квадратурного детектора, який використовується для вказівки загальної спостережуваної потужності, буде оцифрований.

Радіометр із прямою вибіркою можна вважати різновидом гібридного радіометра, який безпосередньо відбирає вхідний радіочастотний сигнал, а потім використовує методи цифрової обробки сигналу для отримання інформації про загальну потужність. Цей радіометр приймає радіочастотний сигнал і за допомогою аналогових компонентів підсилює та фільтрує сигнал, а потім надсилає його на аналого-цифровий перетворювач. Цей метод дозволяє отримати інформацію про потужність, однак повний сигнал неможливо відтворити через теорему Найквіста.

І гібридні радіометри, і радіометри прямого відбору зразків розроблені таким чином, щоб зберігати лише інформацію про загальну потужність, що міститься в радіочастотному сигналі. Хоча вимірювання загальної РЧ-потужності є основною метою радіометра, збереження інформації про фазу та частоту також може бути корисним.

## 1.2 Програмно визначені радіорадіометри

Радіометри з програмним забезпеченням можна вважати відносно новим підкласом цифрових радіометрів. З появою програмно визначених радіоприймачів, які зараз доступні, зростає інтерес до застосування цієї технології до радіометрів.

Радіоастрономічний консорціум Ширліс-Бей (SBRAC) використав програмно визначене радіо для відновлення радіотелескопа, який використовується для радіоастрономії. Вони приєднали програмно визначене радіо до своєї антени радіусом вісімнадцять метрів, щоб отримати астрономічну інформацію, спостерігаючи лінію водню, розташовану на частоті 1420,4058 МГц у радіочастотному спектрі. Маркус Ліч, який очолював SBRAC, надав програмне забезпечення GNURadio спеціально для підтримки програм радіоастрономії. Ця гілка GNURadio була використана як основа програмного забезпечення для цієї дипломної роботи.

У той час як частини програмного забезпечення GNURadio, які використовуються в цій дипломній роботі, були отримані з роботи Маркуса Ліча, були додані додаткові функції, такі як виявлення шкідливого сигналу, пом'якшення шкідливого сигналу та програмно реалізований генератор шуму. Крім того, елементи графічного інтерфейсу користувача (GUI) були покращені, щоб допомогти у візуалізації та аналізі даних. Наприклад, реалізовано водоспадне відображення спектру сигналу в часі.

У 2013 році Університет штату Іллінойс і Університет штату Гранд-Веллі створили програмний радіометр для прослуховування випромінювання Юпітера. Вони спеціально створили апаратну частину свого програмно визначеного радіо за допомогою аналого-цифрового перетворювача Analog Devices (AD9460) і Xilinx (Spartan-3E-500) FPGA. Вони також реалізували радіочастотний інтерфейс для фільтрації та посилення вхідного

радіочастотного сигналу. Програмна частина їхнього радіометра складалася з:

- GNURadio для низькорівневого зв'язку з їхнім програмно визначеним радіо;
- сценарію Python і WxGUI для реалізації інтерфейсу користувача вищого рівня.

Студенти повідомили, що їхній радіометр на основі SDR працював добре за низькою ціною. Одним з аспектів, який відрізняє роботу в нашому дипломі від роботи Університету штату Гранд-Веллі, є те, що вони створюють власне апаратне забезпечення для свого програмно визначеного радіо, тоді як у цій роботі використовувались стандартні компоненти з метою зробити радіометри більш доступними для дослідницького співтовариства.

### **1.3 Пом'якшення радіочастотних перешкод (RFI)**

Коли РЧ-сигнал, створений джерелом, відмінним від об'єкта (або явища), що цікавить, створює перешкоди (тобто маскує або забруднює) цікавий РЧ-сигнал, це називається радіочастотною інтерференцією (RFI). Радіочастотні перешкоди є загальною проблемою майже для всіх радіометрів, оскільки вони є високочутливими приймачами, тому навіть невеликі небажані сигнали можуть мати великий негативний вплив на експеримент, заснований на радіометрі. Саме з цієї причини певні діапазони частот були визначені міжнародним співтовариством як «захищені частоти» для використання в радіометрах. Однак не всі організації дотримуються цих стандартів. Наприклад, супутниковий радіометр, який використовувався в місії Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS), мав численні проблеми з RFI, які спотворювали їхні дані, а в деяких випадках робили дані непридатними для вимірювання вологості ґрунту.

Сфера виявлення та пом'якшення радіочастотних перешкод все ще є активною сферою досліджень. Щодо виявлення радіочастотних поміх, оскільки радіометри зазвичай не зберігають інформацію про спектральні частоти, були досліджені статистичні методи, які дивляться на варіації отриманої потужності, щоб визначити, коли виникають радіочастотні перешкоди. Одним із таких методів є статистичний метод ексцесу, тоді як іншим методом є метод поляризаційного підпису. Що стосується пом'якшення радіочастотних поміх, механічні фільтри використовуються для вибіркової фільтрації шкідливих сигналів.

Хоча механічні фільтри є ефективним засобом пом'якшення радіочастотних поміх, вони додають радіометру ваги та складності. Наприклад, для виділення та видалення смуг частот, які містять шкідливий(і) сигнал(и), знадобиться декілька фільтрів. Однією з ідей, яку досліджує ця робота, є використання частотної інформації та програмних цифрових фільтрів для виявлення та пом'якшення RFI.

## 2 ПРИНЦИПИ РОБОТИ РАДІОМЕТРА ТА РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

### 2.1 Основи роботи радіометра

Радіометр – це пристрій, призначений для вимірювання потужності електромагнітного випромінювання матеріального середовища внаслідок електронного коливання всередині матеріалу. Щодо дистанційного зондування – це електромагнітне випромінювання є тепловим шумом об'єкта, і його можна співвіднести з фізичною температурою об'єкта. Через цю кореляцію кількість отриманого шуму називається шумовою температурою та вимірюється в Кельвінах.

Існує шість блоків, загальних для всіх радіометрів:

- джерело (антена або  $T_A$ );
- пропускна здатність ( $\beta$ );
- посилення (посилення потужності або  $G$ );
- виявлення потужності ( $X^2$ );
- згладжування даних;
- вихід (напруга,  $rQ$ , Кельвін).

На рисунку 2.1 показано, як сигнал поширюється через радіометр. Спочатку сигнал від джерела надходить в антену,  $T_A$ . Далі сигнал фільтрується до заданої смуги пропускання,  $\beta$ . Потім цей відфільтрований сигнал посилюється підсилювачами з низьким рівнем шуму (LNA) за рахунок посилення потужності  $G$ . Потім інформація про потужність витягується із сигналу за допомогою квадратурного детектора  $X^2$ . Цей пристрій являє собою діод, який працює в квадратичній області. Коли діод працює в цій області, вихідна напруга пропорційна квадрату вхідної напруги і, отже, пропорційна вхідній потужності. Вихідна напруга з квадратурного

детектора потім згладжується за допомогою інтегратора з часом інтегрування  $\tau$ . Нарешті, інтегрований сигнал напруги потім вимірюється та записується.

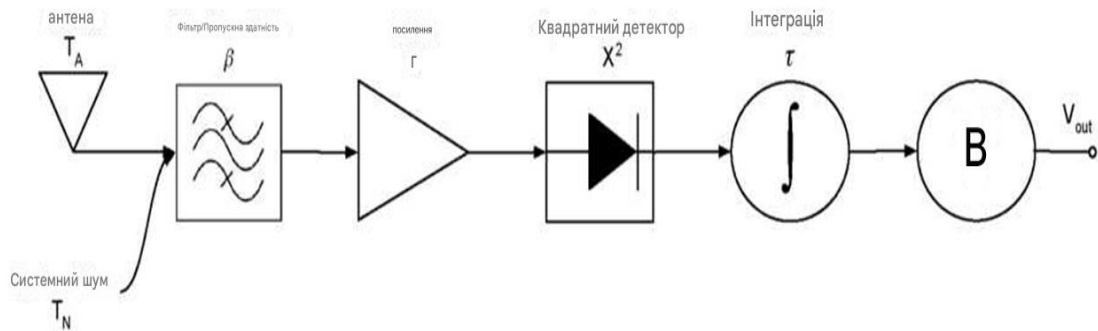


Рисунок 2.1 – Блок-схема радіометра загальної потужності

Нефізичним об'єктом, який присутній у всіх радіометрах, є системний шум, представлений як  $T_N$ . Системний шум – це шум, який створюється всередині радіометра внаслідок теплового перемішування. Радіометр призначений для максимального зменшення системного шуму за допомогою компонентів із низькими втратами та малошумних підсилювачів, наприклад малошумних підсилювачів (LNA).

### 2.1.1 Вимірювання потужності радіометром

Напруга від радіометра може бути виражена як сума шумових напруг, амплітудний розподіл яких є майже Гауссовим, як визначено центральною граничною теоремою. У результаті середнє значення напруги дорівнює нулю, але середньоквадратичне значення напруги буде більшим за нуль у вибірці з обмеженою смугою. Оскільки наша напруга є середньоквадратичним значенням, наша потужність  $i$ , відповідно, наша потужність шуму є середньоквадратичним значенням.

Як показано в рівнянні 2.1, потужність, виміряна ідеальним радіометром, дорівнює добутку теплового шуму від джерела ( $T_A$ ), посилення потужності ( $G$ ), смуги пропускання ( $\beta$ ) радіометра та сталої Больцмана ( $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К).

$$P = k * \beta * G * (T_A). \quad (2.1)$$

Хоча компоненти ідеального радіометра не залежать від потужності системного шуму ( $T_N$ ), у справжньому радіометрі цей шум дає вплив. Вплив цього внутрішньо створеного небажаного шуму на потужність, виміряну радіометром, враховується рівнянням 2.2, де  $T_N$  – системний шум, що відноситься до входу системи.

$$P = k * \beta * G * (T_A + T_N). \quad (2.2)$$

Підсилення потужності ( $G$ ) і ширина смуги ( $\beta$ ) є важливими конструктивними параметрами радіометра. Хоча для посилення сигналу джерела ( $T_A$ ) потрібне велике посилення потужності, системний шум також посилюється. Конструкція цих підсилювачів має вирішальне значення для посилення сигналу при мінімізації внеску системного шуму.

Смуга пропускання сигналу джерела зазвичай широка (велика), щоб максимізувати чутливість радіометра. Двома основними обмежуючими факторами пропускну здатності є:

- апаратні обмеження (наприклад, обмеження роботи МШП);
- небажані сигнали, розташовані на кількох частотах (наприклад, сигнали радіозв'язку).

Посилення з низьким рівнем шуму. Метод, який використовується більшістю радіометрів для пом'якшення системного шуму, який виникає під час підсилення сигналу, – це послідовне з'єднання (тобто каскад) пристроїв,



які називаються малошумними підсилювачами (LNA). Загальна величина підсилення, яку ми можемо очікувати від  $n$  МШП, з'єднаних каскадом, є сумою посилення потужності кожного МШП, показаної в рівнянні 2.3, де  $G_n$  – значення посилення потужності для  $n$ -го підсилювача.

$$G_{\text{total}} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_{n-1} \text{ dB.} \quad (2.3)$$

Показником ефективності МШП є коефіцієнт шуму (NF). Коефіцієнт шуму дає нам різницю між фактичним вихідним шумом і ідеальним підсилювачем з таким же посиленням потужності та смугою пропускання, підключеним до узгодженого навантаження при стандартній шумовій температурі (290 К). Іншим використовуваним показником є коефіцієнт шуму (F). Коефіцієнт шуму – це відношення вихідного сигналу до коефіцієнта шуму до вхідного сигналу. Коефіцієнт шуму (F) пов'язаний з коефіцієнтом шуму (NF), як показано в рівнянні 2.4.

$$\text{NF} = 10 * \log_{10}(\text{F}) \text{ dB.} \quad (2.4)$$

Для каскадованих пристроїв загальний коефіцієнт шуму визначається за формулою Фрііса, і результатом є рівняння 2.5, де  $F_n$  – коефіцієнт шуму для  $n$ -го пристрою.

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}} \quad (2.5)$$

Ключовим наслідком є те, що перший МШП в каскаді створює найбільший системний шум. Як наслідок, критично важливо, щоб перший МШП мав найменший коефіцієнт шуму, тоді як решта МШП забезпечували більшу частину посилення потужності сигналу.

### 2.1.2 Показники продуктивності радіометра

Два критерії, які використовуються для визначення ефективності роботи радіометра:

- чутливість;
- стабільність.

Ці критерії визначають найменшу зміну шумової температури (тобто потужності) сигналу, яку може виявити радіометр, і кількість вимірювань потужності дрейфу протягом тривалого періоду часу, відповідно.

Чутливість радіометра – це найменша зміна потужності, яку можна виявити. Радіометр повинен бути в змозі відрізнити шум сигналу, отриманий антеною ( $T_A$ ), і шум, створений системою ( $T_N$ ).

Два методи кількісного визначення чутливості радіометра:

- експериментальний;
- аналітичний.

Експериментально чутливість можна обчислити як стандартне відхилення вимірної потужності (припускаючи стабільний радіометр). Аналітично чутливість може бути обчислена як функція властивостей радіометра, визначених у рівнянні 2.6. Термін шумова еквівалентна дельта ( $\Delta$ ) температура ( $NE\Delta T$ ) часто використовується як взаємозамінний з чутливістю. Як видно з рівняння 2.6, чутливість покращується (тобто стає меншою) зі збільшенням смуги пропускання ( $\beta$ ) та/або часу інтеграції ( $\tau$ ) радіометра.

$$NE\Delta T = \frac{T_A + T_N}{\sqrt{\beta * \tau}} \quad (2.6)$$

Наступний приклад ілюструє вплив шуму, створеного системою, на здатність радіометрів виявляти зміни в шумі сигналу. Припустимо, що нам

потрібна чутливість 1 К. Якщо система не створює шуму (тобто  $T_N = 0$ ), а прийнятий сигнал на антену становить 200 К (тобто  $T_A = 200$ ), ми можемо розрахувати чутливість нашого приймача за допомогою рівняння 2.6. Давайте припустимо, що смуга пропускання становить 10 МГц (тобто  $\beta = 10 \times 10^6$ ), а наш час інтегрування становить 40 мілісекунд (тобто  $\tau = 0,04$ ). Тепер ми можемо взяти ці значення та помістити їх у рівняння 2.6, що призводить до рівняння 2.7.

$$NE\Delta T = \frac{200+0}{\sqrt{10 \times 10^6 * 0,04}} = 1K \quad (2.7)$$

Рівняння 2.7 дає нам результат 1 К для нашої чутливості, що відповідає нашій меті. Оскільки у нас немає ідеального радіометра (тобто  $T_N \neq 0$ ), припустимо, що шум нашої системи становить 800 К (тобто  $T_N = 800$ ). Припускаючи, що наша смуга пропускання ( $\beta$ ), наш час інтеграції ( $\tau$ ) і сигнал нашої антени ( $T_A$ ) однакові, тепер ми можемо застосувати рівняння 2.6, яке призводить до рівняння 2.8. Це призводить до чутливості 5 К, що в п'ять разів перевищує нашу ідеальну чутливість 1 К.

$$NE\Delta T = \frac{200+800}{\sqrt{10 \times 10^6 * 0,04}} = 5K \quad (2.8)$$

Як можна чітко бачити, системний шум ускладнює роботу з виявлення змін у шумі сигналу. Далі використовуються як експериментальні, так і аналітичні методи визначення чутливості для перехресної перевірки правильності нашого радіометра на основі SDR.

Стабільність радіометра – це міра того, наскільки коливання, які ми бачимо, є результатом джерела, а не змін, що відбуваються всередині радіометра. Розглянемо рівняння 2.2, яке визначає загальну потужність, яку отримує радіометр. Якщо наша смуга пропускання ( $\beta$ ), посилення потужності

(G), системний шум ( $T_N$ ) і стала Больцмана (k) постійні, то система стабільна. Якщо ми можемо припустити, що наша смуга пропускання фіксована, а шум нашої системи (середнє значення) постійний, то це залишає наше посилення потужності (G) невизначеною змінною, яка може викликати небажані коливання.

Нестабільність радіометра зумовлена коливаннями потужності підсилувача з низьким рівнем шуму (LNA). Ці коливання посилення спричинюють два фактори:

- коливання напруги живлення МШП;
- коливання фізичної температури МШП.

Вплив цих коливань посилення потужності на стабільність визначається рівнянням:

$$\Delta T_G = T_{sys} \left( \frac{\Delta G}{G} \right), \quad (2.9)$$

де  $\Delta T_G$  – шумове коливання температури;

$\Delta G$  – коливання посилення потужності МШП;

G – ідеальний коефіцієнт посилення потужності МШУ;

$T_{sys}$  – комбіноване джерело антени ( $T_A$ ) і шум системи ( $T_N$ ).

Цими коливаннями посилення потужності можна керувати шляхом ретельного моніторингу та контролю як напруги живлення, так і температури МШП. Однак це ускладнює радіометр, що в деяких випадках може бути непрактичним. Як альтернатива, модифікації базового радіометра, наведеного на рисунку 2.1, були розроблені для компенсації цих коливань. Існує три типові радіометри, призначені для обліку коливань підсилення потужності. До них відносяться: радіометри Діке, ін'єкція шуму та поляриметричні (або кореляційні).

Радіометр Діке. На рисунку 2.2 показана блок-схема радіометра Діке, який перемикається між вимірюванням вихідного сигналу ( $T_A$ ) і відомим

еталонним сигналом ( $T_R$ ). Швидко перемикаючись між джерелом і опорним сигналом на частоті  $F_s$ , радіометр Дікке може зменшити вплив коливань посилення потужності на його стабільність.

Хоча радіометр Дікке покращує стабільність, він робить це за рахунок того, що не бачить об'єкт інтересу під час вимірювання опорного сигналу. Це зменшує чутливість радіометра в 2 рази, оскільки половина часу йде на спостереження джерела сигналу. Це змінює рівняння для чутливості радіометра Дікке, як показано в рівнянні 2.10.

$$NE\Delta T = \frac{2(T_A + T_N)}{\sqrt{\beta * \tau}} \quad (2.10)$$

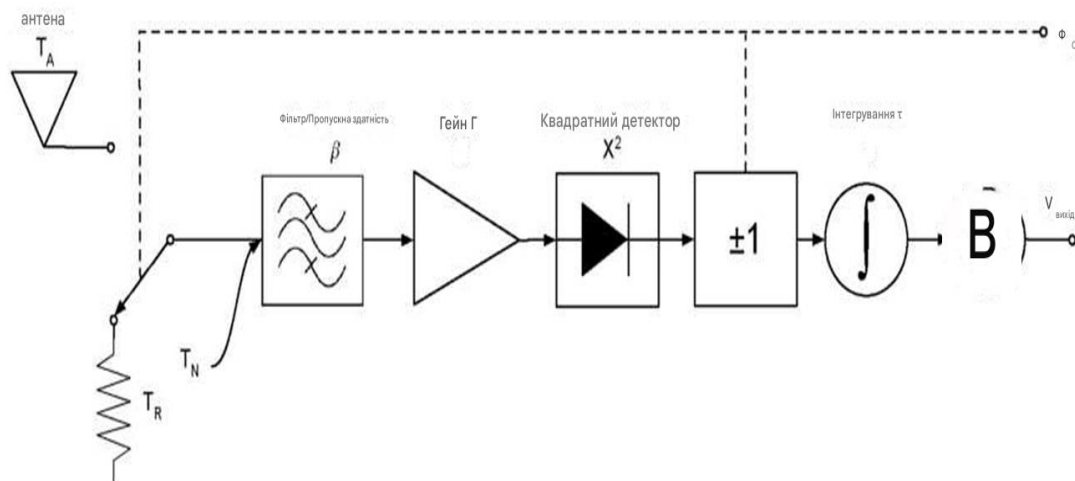


Рисунок 2.2 – Структурна схема радіометра Дікке

Радіометр інжекції шуму. Радіометр з інжекцією шуму є різновидом радіометра Дікке, де змінний шумовий сигнал ( $T_I$ ) вводиться в радіочастотний ланцюг, як показано на рисунку 2.3. Потужність введеного шумового сигналу регулюється так, що при додаванні до сигналу джерела їх сума дорівнює потужності опорного сигналу. Це покращує стабільність, усуваючи коливання посилення потужності, але збільшує системний шум

( $T_N$ ). Подібно до радіометра Дікке, згаданого раніше, чутливість зменшується в 2 рази, і чутливість виявляється подібною до рівняння 3.10, за винятком того, що наша  $T_A$  тепер дорівнює нашій відомій шумовій константі, яку ми можемо визначити як  $T_R$ .

**Поляриметричний радіометр.** Поляриметричний (або кореляційний) радіометр використовує два поляризовані сигнали, які називаються вертикально поляризованим (V-Pol) і горизонтально поляризованим (H-Pol). Для цього використовується антена з подвійною поляризацією. Кожен поляризований сигнал подається в радіометр і корелюється. Оскільки шумовий сигнал джерела має поляризацію, а флуктуації посилення потужності – ні, коливання посилення потужності можна усунути. Це зменшує коливання посилення потужності для підвищення стабільності та збереження чутливості. Чутливість корелюючого радіометра показано у рівнянні 2.11, де  $NE\Delta T_{sys}$  є  $NE\Delta T$  як вертикального, так і горизонтального приймачів радіометрів, припускаючи, що обидва приймачі ідентичні за конструкцією та функціями.

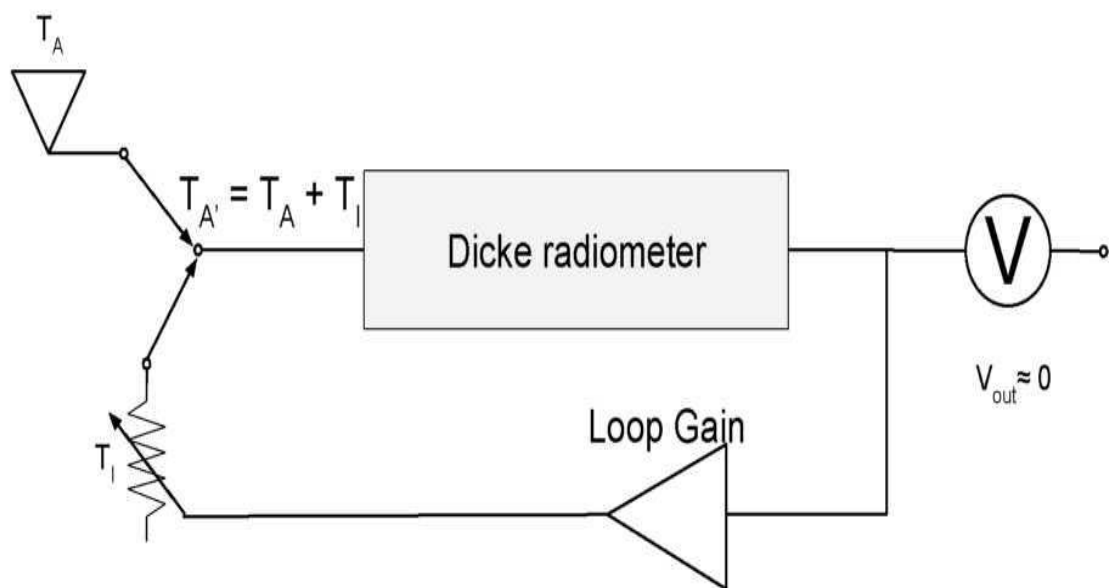


Рисунок 2.3 – Блок-схема радіометра з шумовою інжекцією

Цей тип радіометра збільшує вартість і складність радіометра, оскільки потрібні два ідентичних приймача (по одному для кожної поляризації).

$$\frac{NE\Delta T_{sys}}{\sqrt{2}} = \frac{NE\Delta T_{V-Pol}}{\sqrt{2}} = \frac{NE\Delta T_{H-Pol}}{\sqrt{2}} \quad (2.11)$$

## 2.2 Основи програмно визначеного радіо

Програмно визначене радіо (SDR) – це пристрій, який оцифровує отриманий радіочастотний сигнал якнайшвидше та обробляє цифрове представлення сигналу за допомогою комп'ютера, FPGA або спеціальної системи на кристалі (SoC). Канонічна радіоархітектура, визначена програмним забезпеченням, складається з джерела живлення, антени, аналого-цифрового перетворювача та блоку обробки для виконання функцій радіо в програмному забезпеченні. Ідеальна програмно визначена радіоблок-схема показана на рисунку 2.4.

SDR може виконувати певні апаратні функції в програмному забезпеченні (наприклад, фільтрацію), що забезпечує гнучкість апаратних рішень. Зміни можна внести, просто завантаживши нове програмне забезпечення або мікропрограму в систему. Це має економічну вигоду, оскільки певні апаратні компоненти більше не потрібні, а зміни, внесені в програмне забезпечення, не потребують апаратного забезпечення додавати, видаляти або змінювати.

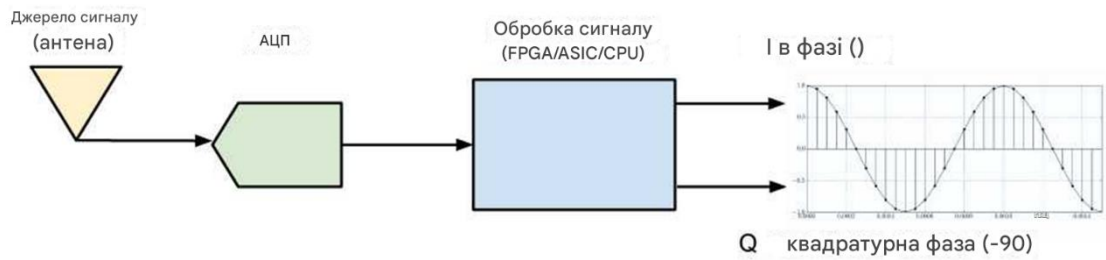


Рисунок 2.4 – Ідеальне програмне радіо

Більш реалістичне радіо, визначене програмним забезпеченням, показано на рисунку 2.5, де додано два елементи. По-перше, додається підсилення сигналу (посилення потужності), щоб забезпечити можливість виявлення сигналу. По-друге, змішувач часто використовується для понижуючого перетворення високочастотного радіосигналу джерела в нижчу частоту, щоб можна було використовувати менш дорогий аналого-цифровий перетворювач. Однак, якщо частота сигналу джерела вже знаходиться в діапазоні аналого-цифрового перетворювача, тоді змішувач можна не використовувати.

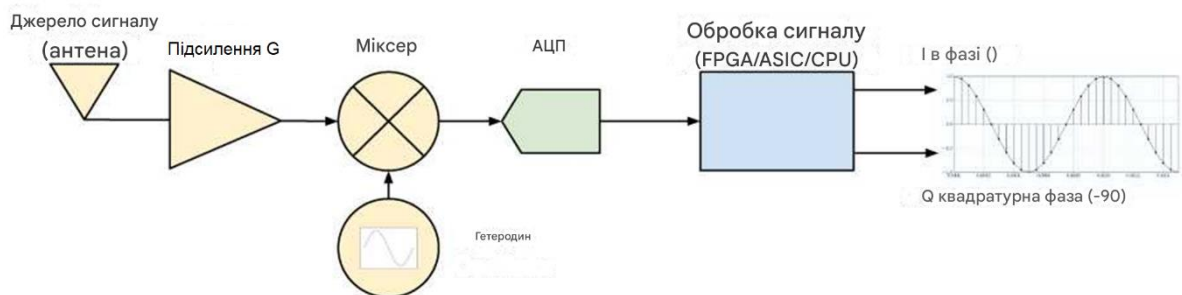


Рисунок 2.5 – Блок-схема типового програмно визначеного радіо



Програмно визначені радіостанції (SDR) можна використовувати для різноманітних додатків, але в основному вони використовуються у сфері зв'язку. Деякі приклади таких додатків включають: мобільний зв'язок, бездротові локальні мережі, персональні мережі та цифрове мовлення. Вони привабливі для додатків, де бажана можливість змінювати схему модуляції або фільтр на льоту. У цьому відношенні SDR часто перевершують традиційні апаратні радіостанції через їх здатність легко змінювати свої операції за допомогою програмного забезпечення.

Ранні SDR були дорогими через вартість високошвидкісних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) і високоякісних програмованих вентильних матриць (FPGA), які були потрібні. Останніми роками вартість СПЗ знизилася через зниження вартості цих ключових компонентів. Крім того, хоча вартість СПЗ знизилася, їх ефективність зросла. Це призвело до того, що SDR стали можливими для використання багатьма новими способами.

## **2.3 Платформа для розробки програмно визначеного радіо**

### **2.3.1 Апаратна платформа**

Апаратною платформою, обраною для цієї роботи, є HackRF, показана на рисунку 2.6. Його гнучка архітектура та здатність підтримувати широку смугу пропускання зробили HackRF ідеальною апаратною платформою для розробки програмно визначених радіометрів. HackRF має такі особливості, які зробили його бажаним для нашого конкретного застосування:

- діапазон частот: 1 МГц до 6 ГГц;
- режим: напівдуплекс трансівер;
- ширина смуги: 20 МГц;
- частота семплювання (АЦП/ЦАП): 20 MSPS;
- дискретизація: 8-bit квадратурна дискретизація (8-bit I та 8-bit Q);
- максимальна вихідна потужність: 10 дБм

64QAM transmitting EVM: 1.5%

– апаратний склад:

- а) мікшер RFFC5072: 80-4200 МГц;
- б) Wireless bandwidth RF transceiver MAX2837: 2.3-2.7 МГц;
- в) процесор LPC4330: тактова частота 204 МГц;
- г) підсилювач MGA-81563: 0.1-6 МГц, 3 В, 14дБм;

– підтримка програм SDR:

- а) GNU Radio;
- б) SDR Sharp;
- в) SDR Console;
- г) SDR SDRAngel.

Живлення: micro USB.



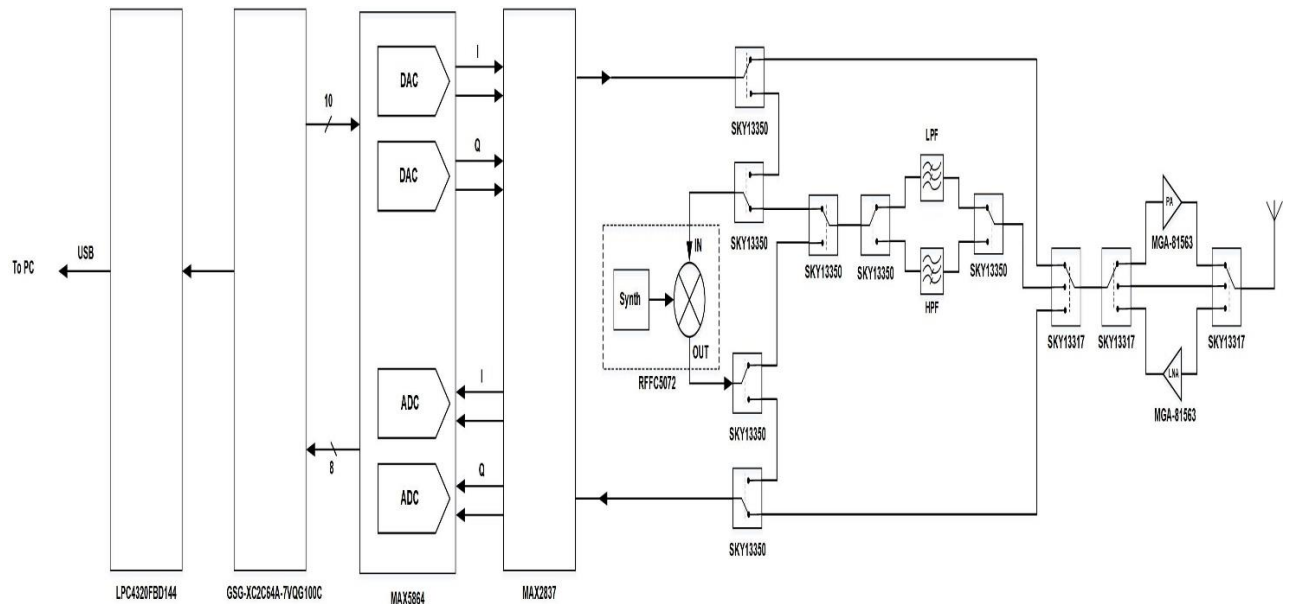
Рисунок 2.6 – HackRF

Вимоги до пропускної здатності були вирішальним фактором при виборі обладнання. Було вирішено, що бажана мінімальна смуга пропускання 20 МГц. 8-розрядний АЦП не був визначеною вимогою, але вважалося, що він забезпечує адекватний рівень роздільної здатності.

На рисунку 2.7 показана загальна архітектура HackRF SDR.

З загальнодоступного опису відомо, що HackRF One напівдуплексним трансівером, тобто. він може працювати і на передачу, і на прийом, але лише у різні моменти часу. Зі схеми це також зрозуміло – є один-єдиний вихід на антену, сигнал на яку може приходити з виходу передавального тракту або може зніматися і надходити на вхід приймального тракту.

Схема містить безліч керованих перемикачів, за допомогою яких і конфігурується шлях сигналу, що приймається або передається в кожен момент часу.



Рисунк 2.7 – Блок-схема HackRF SDR

Через USB-кабель модуль підключається до ПК. Через цей інтерфейс HackRF One отримує живлення від хоста, через нього відбувається передача всіх даних у цифровому вигляді. На стороні HackRF One маємо мікроконтролер LPC4320FBD144 з ARM Cortex-M4 ядром, стоїть CPLD XC2C64A-7VQG100C, з'єднана з мікросхемою MAX5864, яка являє собою два АЦП і два ЦАП (два –один для I, другий для Q) у єдиному корпусі. Розрядність АЦП = 8 біт, розрядність ЦАП = 10 біт. У цілому нині характеристики в цих АЦП і ЦАП досить скромні. Максимальна частота їх тактування становить 22 МГц.

MAX2837 – це інтегрований напівдуплексний РЧ трансівер, виконаний за архітектурою прямого перетворення з нульовою проміжною частотою (ПЧ або IF – Intermediate Frequency). Внутрішня архітектура мікросхеми наведена на рисунку 2.8.

У передавальному тракті ті, що прийшли на вхід I і Q компоненти baseband сигналу проходять через фільтри, що перебудовуються (позначені червоною 1) і надходять на вхід підвищуючих змішувачів (2). У результаті сигнал переноситься на частоту з діапазону 2.3 ... 2.7 ГГц і далі проходить через підсилювач з коефіцієнтом посилення, що перебудовується (3).

У результаті ми маємо:

- діапазон перебудови частоти зрізу baseband фільтрів: 1.75...28 МГц;
- діапазон регулювання коефіцієнта посилення передаючого тракту = 45 дБ;
- ~0 дБм максимальної вихідної потужності.

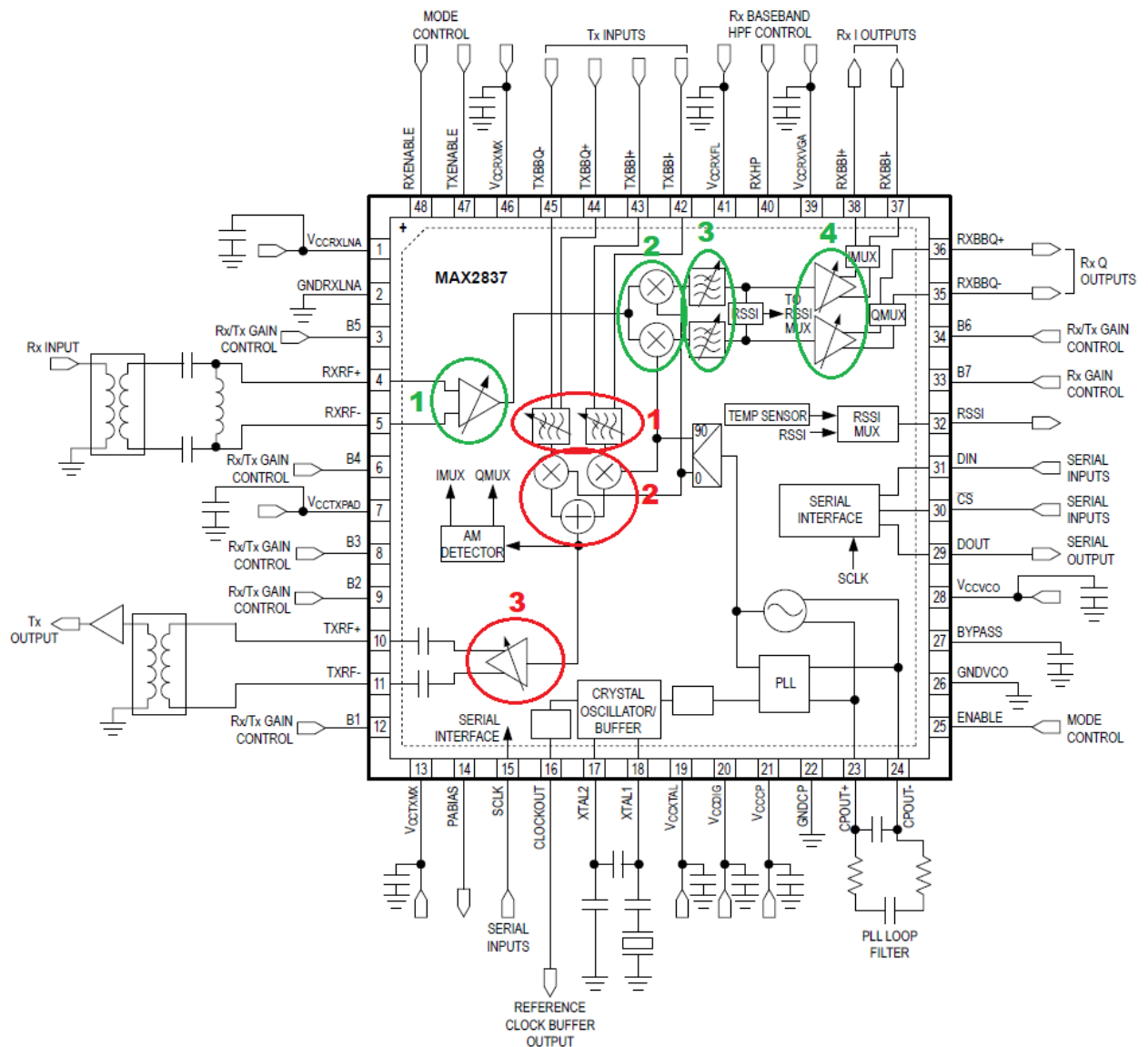


Рисунок 2.8 – Внутрішня архітектура MAX2837

Сигнал, що надійшов на вхід приймального тракту, проходить через малошумливий підсилювач (1), знижуючий квадратурний змішувач (2), фільтри з частотою зрізу (3), що перебудовується, і baseband підсилювачі з перебудовуваним посиленням (4).

MAX2837 містить на борту синтезатор частоти, що забезпечує сигнал гетеродина для змішувачів.

MAX2837 по суті, готовий RF front-end, але з істотним обмеженням – він має досить вузький частотний діапазон (2.3...2.7 ГГц). Розширити робочий частотний діапазон радіо можна додавши ще стадію перенесення частоти. А для цього необхідний радіочастотний змішувач та гетеродин. І в схемі HackRF One є мікросхема, що об'єднує ці два пристрої. Розглянемо її трохи докладніше.

Мікросхема синтезатора частоти та змішувача RFFC5072 включає генератор, керований напругою (ГКН або VCO – Voltage Control Oscillator), схему фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ або PLL – Phased Locked Loop) і радіочастотний змішувач.

Частота гетеродина (LO – Local Oscillator) може бути встановлена з діапазону 85...4200 МГц, крок перебудови 1.5 Гц.

Розглядаючи наведену вище блок-схему HackRF One можна помітити, що є кілька можливих варіантів організації шляху для сигналу, що передається до антени. Можливий варіант подачі сигналу з виходу MAX2837 до вихідного підсилювача (або антени). Або сигнал може бути спрямований спочатку в мікросхему RFFC5072, на вхід змішувача.

Результатом змішування частоти гетеродина і сигналу на проміжній частоті, як відомо, є дві копії сигналу, розташовані ліворуч і праворуч щодо частоти гетеродина (на відстані рівній ПЧ).

Оскільки не потрібні дві копії одного й того самого сигналу. Зазвичай вибирається одна з копій, а від другої (яку називають дзеркальним каналом) позбавляються шляхом фільтрації або побудовою спеціальної архітектури перетворювача частоти – без дзеркального каналу.

Змішувач, застосований у HackRF One жоден із каналів він не пригнічує. При цьому розробник HackRF One передбачив використання фільтрів у тракту передавача – фільтра верхніх частот (ФВЧ або HPF – High-Pass Filter) або фільтра нижніх частот (ФНЧ або LPF – Low-Pass Filter). Залежно від конфігурації відповідних перемикачів, сигнал з виходу

змішувача йде через один з цих фільтрів. Навіщо так зроблено? Очевидно, саме для того, щоб була можливість придушувати копію сигналу, розташовану нижче за частотою (LSB – Low Side Band), або ту, що вище (USB – Upper Side Band).

А необхідність мати таку опцію обумовлена тим, що розробник хотів забезпечити максимально можливий частотний діапазон радіомодуля. Коли передачі необхідно використовувати частоту сигналу з діапазону 2.3...2.7 ГГц – досить вихідний сигнал мікросхеми MAX2837 безпосередньо підключити до антенного виходу (чи посиливши сигнал вихідним підсилювачем потужності), минаючи змішувач і фільтри. Коли потрібно мати на виході частоту нижче 2.3 ГГц – тут MAX2837 вже ніяк не впорається, тому сигнал з нього направляється на змішувач. Як ми пам'ятаємо – на виході змішувача є дві копії корисного сигналу – підключаємо вихід змішувача до фільтра нижніх частот, пригнічуємо USB. Ну і навпаки, коли необхідна частота вище 2.7 ГГц – відбувається те саме, тільки тепер використовується фільтр верхніх частот і відфільтровується LSB (рис. 2.9).

Таким чином, ми маємо комбінований варіант архітектури радіопередавача:

- на високих частотах працює супергетеродинна схема з двома переносами частоти вгору;

- на 2.3-2.7 ГГц система може працювати у форматі передавача з прямим перетворенням (гомодина схема);

- на нижчих частотах сигнал проміжної частоти переноситься вже вниз.

Приймальний тракт влаштований аналогічним чином, тільки тепер схема працює так, щоб будь-який вхідний сигнал був перенесений в частотну область 2.3 ... 2.7 ГГц, де його обробить приймальний тракт MAX2837 – перетворює в I, Q компоненти на низькій частоті для передачі в АЦП.

Як малошумний підсилювач на вході використовується абсолютно така ж модель підсилювача, що застосований на виході передавача – MGA-81563.

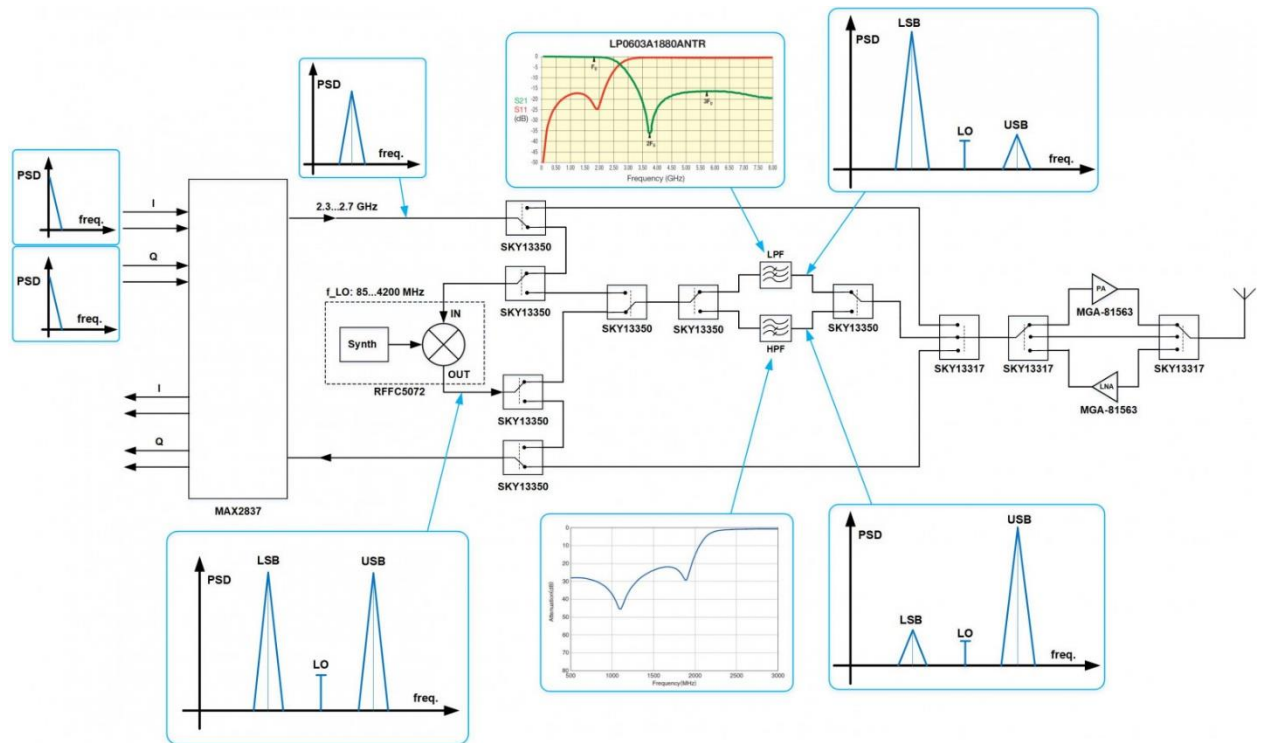


Рисунок 2.9 – Схематично показаний спектр сигналу на кожній із стадій передаючого тракту, а також АЧХ фільтрів, що застосовуються

### 2.3.2 Програмна платформа

Існує дві частини програмного забезпечення, які використовуються з програмно визначеним радіо: а) мікропрограма, яка використовується в NaskRF, і б) програмне забезпечення, що працює на головному ПК.

Прошивка забезпечує низький рівень обробки сигналу перед надсиланням до програмного забезпечення, розташованого на ПК. Він також забезпечує посилання для керування ключовими аспектами програмно



визначеного радіо, такими як посилення потужності, пропускна здатність і центральна частота. Це мікропрограмне забезпечення попередньо завантажується в HackRF компанією виробником і може бути оновлено за допомогою інструментів, наданих виробником.

Програмне забезпечення на головному ПК виконує обробку сигналів даних I/Q. GNU-Radio було обрано як це програмне забезпечення. GNUradio – це пакет програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, призначений для розробки радіододатків із програмним забезпеченням. Він забезпечує структуру GUI для створення інтерактивного середовища для користувача та добре підтримується апаратним забезпеченням HackRF.

GNURadio використовує комбінацію Python і C++, де Python обробляє інтерфейс високого рівня, а C++ використовується для впровадження драйверів і інтерфейсів низького рівня в апаратне забезпечення. Ця комбінація дозволяє створити систему, яка проста у використанні, але все ще відповідає продуктивності, необхідній для обробки великих обсягів даних.

GNURadio також має інструмент швидкого розвитку під назвою GNURadio companion (GRC). GRC – це проста у використанні графічна система для проектування та створення радіокомпонентів у програмному забезпеченні. Приклад GRC наведено на рисунку 2.10.

GNU Radio Companion надає загальні функції, такі як джерела сигналів, обробка сигналів і приймачі сигналів, у вигляді блоків, які можна вибирати та розміщувати на екрані. Після розміщення блоки можна з'єднати, як у Lab View, і таким чином можна контролювати потік даних. GNU Radio Companion також містить блоки, які дозволяють створювати інтерфейс GUI, який можна використовувати для відображення даних і керування програмно визначеним радіо.

Якщо блок не існує, його можна створити. Оскільки GNU Radio використовує Python, користувачі можуть використовувати цю потужну та гнучку мову для створення нових блоків, які можна імпортувати в GRC.

Використовуючи GNU Radio та GNU Radio Companion, програмно визначене радіо можна швидко створити з невеликим досвідом програмування. Чудова підтримка вибраного апаратного забезпечення та простота використання зробили його ідеальним інструментом розробки для створення необхідного програмного забезпечення для нашого радіометра на основі SDR.

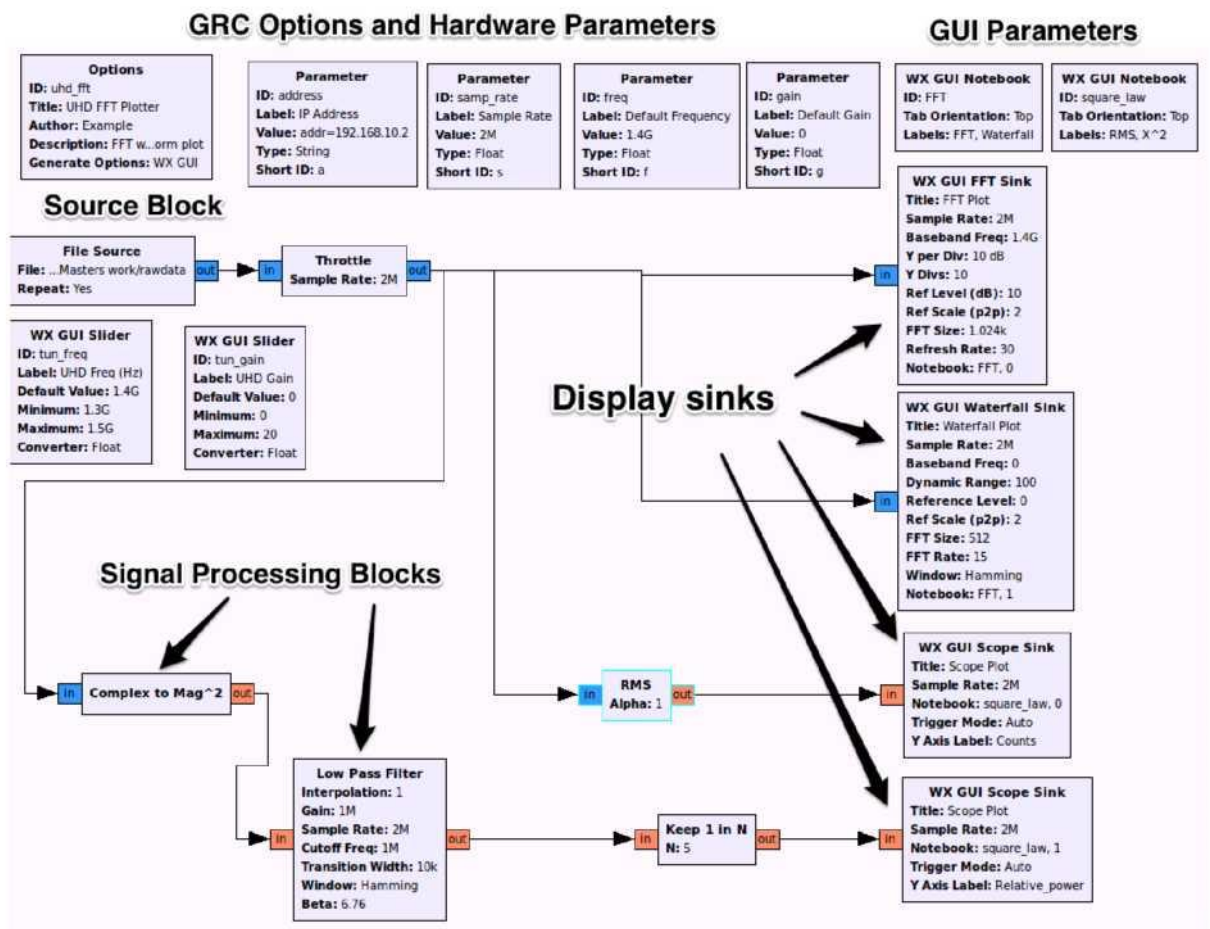


Рисунок 2.10 – Знімок екрану програми редактора GNURadio Companion

## **3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ РАДІОМЕТРА НА SDR ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ**

### **3.1 Вимоги до апаратного та програмного забезпечення**

Вимоги до обладнання. Можливості існуючих традиційних радіометрів були основною рушійною силою при встановленні вимог до нашої платформи розробки обладнання.

У таблиці 3.1 узагальнено специфікацію трьох параметрів, які було прийнято для вибору нашої платформи розробки апаратного забезпечення на основі нашого дослідження. Це призвело до вибору програмно визначеної радіоплатформи HackRF як нашої апаратної платформи.

Таблиця 3.1 – Необхідні характеристики радіометра

Параметр	Значення	Одиниці
Мінімальна пропускна здатність	20	МГц
Робоча частота	1400-1420	МГц
NEΔT (чутливість)	1	К

Вимоги до програмного забезпечення. Оскільки мета цієї роботи полягала в тому, щоб зробити радіометри більш доступними для широкої дослідницької та освітньої спільноти, вимогою до програмного забезпечення для розробки була простота використання. Крім того, призначені для користувача інтерфейси, розроблені за допомогою цих програмних засобів, повинні бути простими у використанні, забезпечуючи достатню обчислювальну ефективність для обробки сигналів, необхідних для радіометрії.

GNURadio відповідає заявленим вимогам. Він містить додатковий програмний пакет під назвою GNURadio Companion (GRC), який використовує графічний інтерфейс для створення радіосередовища.

### 3.2 Відображення традиційних функцій радіометра в програмному забезпеченні

Використання програмно визначеного радіо (SDR) для реалізації радіометра вимагає відображення компонентів традиційного радіометра на технологію на основі SDR. У цьому розділі представлено відображення трьох таких компонентів для впровадження нашого радіометра на основі SDR. Ці компоненти виконують функції:

- вимірювання потужності;
- згладжування даних;
- обмеження та фільтрація пропускну здатності.

#### 3.2.1 Вимірювання потужності

У традиційному радіометрі для вимірювання потужності використовується пристрій, який називається квадратурним детектором. Цей пристрій являє собою діод, який працює в квадратичній області. Поки діод працює в цій області, вихідна напруга ( $V_{out}$ ) пропорційна квадрату вхідної напруги ( $U_{in}$ ) і, отже, пропорційна вхідній потужності ( $P_{in}$ ), де  $n$  – константа пропорційності. Це співвідношення показано в рівнянні 3.1. На рисунку 3.1 показана проста ланцюгова схема та вхідна та вихідна напруги цієї схеми.

$$V_{out} = nV_{in}^2 = nP_{in} \quad (3.1)$$

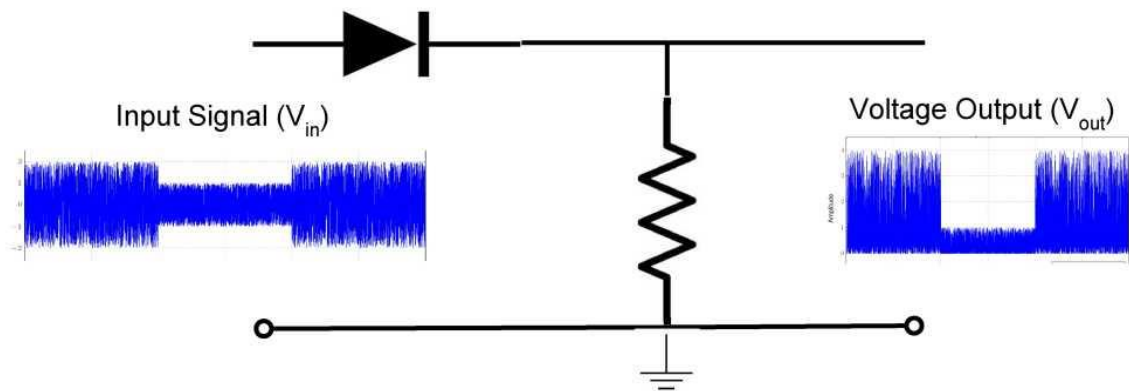


Рисунок 3.1 – Проста схема квадратурного детектора

Програмний радіометр працює так само, як і традиційний радіометр. За допомогою радіометра на основі SDR наш сигнал перетворюється на двійкові дані I (синфазні) і Q (квадратурні фази). Додавання даних I та Q дозволяє нам відтворити сигнал. Дані I та Q містять величину синфазної та квадратурної фазової інформації відповідно. У підсумку це представляє величину вихідного сигналу. Щоб визначити загальну потужність, її величину зводять у квадрат, щоб отримати вихідний сигнал, який представляє загальну потужність сигналу ( $P_{out}$ ). Рівняння 3.2 дає математичне представлення програмно визначеної радіометричної реалізації квадратичного детектора.

$$I^2 + Q^2 = P_{out} \quad (3.2)$$

На рисунку 3.2 показано блок у GNURadio Companion, який виконує функцію вимірювання загальної потужності. На рисунку 3.2 блок, позначений як A, математично виконує визначення потужності, як показано в рівнянні 3.2. Блок C скорочує дані, щоб зменшити розмір вибірки та таким чином зменшити розмір файлу даних.

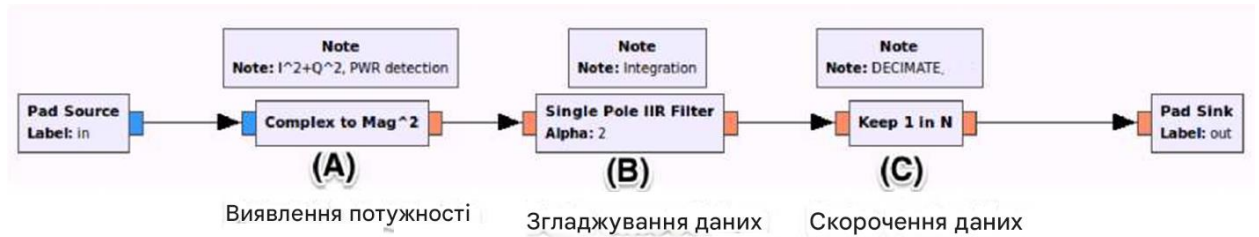


Рисунок 3.2 – Блок-схема блоку виявлення потужності, фільтра низьких частот і децимації, що використовується для вимірювання загальної потужності

Як для традиційного радіометра, так і для радіометра на основі SDR вихідна інформація про загальну потужність буде швидко коливатися. Щоб згладити цей сигнал, ми посилаємо його через фільтр низьких частот, який показаний на рисунку 3.2 як блок В.

### 3.2.2 Згладжування даних

Вихідні дані системи визначення потужності шумні, що ускладнює виявлення невеликих змін потужності (тобто перешкоджає чутливості). На рисунку 3.3 показаний приклад цього шумового виходу квадратурного детектора.

Традиційний радіометр використовує інтегратор, який еквівалентний фільтру низьких частот, для згладжування вихідного сигналу квадратурного детектора. Цей фільтр низьких частот реалізований як проста RC схема, як показано на рисунку 3.4. Цей фільтр низьких частот дозволяє нам зменшити шум, і результатом цього є рисунок 3.5.

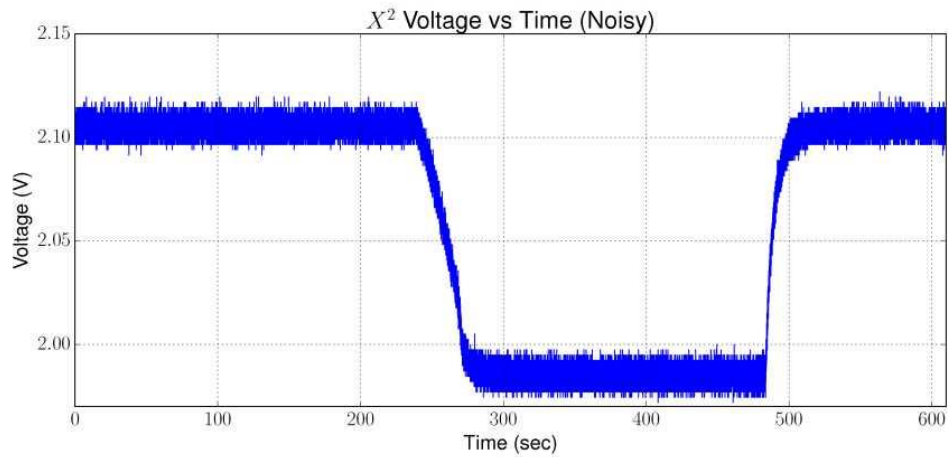


Рисунок 3.3 – Вимірювання потужності квадратурним детектором перед фільтрацією

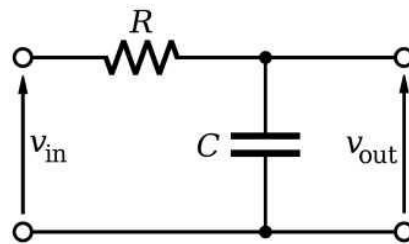


Рисунок 3.4 – Проста RC схема

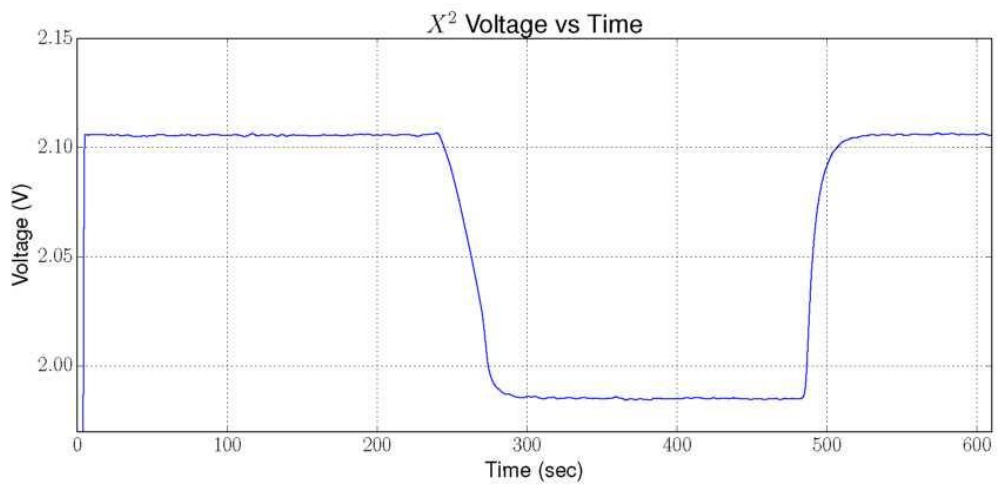


Рисунок 3.5 – Вимірювання потужності квадратурним детектором після фільтрації

Щоб зрозуміти, як працює фільтр низьких частот, ми можемо подивитися на ступінчасту реакцію цього фільтра. На рисунку 3.6 показана відповідь на верхньому лівому та правому верхньому графіку. Тепер ми можемо порівняти цей аналоговий фільтр низьких частот з нашим цифровим фільтром.

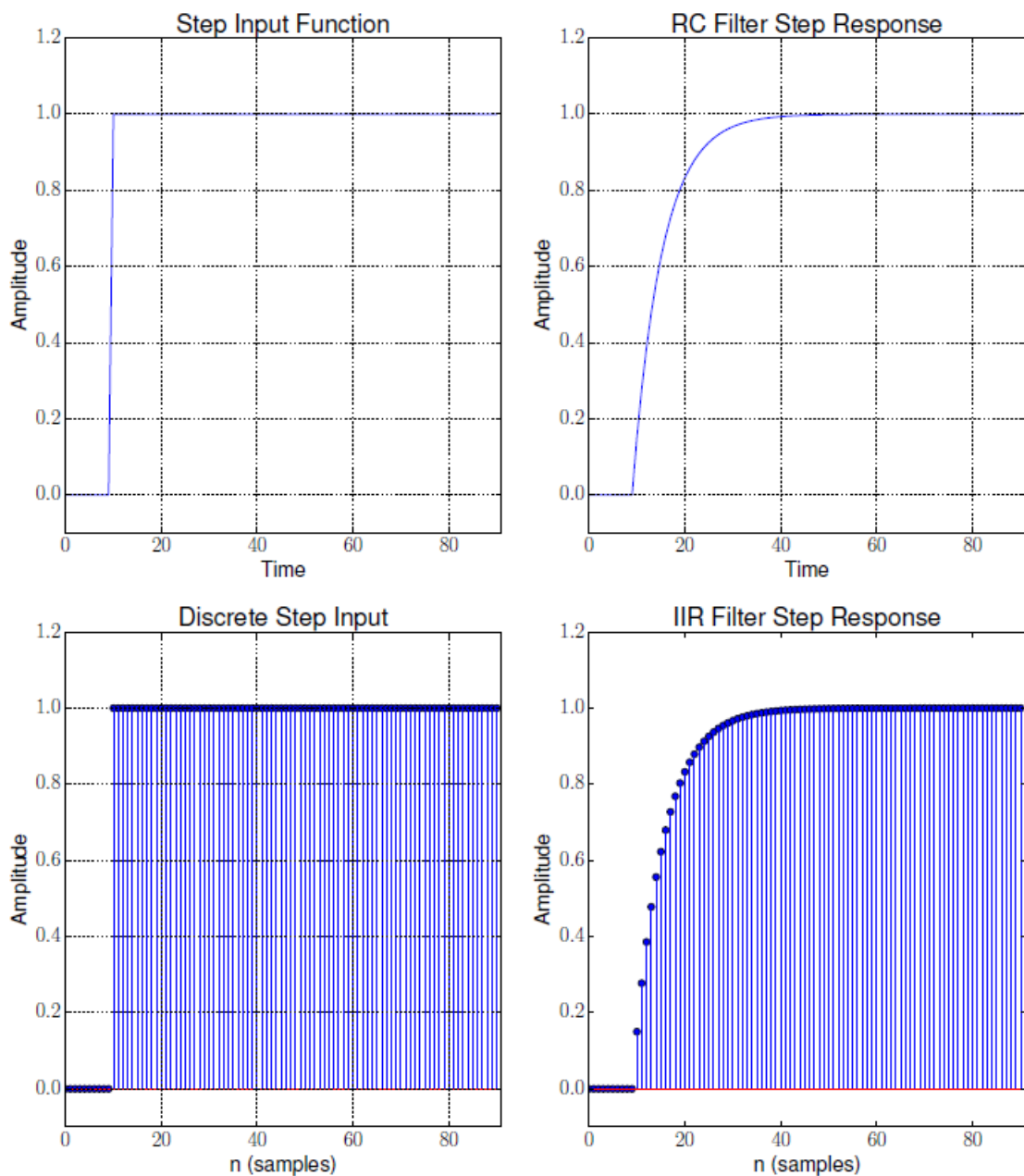


Рисунок 3.6 – Графіки, що представляють аналогову та дискретну реакцію RC-фільтра низьких частот на ступінчастий вхід



Для реалізації цього типу фільтра в нашому радіометрі на основі SDR використовується нескінченна імпульсна характеристика (ІІР), також відома як рекурсивний фільтр. ІІР-фільтри ідеально підходять для цього застосування, оскільки вони добре підходять для досягнення тривалої імпульсної характеристики без необхідності виконувати тривалу згортку. Створений ІІР -фільтр відомий як однополосний фільтр нижніх частот.

Математичний вираз, який використовується для опису цього фільтра, є рекурсивною функцією, наведеною в рівнянні 3.3. У рівнянні 3.3 наш дискретний вихід ( $y[n]$ ) визначається як вхідний сигнал ( $x[n]$ ) додається до попереднього обчисленого зразка. Тоді коефіцієнти  $a_0$  і  $b_1$  визначають відгук фільтра. Дискретний вхід і вихід цього фільтра показані в нижньому лівому та правому кутах рис. 3.6. Цей відгук обчислюється за допомогою рівняння 3.3, а коефіцієнти для фільтра низьких частот,  $a_0$  і  $b_1$ , визначаються за рівнянням 3.4 і  $0 \leq b_1 \leq 1$ .

$$y[n] = a_0 * x[n] + b_1 * y[n - 1]. \quad (3.3)$$

Коефіцієнти  $a_0$  і  $b_1$  визначаються за рівнянням 3.4 для фільтра низьких частот, де  $0 \leq b_1 \leq 1$ .

$$a_0 = 1 - b_1 \quad (3.4)$$

На рисунку 3.4 вхід –  $V_{in}$ , значення опору –  $R$ , значення ємності –  $C$ , а вихід –  $V_{out}$ . Ця схема може бути представлена рівнянням 3.5.

$$\frac{V_{in} - V_{out}}{R} = C \frac{dV_{out}}{dt} \quad (3.5)$$

Рівняння 3.5 представляє диференціальне рівняння, що зв'язує вхідну напругу  $V_{in}$  з вихідною напругою  $V_{out}$ . Ми можемо замінити вхідний сигнал

RC-ланцюга ( $V_{in}$ ) як вхідний сигнал у рівнянні 3.3,  $x_n$ . Вихід нашого RC-ланцюга ( $V_{out}$ ) також можна виразити як вихід у рівнянні 3.3, який є  $y_n$ . Однак, щоб зробити це, ми повинні перейти від безперервної області до дискретної області, в якій працює наш цифровий фільтр. Це робиться шляхом показу співвідношення між нашою частотою дискретизації  $f_s$  і нашим періодом, часом між вибірками,  $T$  і показано у рівнянні 3.6.

$$T = \text{TimeBetweenSamples} = \frac{1}{f_s} \quad (3.6)$$

Далі ми переписуємо наше диференціальне рівняння, підставляючи  $x_n$  і  $y_n$  у рівняння 3.5, що призводить до наближеного кінцево-різницевого рівняння, показаного в рівнянні 3.7.

$$\frac{x_n - y_n}{R} = C \frac{y_n - y_{n-1}}{T} \quad (3.7)$$

Тепер ми можемо розв'язати  $y_n$  алгебраїчно, і це призведе до нашого остаточного рівняння 3.8.

$$y_n = \frac{T}{T+RC} x_n + \frac{RC}{T+RC} y_{n-1} \quad (3.8)$$

Рівняння 3.8 показує IIR-фільтр, який має частотну характеристику, яка наближена до RC-ланцюга. Наближення покращується, коли  $T$  наближається до нуля.

$$a_0 = \frac{T}{T+RC} \quad (3.9)$$

$$b_1 = \frac{RC}{T+RC} \quad (3.10)$$

Щоб спроектувати фільтр, нам потрібно подивитися, якою має бути наша бажана частота зрізу. Для RC-фільтра наш опір і ємність визначають частоту зрізу ( $f_c$ ) і мають співвідношення, показане в рівнянні 3.11.

$$f_c = \frac{\sqrt{3}}{2\pi RC} \quad (3.11)$$

Враховуючи нашу бажану частоту зрізу, ми можемо визначити наше комбіноване значення RC підставляючи рівняння 3.11 алгебраїчно в рівняння 3.12.

$$RC = \frac{\sqrt{3}}{2\pi f_c} \quad (3.12)$$

Значення RC також називають постійною часу схеми, і воно нам не потрібно щоб знайти окремі значення R і C. Далі показано приклад того, як ми можемо знайти коефіцієнти нашого ІІР-фільтра за заданої частоти зрізу  $f_c$ .

Припустимо, для фільтра низьких частот ми хочемо частоту зрізу ( $f_c$ ) 1000 Гц. Враховуючи це та використовуючи рівняння 3.12, ми можемо визначити, що наша стала часу дорівнює  $2,757 \times 10^{-4}$  секунд. Якщо наша частота дискретизації становить 1 МГц, то наше значення T дорівнює  $1 \times 10^{-6}$  секунди. Якщо підставити ці значення до рівняння 3.8, отримаємо коефіцієнт  $a_0 = 0,0036$  і  $b_1 = 0,9964$ .

GNURadio включає програму, яка дозволяє нам вказати наш фільтр, і вона генерує необхідні коефіцієнти та крани.

### 3.2.3 Обмеження та фільтрація пропускної здатності

Обмеження пропускної здатності. Обмеження смуги пропускання – це процес визначення діапазону частот, у якому радіометр вимірює потужність.

Для традиційного радіометра це зазвичай досягається за допомогою аналогових фільтрів. У радіометрі на основі SDR смуга пропускання контролюється частотою дискретизації аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Однак у HackRF SDR, який використовується в цій роботі, тактова частота АЦП зафіксована на 100 МГц. Таким чином, FPGA скорочує дані, щоб зменшити пропускну здатність від АЦП, але лише на цілі значення дільника.

Фільтрування. Бувають випадки, коли спостережувана частота потребує додаткового фільтрування (тобто пом'якшення RFI). Традиційні радіометри розгортають аналогові смугові або смугові фільтри, щоб досягти цього, тоді як у нас в роботі подібні функціональні можливості планується отримати шляхом реалізації програмно визначених фільтрів.

### **3.3 Програмно визначений графічний інтерфейс радіометра**

Традиційний радіометр буде розроблений із фіксованими параметрами, такими як смуга пропускання та час інтеграції. Хоча зміни можна внести, це вимагає змін фізичного обладнання радіометра. Радіометр на основі SDR дозволяє керувати кількома основними функціями. Ці зміни можна вносити під час роботи радіометра, оскільки ці операції відбуваються в цифровій області та визначаються програмним забезпеченням. Параметри, що контролюються програмним забезпеченням радіометра на основі SDR через інтерфейс GUI:

- центральна частота;
- смуга пропускання ( $\beta$ );
- час інтеграції ( $\tau$ );
- посилення потужності.

Графічний інтерфейс для радіометра на основі SDR був розроблений, знаючи, що такі параметри, як частота, смуга пропускання та час інтеграції,

можуть бути змінені. Оскільки ці елементи керування впливають як на продуктивність радіометра, так і на частотний діапазон, у якому радіометр працює, було важливо, щоб ці елементи керування були чітко позначені. На рисунку 3.7 показано скріншот GUI.

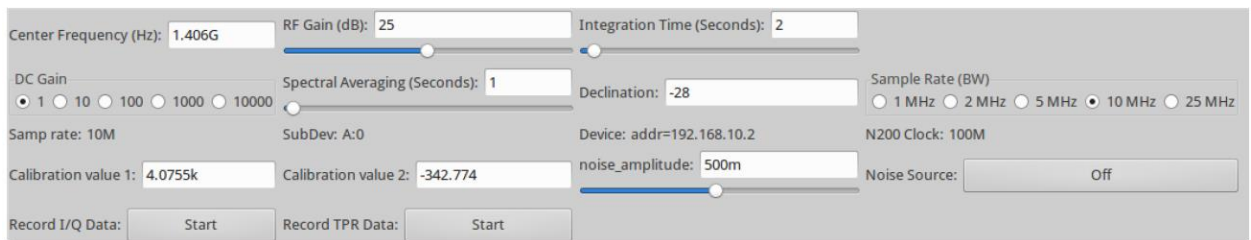


Рисунок 3.7 – Знімок екрана інтерфейсу, створеного для зв'язку та керування SDR

Смуга пропускання,  $\beta$ , і наш час інтегрування  $T$ , впливають на нашу чутливість або NE $\Delta$ T радіометра, як визначено в рівнянні 2.6. Пропускную здатність можна змінити шляхом зміни частоти дискретизації SDR. Частота дискретизації ефективно контролює смугу пропускання, в якій працює SDR. Це також дає нам реалізацію смугового фільтру, оскільки SDR не реагує на частоти за межами цієї смуги пропускання. Параметр часу інтеграції встановлюється користувачем через графічний інтерфейс і дозволяє нам змінювати час інтеграції в секундах. Це безпосередньо керує постійною часу для IIR-фільтру, який використовується для згладжування даних.

Радіометр на основі SDR використовує підсилювачі з низьким рівнем шуму (LNA) для збільшення посилення потужності системи. Апаратне забезпечення DBSRX2, також має програмований підсилювач (PGA), яким керує програмне забезпечення. Це дозволяє додавати або прибирати додаткове посилення потужності за потреби.

Інформація з програмно визначеного радіо може відображатися через GNURadio, щоб показати відповідну інформацію користувачеві. Наразі

радіометр на основі SDR може відображати інформацію про спектр і інформацію про загальну потужність. Інформація про спектр використовується для перевірки чистоти сигналу та відсутності перешкод. В інформації про загальну потужність відображається як некалібровані значення, так і калібровані значення, припускаючи, що були надані правильні параметри калібрування. Це включає відображення у вигляді графіка «тикерної стрічки» та гістограми. На рисунку 3.8 показано скріншот загальної потужності.

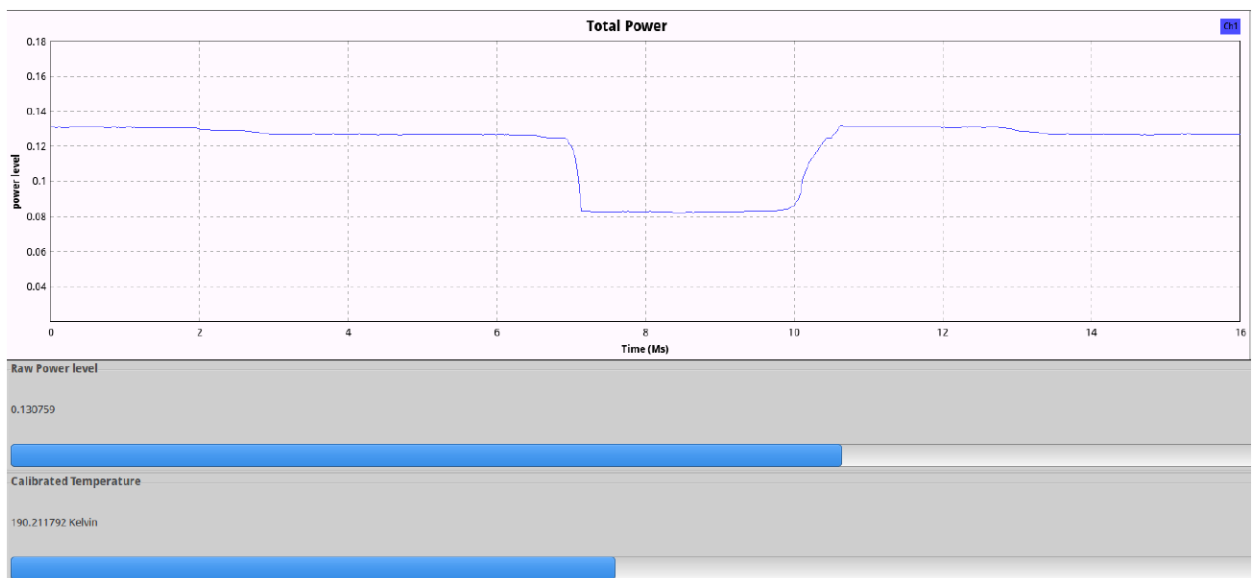


Рисунок 3.8 – Знімок екрана, на якому показано відображення поточної стрічки для показників загальної потужності

Крім того, нижче показана необроблена та відкалібрована шумова температура.

## **4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРЕМЕНТІВ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

### **4.1 Установка оцінювання та постановка експерименту**

Під час виконання роботи було проведено експерименти, які використовуються для демонстрації та перевірки того, що базовий радіометр із програмним забезпеченням (SDR) може працювати нарівні з традиційним радіометром. Експерименти розроблені, щоб продемонструвати, що радіометр на основі SDR може забезпечувати функціональні можливості, яких зазвичай немає в традиційних радіометрах.

Зроблено чотири експерименти. Перший експеримент перевіряє радіометр на основі SDR шляхом порівняння його роботи з квадратурним детектором, пристроєм, який зазвичай використовується в традиційному радіометрі. Другий експеримент оцінює чутливість і стабільність радіометра на основі SDR. Третій експеримент оцінює здатність радіометра на основі SDR пом'якшувати сигнал перешкод порівняно з поведінкою традиційного радіометра за наявності сигналу перешкод. Метою четвертого експерименту є подальше вивчення впливу нашого підходу до визначення частоти для пом'якшення радіочастотних перешкод (RFI) на чутливість радіометра.

#### **4.1.1 Перевірка та калібрування програмно визначеного радіометра**

Цей експеримент призначений для перевірки того, що радіометр на основі SDR функціонує належним чином. Його поведінка порівнюється з аналоговим квадратурним детектором, який зазвичай використовується в традиційних радіометрах.

Для перевірки результатів інформації про те, що програмно визначене радіо отримує, використовується квадратурний детектор для вимірювання потужності вхідного сигналу паралельно з радіометром на основі SDR. Цей сигнал розділяється за допомогою дільника потужності, щоб інформація була однаковою для обох пристроїв. Цей дільник потужності в ідеалі розділив би сигнал так, щоб результуючий сигнал був на 3 дБ нижчим, плюс внесені втрати, і був рівним між обома портами. Розгалужувач, використаний у цій дипломній роботі, було протестовано та підтверджено, що він розділяє сигнал із невеликою різницею між портом один і портом два. За оцінками, ця різниця становила 0,1 дБ, що знаходиться в межах 0,3 дБ, визначених для цього розподільника потужності. Це дозволяє нам перевірити програмно визначене радіо за допомогою перевіреної системи.

На рисунку 4.1 зображено структурну схему експериментальної установки. Узгоджене навантаження використовується для імітації сигналу джерела. Цей узгоджений вантаж потім занурюють у температурні ванни. У цих ваннах використовується рідкий азот (LN<sub>2</sub>), який, як відомо, кипить при 77 Кельвінів, і ванна з крижаною водою, яка, як відомо, має температуру 273,15 Кельвінів. Температуру в цих ваннах контролювали за допомогою термометра з точністю  $\pm 1$  градус Цельсія. Вантаж занурювали в кожен ванну мінімум на 2 хвилини, щоб вона досягла тієї ж температури, що й ванна. Тоді фізична температура цього узгодженого навантаження є шумовою температурою, яку бачить радіометр, і її можна використовувати для калібрування радіометра.

Передній кінець радіочастотного радіометра забезпечує підсилення, необхідне для наших експериментів. На рисунку 4.2 показано зображення переднього кінця РЧ із позначеними МШУ та смуговими фільтрами. Після посилення сигналу ми розподіляємо сигнал між квадратичним детектором (ADL5902) і програмно визначеним радіо (HackRF). Потім HackRF



підключається до персонального комп'ютера, на якому працює XUbuntu Linux і GNURadio.

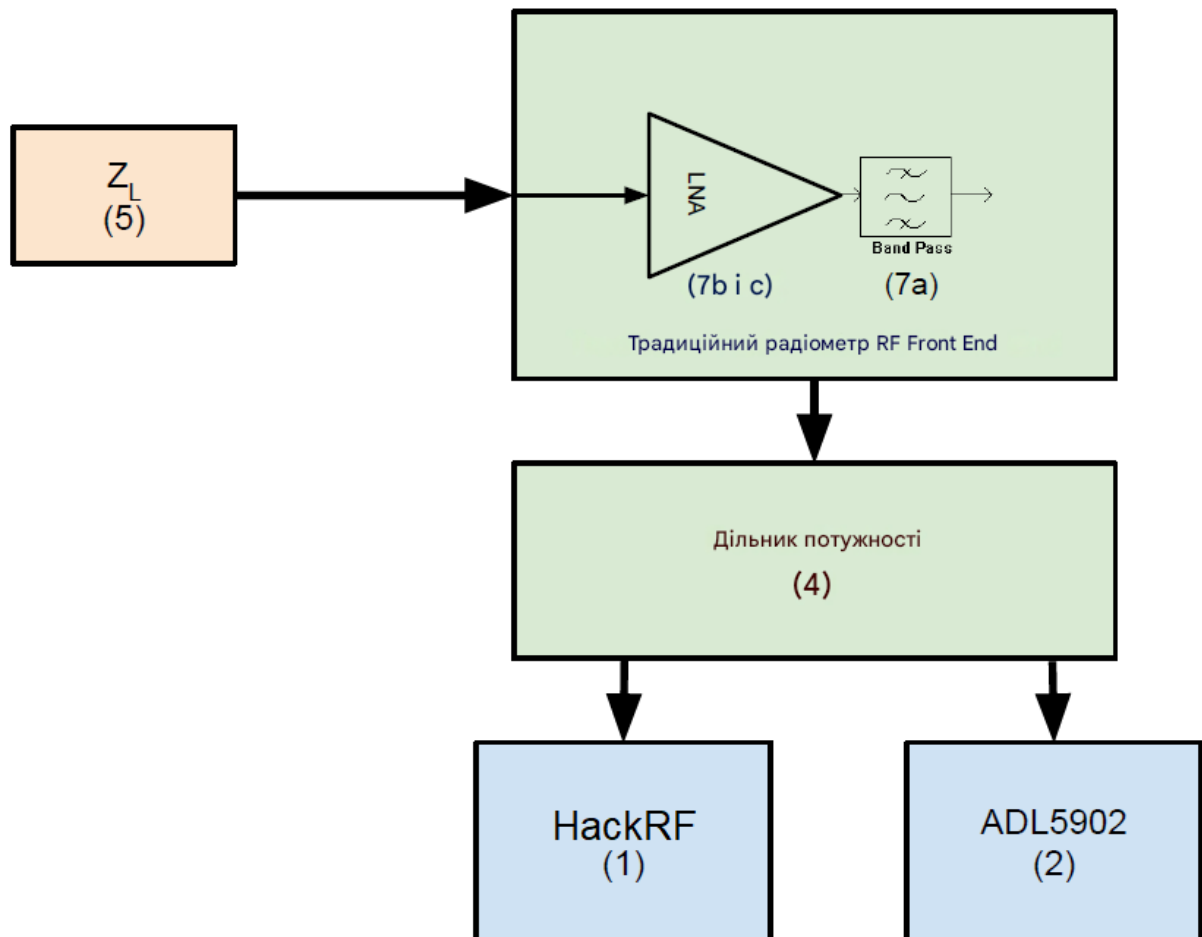


Рисунок 4.1 – Блок-схема установки експерименту 1

Було використано наступне апаратне забезпечення, яке також було позначене на рисунку 4.1:

- HackRF (1);
- квадратурний детектор ADL5902 (2);
- подільник потужності ZN2PD-20-S+ (4);
- узгоджене навантаження 50 Ом ( $Z_L$ ) (5);
- радіометр RF Front End:

- а) 4 x інтегровані мікрохвильові смугові фільтри (1400-1425 МГц) (а);
- б) 2 x Miteq AMF-3F-01400147-30-10P LNA (б);
- в) 1 x Miteq AMF-2F-01400147-04-10P LNA (с).

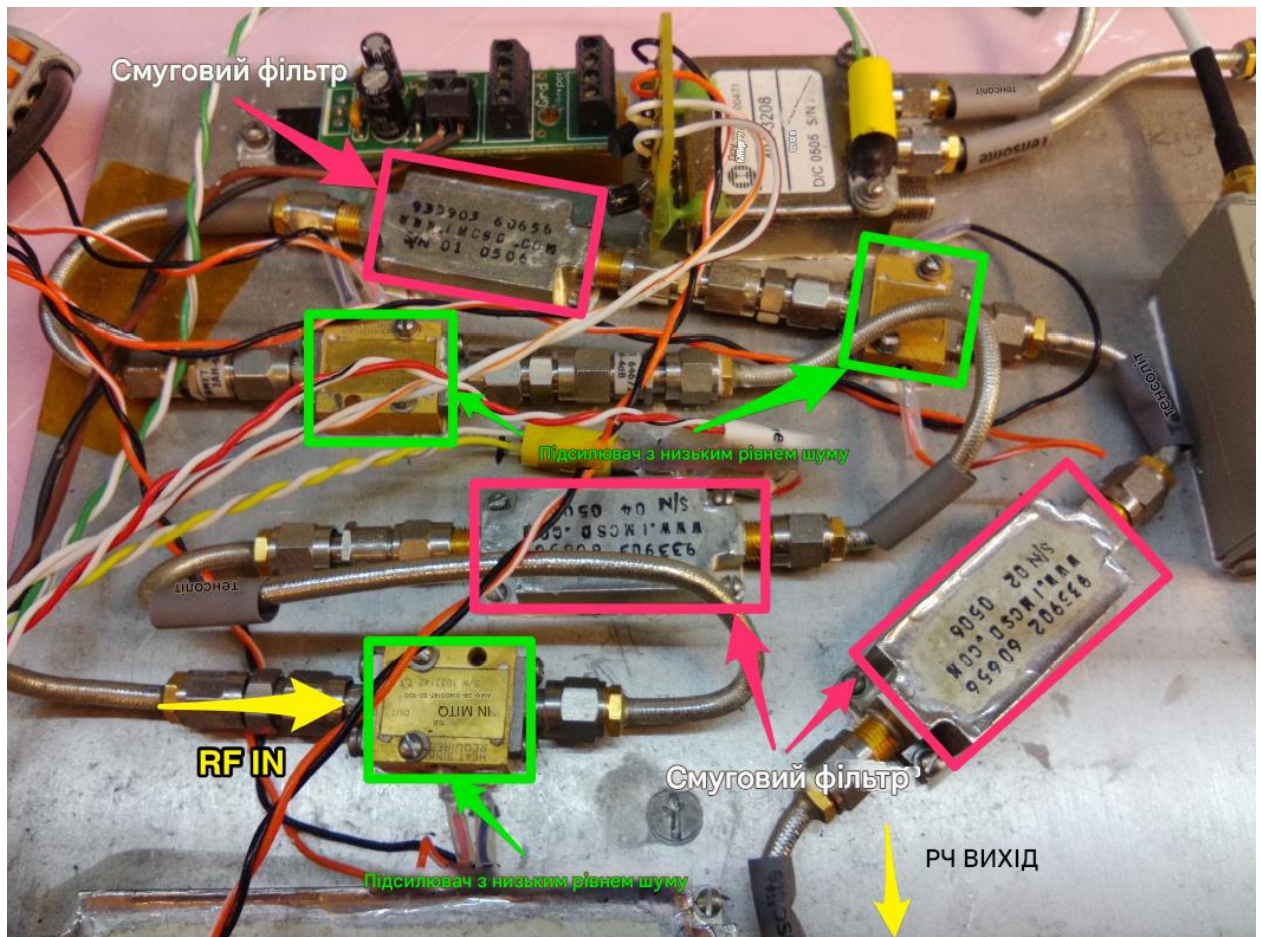


Рисунок 4.2 – Передній кінець радіочастотного радіометра з МШП та смуговими фільтрами, що використовуються в експериментах

Дані генеруються з програмно визначеного радіо за допомогою GNURadio. Дані зберігаються на локальному комп'ютері, на якому запущено відповідне програмне забезпечення.

Програмно визначений радіометр налаштований на смугу пропускання 10 МГц і час інтеграції дві секунди. Він зосереджений на частоті 1,406 ГГц, що дозволяє йому працювати в межах механічних смугових фільтрів.

Дані з програмно визначеного радіо зберігаються у файлах, згенерованих GNURadio. GNURadio використовує блок приймача для виведення даних на екран, з'єднання через сокет, наприклад TCP/IP, або у файл. Як показано на рисунку 4.3, блок прийому файлів використовується для виведення даних у файл. Потік даних до цього приймача контролюється блоком клапанів. Це дозволяє користувачеві вмикати та вимикати запис даних.

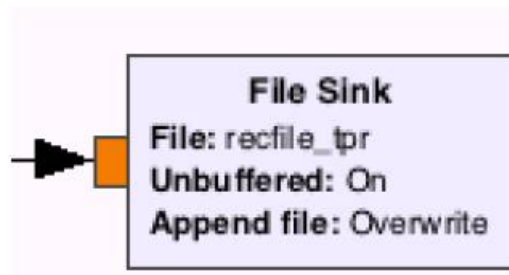


Рисунок 4.3 – Блок File Sink, який використовується в GNURadio

Існує два типи файлів, які створює SDR. Перший тип файлу – це точки даних I (синфаза) і Q (квадратурна фаза). Цей файл зберігається в little-indian форматі як комплексні значення. Через частоту дискретизації нерідко цей файл стає досить великим, зазвичай кілька гігабайт даних протягом 10-15 хвилин. Однак цей файл можна потім передати через GNURadio пізніше для відтворення, якщо це необхідно, і він містить інформацію, необхідну для повного відтворення сигналу.

Другий тип файлу – це значення загальної потужності, згенеровані з блоку загальної потужності в GNURadio. Діаграма цього блоку наведено в Додатку А (рис. А.1), а його вихідний код наведено нижче у тому ж Додатку А. У цьому файлі також використовується формат маленького порядку

байтів, однак цей файл містить лише реальні значення. Цей файл також набагато менший за файл, який містить точки даних I та Q, через децимацію даних. Типовий розмір файлу становить 50–100 Кб для виконання від 10 до 15 хвилин.

Використовуваний квадратурний детектор (ADL5902) видає інформацію про загальну потужність як аналогову напругу, яка лінійно пропорційна виміряній РЧ-потужності. Analog Devices ADL5902 – це одна мікросхема, яка містить квадратурний детектор і необхідне підсилення для вихідного сигналу, показана на рисунку 4.4. Цей пристрій працює в діапазоні від 50 МГц до 9 ГГц і може виявляти потужність до -60 дБм. Вихідна напруга за квадратичним законом посилюється в діапазоні від нуля до п'яти вольт із каліброваним вихідним сигналом 53,7 мВ/дБ.



Рисунок 4.4 – Квадратурний детектор на ADL5902

Тестування було проведено на квадратурному детекторі, щоб перевірити лінійність і правильну роботу квадратурного детектора. Цей тест передбачав надсилання відомого сигналу в детектор квадратичного закону та

зміну амплітуди через задані інтервали. Потім це було побудовано на графіку, який показано на рисунку 4.5. Цей графік показує, що коли ми лінійно змінювали вхідну потужність, вихід, виміряний квадратурним детектором, також змінювався лінійно.

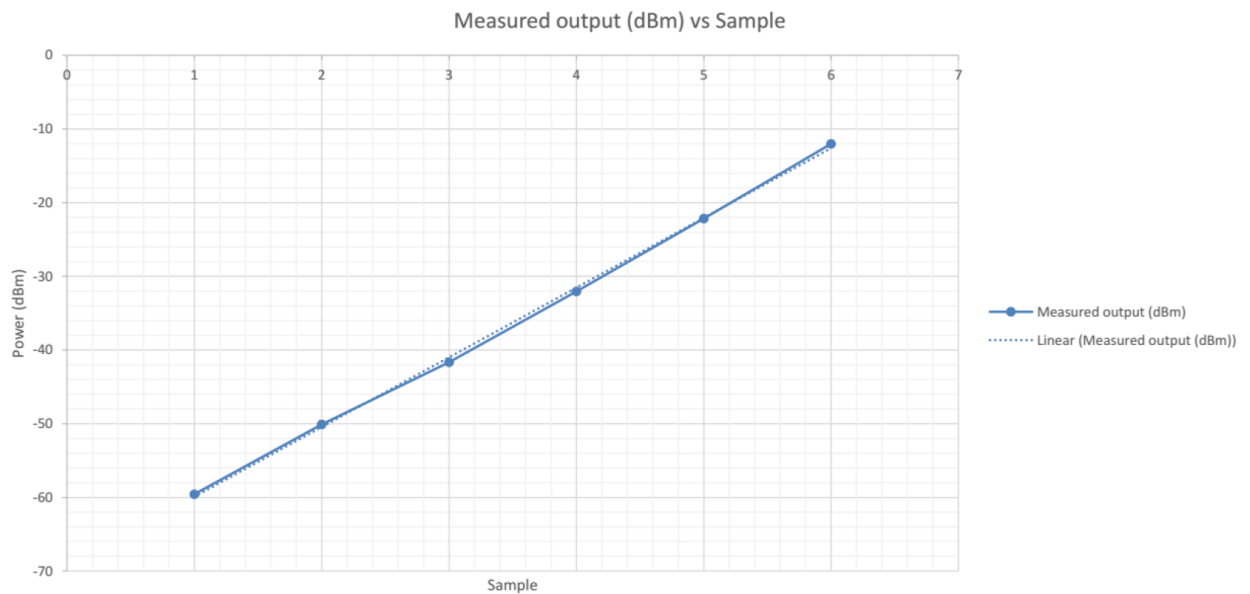


Рисунок 4.5 – Графік вихідної потужності квадратурного детектора

Для захоплення вихідної напруги з ADL5902 використовується блок збору даних (DAQ). Блок збору даних USB Analog-to-digital Converter Data Acquisition Module 10-bit ADC Module 4 Channels 0-10V Precision 10mv був обраний, оскільки він відповідав вимогам щодо легкості у використанні, але достатньо високої роздільної здатності для отримання точної інформації. Пристрій USB-6009 має 4 аналогових входів, які можуть дискретизувати зі швидкістю 9 KSPS з роздільною здатністю 10 біт (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Використаний модуль збору даних (DAQ)

Для використання DAQ була створена досить проста програма у LabView для отримання, відображення та зберігання даних з ADL5902. Ця програма отримувала інформацію з DAQ і зберігала дані як у двійковому форматі Labview, так і в більш зручному для людини форматі ASCII. Програма графічного інтерфейсу користувача, показана на рисунку 4.7, використовується для керування та відображення даних. Це спростило отримання даних і використання пристрою.

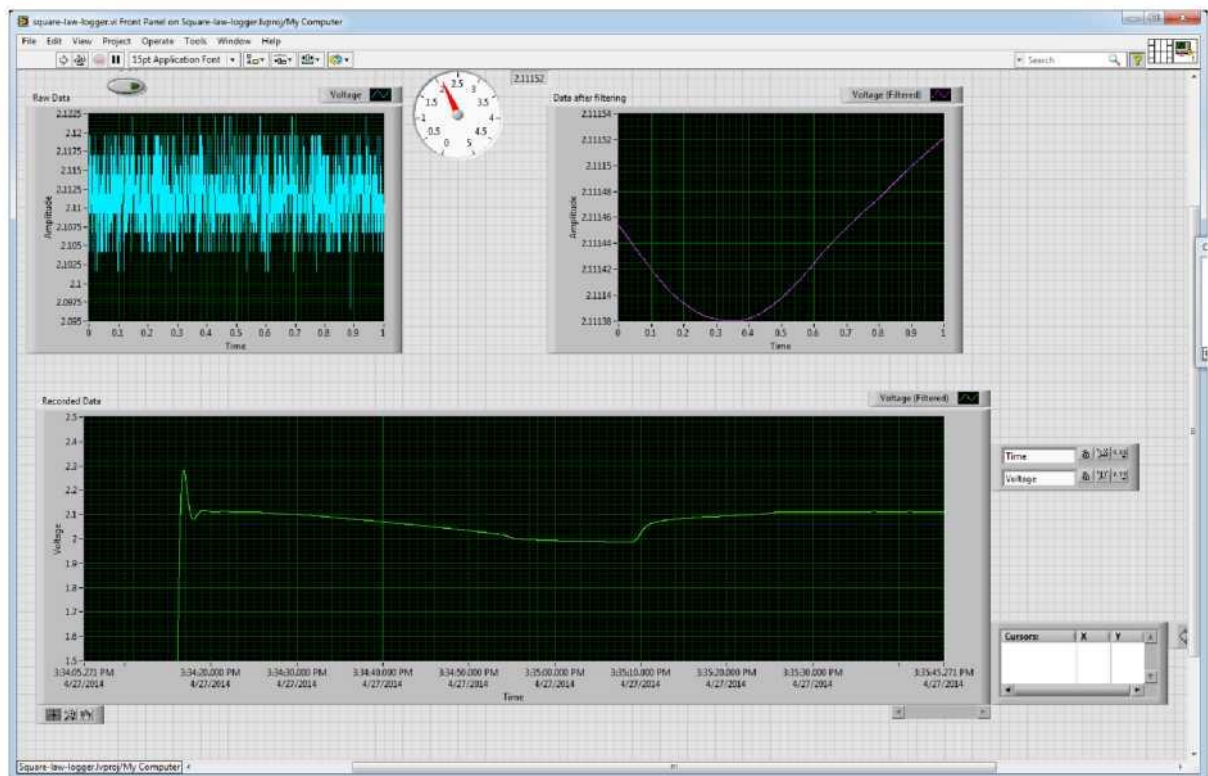


Рисунок 4.7 – Знімок екрана графічного інтерфейсу Labview

Labview містить блоки, які дозволяють легко записувати дані у файл і використовувати фільтр низьких частот. Використовуваний фільтр потім налаштовується на частоту зрізу, яка еквівалентна часу інтеграції 2 секунди, щоб відповідати програмно визначеному радіо. Ці блоки становили більшу частину програми, що призвело до швидкого створення програми.

#### 4.1.2 Оцінка чутливості та стабільності

У цьому експерименті було оцінено чутливість і стабільність радіометра на основі SDR. Оцінювання проводилась як експериментально, так і статично.

Експериментальна установка, використана для другого експерименту, така сама, як описано в розділі 4.1.1. Триваліший час витримки використовується для перевірки стабільності радіометра.

Дані, зібрані для цього експерименту, були вимірюваннями загальної потужності, зробленими за допомогою радіометра на основі SDR.

### 4.1.3 Зменшення сигналу перешкод

У цьому експерименті ми генеруємо заважаючий сигнал, а потім пом'якшуємо його за допомогою програмного фільтра. Квадратний детектор підключається паралельно для вимірювання того самого сигналу, але не має механізму пом'якшення. Потім ми порівнюємо два сигнали, щоб переконатися, що радіометр на основі SDR може пом'якшити сигнал перешкод, продовжуючи робити корисні вимірювання загальної потужності.

Цей експеримент був розроблений, щоб визначити, чи може радіометр на основі SDR впоратися з сигналом перешкод. Цей тест вводить відомий сигнал на частоті 1,406 ГГц, щоб заважати нормальній роботі радіометра. Амплітуда цього сигналу потім збільшується та зменшується в різні моменти часу протягом тесту. Це було зроблено, щоб відобразити можливий реальний сценарій і полегшити ідентифікацію сигналу перешкод за допомогою квадратичного детектора, який вимірює лише потужність.

Щоб пом'якшити шкідливий сигнал, був розроблений фільтр для видалення шкідливого сигналу. Для розробки фільтра використовувалась програма, яка є частиною програмного пакету GNURadio і називається інструментом GNU Radio Filter Design. На рисунку 4.8 показано знімок екрана цього інструменту під час проектування смугового фільтра для цієї програми.

Цей інструмент генерує значення фільтра (також звані крани), які GNURadio використовуватиме для визначення фільтра. Програма графічного інтерфейсу користувача, показана на рисунку 4.8, дозволяє нам інтерактивно створювати фільтр. Оскільки цей інструмент є частиною пакета GNURadio, він також містить інтерфейс командного рядка програми. Це дозволяє нам



викликати програму з GNURadio для інтеграції цієї функції в наш радіометр на основі SDR.

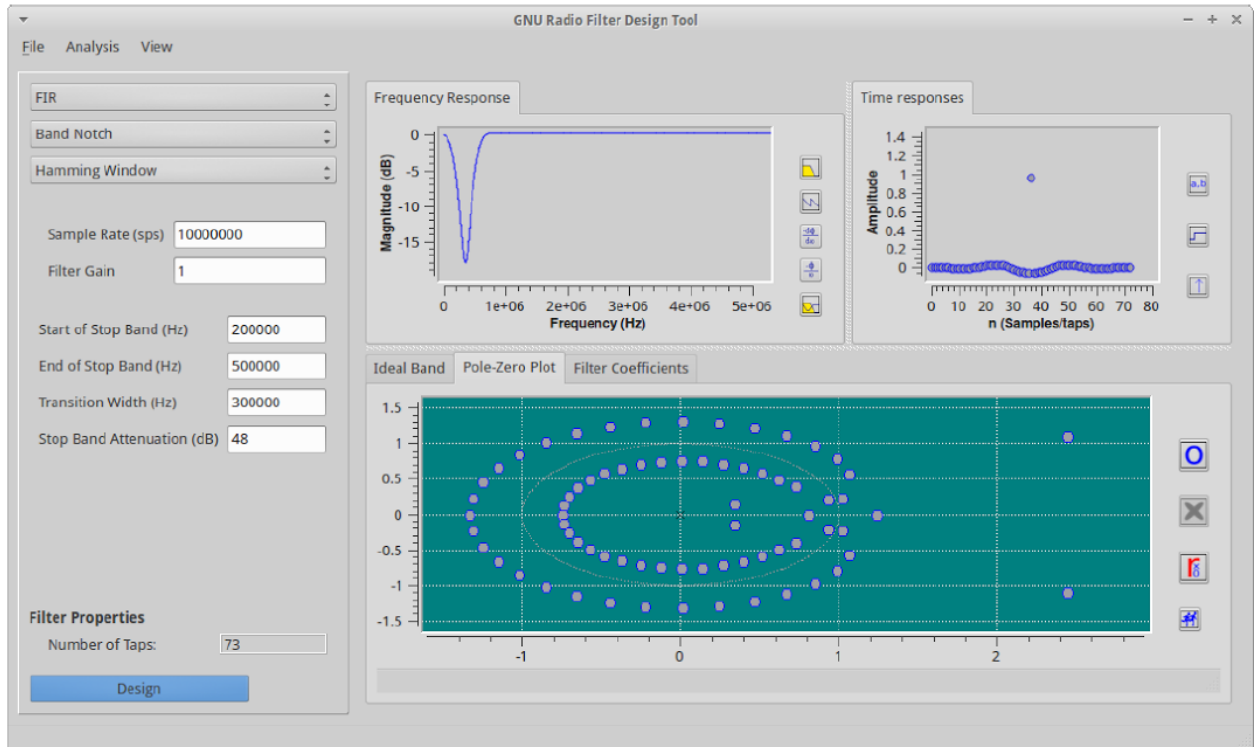


Рисунок 4.8 – Зображення інструменту GNU Radio Filter Design

Налаштування для цього експерименту подібні до схеми налаштування в минулих експериментах. Крім того, було додано друге SDR для введення шкідливого сигналу в ланцюг радіочастотного сигналу. Це SDR було налаштовано працювати як генератор сигналу для створення сигналу `ieve`.

Сигнал, який генерує другий HackRF, є синусоїдальним сигналом із центром на 1,406 ГГц. Потім відповідно регулювалася амплітуда цього синусоїдального сигналу.

Другий HackRF генерує синусоїдальну хвилю на фіксованій частоті 1,406 ГГц. У цьому експерименті амплітуда сигналу змінюється в різний час протягом експерименту. Оскільки сигнал від цього пристрою відносно

великий, між HackRF і першим МШП вставляється ослаблення на 26 дБ, щоб уникнути надмірної потужності МШП.

Амплітуда контролюється за допомогою програми під назвою `osmoscom_siggen`. `Osmocom` спочатку був розроблений для зв'язку з обладнанням `OsmocomSDR`. Однак його було розширено, щоб включити апаратне забезпечення Hack RF. Програма `osmoscom_siggen` надає графічний інтерфейс для встановлення частоти, амплітуди та типу генерованого сигналу.

Дані, зібрані для цього експерименту, включають як вимірювання загальної потужності радіометром на основі SDR, так і квадратичні дані.

#### **4.1.4 Вплив пом'якшення сигналу перешкод на продуктивність**

У цьому експерименті ми перевіряємо вплив фільтрації сигналу перешкод на чутливість радіометра на основі SDR і як зменшення загальної смуги пропускання впливає на загальну потужність, яку отримує радіометр.

Дані, зібрані для цього експерименту, являють собою вимірювання загальної потужності, отримані від програмно визначеного радіо. Метод збору даних ідентичний методу, використаному в розділі 4.1.2.

## **4.2 Аналіз отриманих результатів**

### **4.2.1 Результати перевірки та калібрування радіометра на основі програмного забезпечення**

Як описано в розділі 4.1, цей експеримент перевіряє роботу програмно визначеного радіометра. Це робиться шляхом проведення експериментів, подібних до методів перевірки та калібрування, які використовуються для традиційного радіометра. Ми порівнюємо наші результати з результатами квадратурного детектора, який отримує той самий сигнал.

Для цього експерименту вимірювання загальної потужності були зібрані за допомогою програмного радіометра та квадратурного детектора. Потім ці дані калібруються за відомою фізичною температурою відповідного навантаження.

Для аналізу результатів використовується Python Notebook для читання наших даних і створення графіків, які використовуються в цій дипломній роботі. Цей інструмент використовує Python разом із кодом HTML і Markdown для створення віртуального блокнота для кожного експерименту.

Програмно визначені радіодані. SDR записує вимірювання загальної потужності у двійковий файл, який може читати Matlab або Python. Ми починаємо з перегляду сирих або некаліброваних показників загальної потужності. Ця інформація про потужність є інформацією, зібраною після радіоблоку загальної потужності в GNU Radio. Оскільки значення є некаліброваними показаннями загальної потужності, одиниць немає.

Оскільки ми знаємо температуру середовища, ми можемо відкалібрувати ці показники відповідно до шумової температури. Це робиться шляхом читання файлу калібрування, який ми зберегли у форматі csv, і визначення нахилу лінії. Це було зроблено за допомогою наступного коду, написаного мовою Python.

```
a=numpy.array([[rQ_val[0], 1.0] , [rQ_val[1] , 1.0]] , numpy.float32)
b=numpy.array([temp_values[0] , temp_values[1]])
z=numpy.linalg.solve(a,b)
```

Коли ми переглянули програмно визначені радіодані, ми можемо вивчити квадратичні дані детектора, а потім порівняти їх. Квадратурний детектор дає нам інформацію про потужність у вигляді напруги. Ця напруга відповідає отриманій потужності квадратурним детектором

Щоб порівняти квадратурний детектор із даними SDR, ми також відкалібруємо його як шумову температуру. Ми можемо зробити це, використовуючи той самий метод, що й для SDR, і відкалібрувати напруги до відомих опорних температур. На рисунку 4.9 видно, що дані квадратурного детектора дуже шумні. Тому ми використовуємо фільтр для згладжування даних.

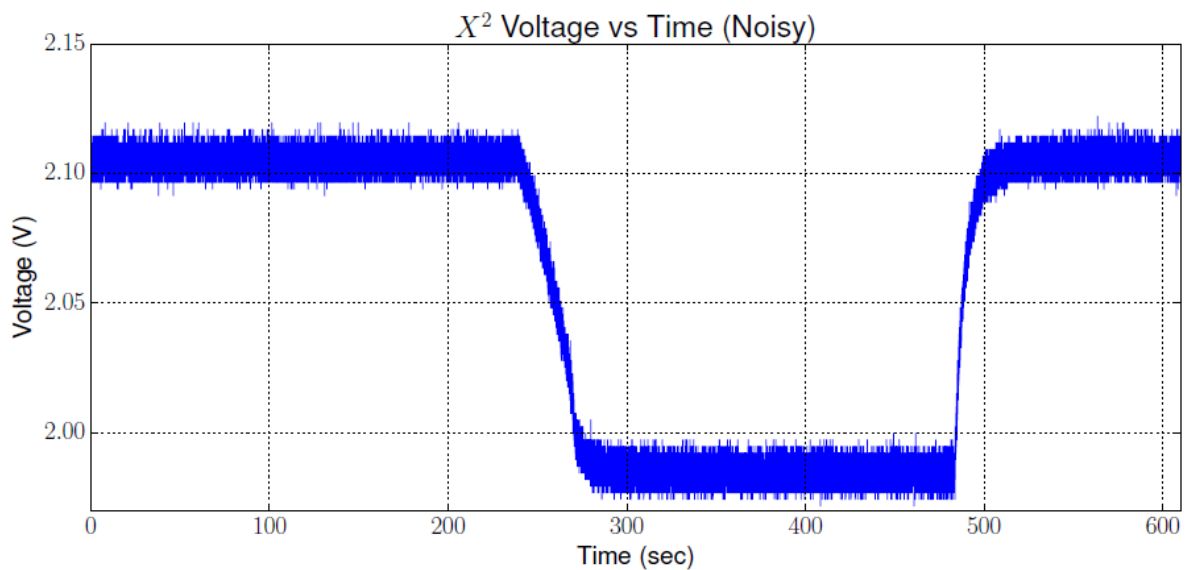


Рисунок 4.9 – Нефільтровані дані з квадратурного детектора, зібрані в експерименті

Для фільтрації даних використовується Python у поєднанні з SciPy. Для цього експерименту ми використовуємо фільтр низьких частот, щоб згладити сигнал. Наступний код застосовує фільтр низьких частот із кінцевою імпульсною характеристикою (FIR), який фільтрує дані.

```
N=100 # Кількість кранів
```

```
Fc=40 # Частота зрізу
```

```
Fs = 1600 #Частота вибірки
```

```
h=scipy.signal.firwin(numtaps=N, cutoff=Fc , nyq=Fs /2)
```

```
x2filt=scipy.signal.lfilter(h, 1.0 , x2voltage)
```

На рисунку 4.10 показано наші дані після фільтрації фільтром низьких частот. Використовуючи ту саму техніку, що й раніше, тепер ми можемо відкалібрувати необроблені напруги від квадратичного детектора до шумової температури. Як і у випадку з даними, зібраними з радіометра на основі SDR, дані квадратурного детектора відкалібровані відповідно до фізичної температури.

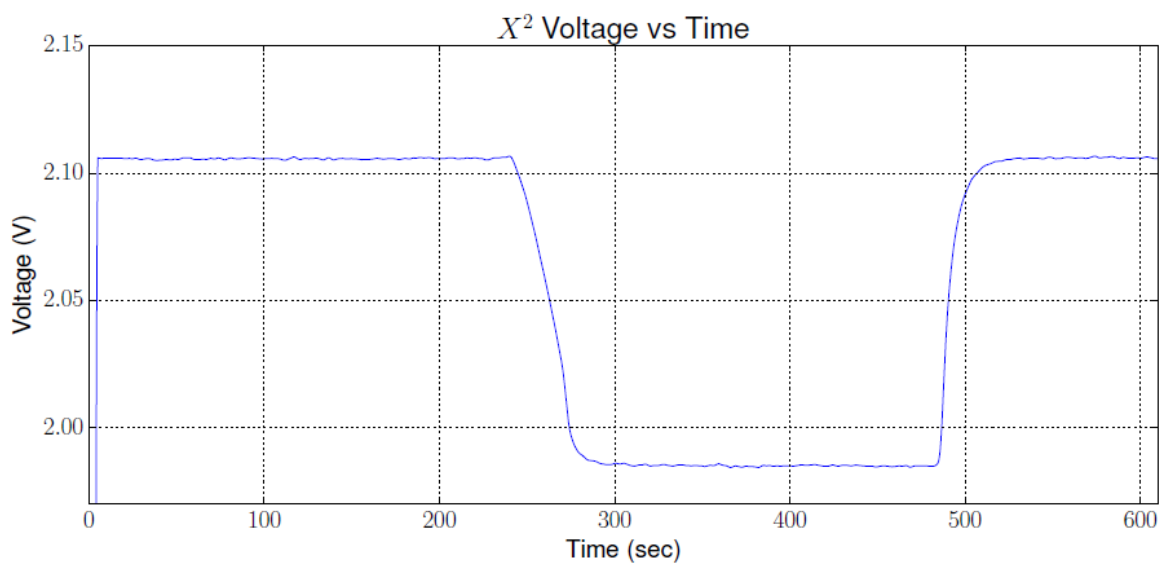


Рисунок 4.10 – Відфільтровані дані квадратичного детектора, використаного в експерименті I

Радіометр на основі SDR проти квадратурного детектора. Далі ми порівняли програмно визначений радіорадіометр із квадратичним законом, щоб переконатися, що вони збігаються. Оскільки і радіометр на основі SDR, і квадратичний закон тепер відкалібровані за шумовою температурою, ми можемо побудувати графік обох наборів даних і порівняти їх один з одним.

В експерименті ми побачили, що як програмно визначене радіо, так і квадратичний детектор збігаються, і це було проаналізовано в межах 0,002 Кельвіна. Це число було визначено шляхом взяття різниці між середніми

значеннями програмно визначеного радіо та квадратичного детектора за той самий п'ятнадцятисекундний період. Це показує, що як квадратурний детектор, так і радіостанція, визначена програмним забезпеченням, узгоджуються, якщо їх правильно відкалібрувати. Це підтверджує, що радіостанція, визначена програмним забезпеченням, справді може працювати як радіометр загальної потужності, а дані, які ми отримуємо з цієї установки, узгоджуються з аналоговим і більш традиційним радіометром.

#### 4.2.2 Результати оцінки чутливості та стабільності

Цей експеримент перевіряє чутливість і стабільність радіометра на основі SDR. Дані, які використовуються для визначення чутливості, – це дані, зібрані для підтвердження стабільності радіометра. Ці дані являють собою дані про загальну потужність, зібрані з радіометра на основі SDR протягом приблизно п'ятигодинного періоду, однак для остаточного аналізу використовувався лише п'ятнадцятихвилинний блок.

Python використовується для обчислення NEΔT де  $T_A$  – фізична температура узгодженого навантаження, а  $T_N$  – шумова температура системи радіометра. Наведений нижче код Python використовується для розрахунку теоретичного NEΔT.

```
tau = 2 # Час інтегрування
BDR = 10e6 # Пропускна здатність
TN = 385 # Шумова температура системи
TA = 277 # Шумова температура антени
NEATJ3DR = (TA+TN) / sqrt (BDR* tau )
```

Це дає нам 0,1 Кельвіна для очікуваного NEΔT. Оскільки чутливість пов'язана зі стандартним відхиленням графіка, ми можемо використовувати Python, щоб отримати стандартне відхилення даних.

Python використовується для визначення стандартного відхилення цього діапазону даних. Використаний код наведено нижче та дає результат 0,08 Кельвіна.

```
stdsdr = numpy.std(g)
print stdsdr
```

Хоча 0,08 Кельвіна нижча за розраховану чутливість, вона все ще цілком прийнятна. Наша фактична продуктивність 0,08 Кельвіна все ще відповідає нашим вимогам радіометра.

Щоб перевірити стабільність радіометра, ми дивимося, скільки змін записує радіометр протягом відносно тривалого періоду часу. Щоб перевірити це, відповідний вантаж був занурений у ванну з рідким азотом на тривалий період часу, у цьому випадку на п'ятнадцять хвилин. Потім показання були перевірені, щоб вивчити тенденцію даних.

#### **4.2.3 Результати експерименту зменшення сигналу перешкод**

Додавання небажаного заважаючого сигналу негативно впливає на роботу радіометра. Це зростаюча проблема для всіх радіометрів, але є більшою проблемою для радіометрів, які використовуються на орбітальних космічних кораблях для спостереження за Землею, оскільки вони бачать великі області, які можуть містити джерела сигналів, що заважають. Незважаючи на те, що смуга, в якій ми працюємо (тобто 1,4 ГГц), є міжнародно захищеною частотою, у цій смузі були як навмисні, так і ненавмисні джерела сигналу, виявлені поточними космічними радіометрами, які спричинили перешкоди.

Дані, зібрані для Експерименту III, являють собою значення загальної потужності з радіометра на основі SDR та даних про напругу з квадратурного детектора. Ці значення відрізняються від попередніх, оскільки фільтр

увімкнено. Це змінює продуктивність на основі SDR радіометру і призводить до різних значень  $rQ$ . Напруги вищі через наявність сигналу порушення.

Ми починаємо з розгляду того, що відбувається з нашими показниками загальної потужності, коли не використовується пом'якшення радіочастотних перешкод. Частота сигналу-порушника не зміниться, але зміниться амплітуда. Це призводить до чітких ознак зміни загальної потужності зі зміною амплітуди сигналу, що викликає порушення.

Можна побачити, що на рисунку 4.11 виникають імпульси, які відповідають змінам амплітуди сигналу, що викликає порушення, що впливає на наші показники загальної потужності. Ці самі імпульси можна побачити в квадратичних даних детектора, показаних на рисунку 4.12.

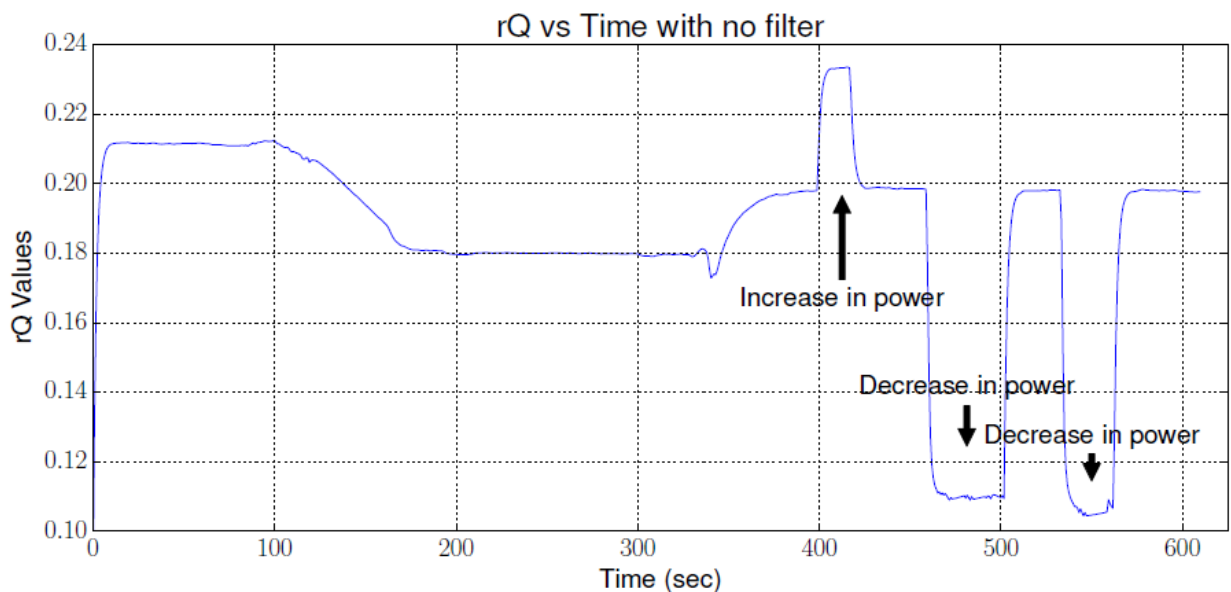


Рисунок 4.11 – Графік, що показує вимірювання нефільтрованої загальної потужності програмно визначеного радіо

Ми можемо бачити як у програмно визначеному радіо, так і в квадратичному детекторі, що є заважаючий сигнал. Якщо ми тепер подивимося на спектр програмно визначеного радіо, показано на рисунку



4.13, ми побачимо, що відповідний сигнал виникає на частоті 1,406 ГГц. Квадратний детектор не має інформації про частоту, тому наш єдиний спосіб виявити заважаючий сигнал – це переглянути показники загальної потужності. На рисунку 4.12 ми можемо побачити сплески квадратичних даних, однак ми не знаємо, де в спектрі знаходиться сигнал, що викликає порушення.

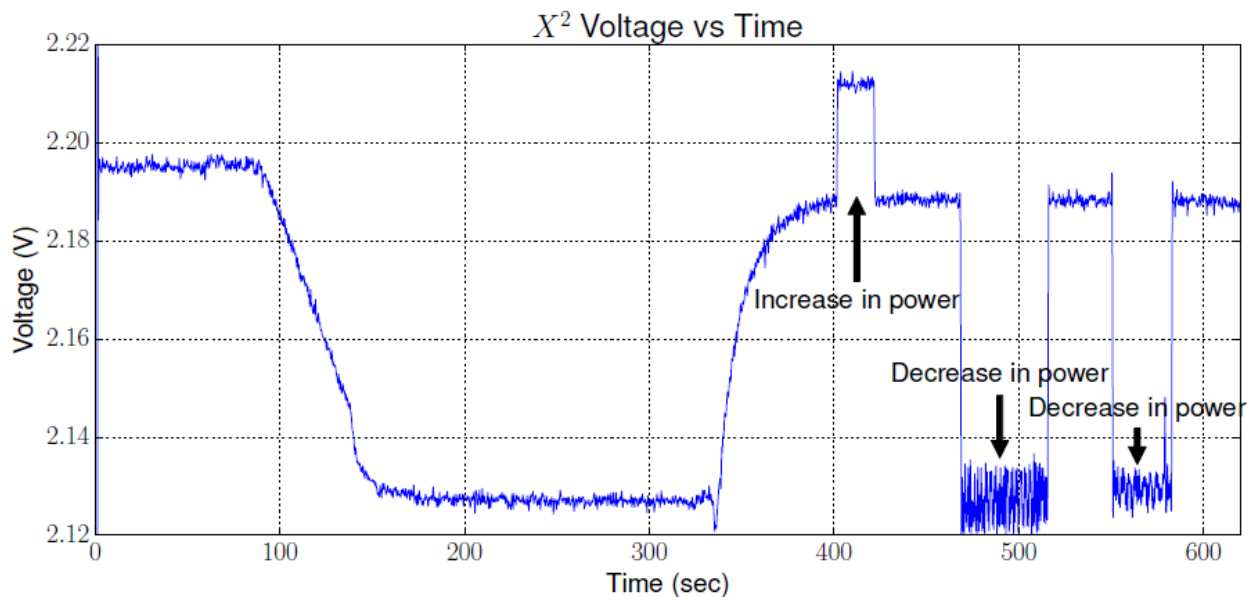


Рисунок 4.12 – Графік, що показує необроблену загальну потужність, зчитувану квадратичним детектором із сигналом перешкод

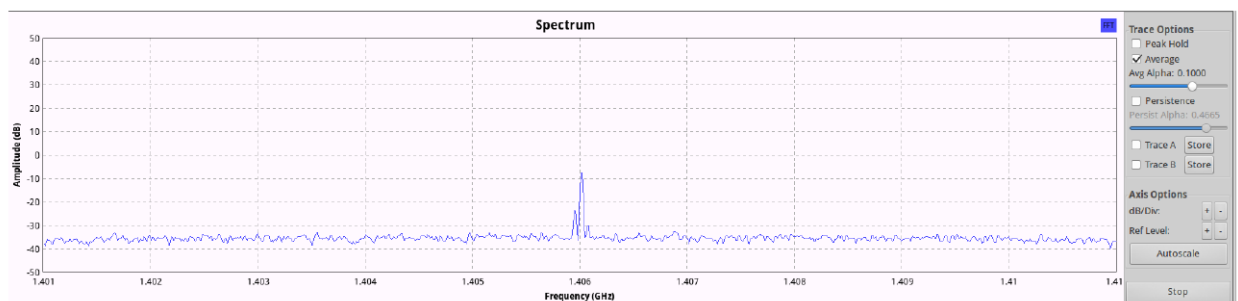


Рисунок 4.13 – Зображення, на якому показано вигляд спектра радіометра на основі SDR без пом'якшення RFI

Оскільки ми знаємо, де знаходиться шкідливий сигнал для радіометра на основі SDR, ми можемо створити фільтр для видалення цього сигналу. У GNU Radio ми можемо вказати як частоту, так і ширину смуги, які ми бажаємо для цього фільтра відхилення смуги. В ідеалі ми хочемо, щоб смуга пропускання фільтра була якомога щільнішою до сигналу, що викликає порушення, і при цьому переконайтеся, що наш фільтр ефективно видаляє сигнал. На рис. 4.14 показано відображення спектру програмно визначеного радіоприймача під час фільтрації шкідливого сигналу.

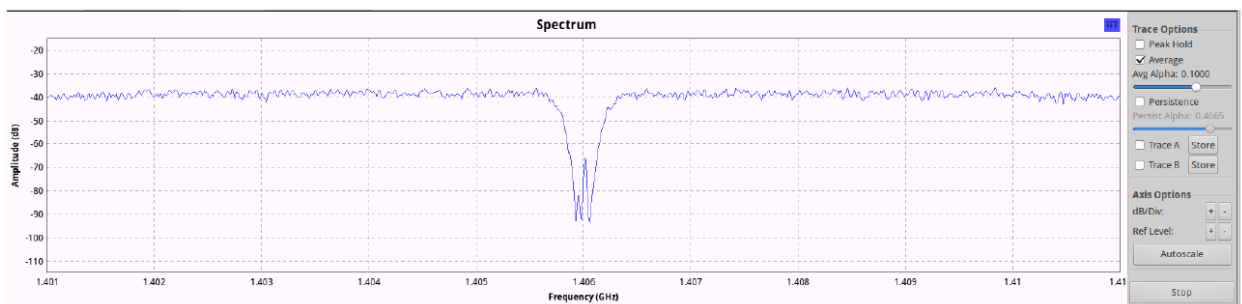


Рисунок 4.14 – Зображення спектра радіометра на основі SDR, який фільтрує шкідливий сигнал

Оскільки ми вже видалили шумовий сигнал, повторно запускаємо наш експеримент і ще раз порівняти різницю між програмно визначеним радіо та квадратурним детектором. Ми можемо почати з перегляду програмно визначених показників загальної потужності радіо.

На рисунку 4.15 показані показання загальної потужності як програмно визначеного радіо, так і квадратичного детектора. На цьому графіку видно, що радіостанція, визначена програмним забезпеченням, здатна робити звичайні показники, коли квадратурний детектор все ще показує зміни амплітуди, що відповідає імпульсам сигналу, що викликає порушення, що робить обидва калібрування і отримати корисні дані важко.

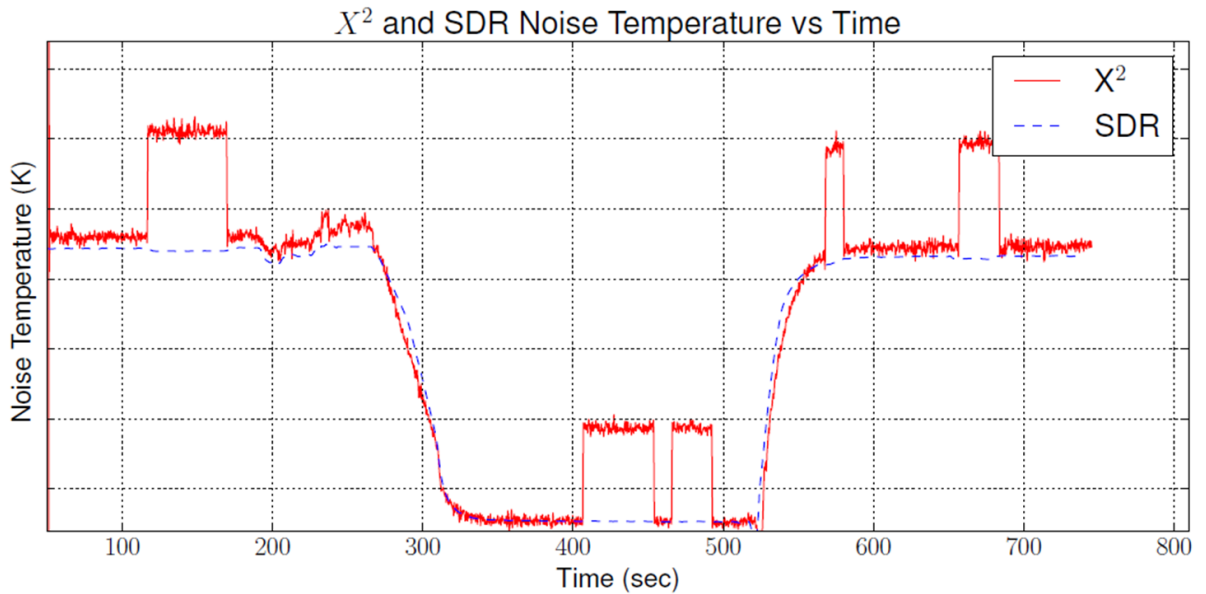


Рисунок 4.15 – Зображення шкідливого сигналу, який фільтрується SDR

Видно, що сигнал відфільтровано.

Слід зазначити, що під час аналізу даних буде деяка затримка через два фактори. По-перше, існує затримка в програмно визначеному радіометрі через інтегратор, який використовується. Це створює часову затримку, оскільки інтегратор накопичує інформацію, а потім розраховується. Ми використовуємо досить великий час інтеграції, зазвичай у секундах, тому це може додати значну затримку. По-друге, ми маємо меншу затримку в проріджуванні та фільтрі низьких частот, який також використовується в програмно визначеному радіометрі. Це фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою (FIR), тому вони мають затримку, наведену у рівнянні 4.1, де  $N$  є кількість згенерованих відводів, а  $F_s$  – наша частота дискретизації, у нашому випадку 10 МГц.

$$\frac{(N-1)}{(2 * F_s)} \quad (4.1)$$

Значення генеруються Python за допомогою програми розробки фільтрів. Для цього експерименту згенеровано 18 181 натискань. Беручи до уваги це та нашу частоту дискретизації, наш FIR-фільтр затримує сигнал лише на 9 мілісекунд.

Останнє зауваження щодо узгодження квадратурного детектора та даних радіометра, визначених програмним забезпеченням. Обидві системи мають функцію запису і повинні запускатися користувачем вручну. Вони також працюють на окремих комп'ютерах. Таким чином, існує людська помилка, яка також потрапляє в систему. Зазвичай це не більше 1-2 секунд. Але в цьому експерименті було помічено, що між ними була трохи більша затримка приблизно 4 секунди.

#### **4.2.4 Результати експерименту впливу пом'якшення сигналу перешкод на продуктивність**

Мета цього експерименту – перевірити, як додавання фільтра впливає на продуктивність радіометра. Хоча ми продемонстрували, що можемо відфільтрувати образливий сигнал, це коштує. У цьому експерименті перевіряється вплив фільтрування смуг на вимірювання загальної потужності та чутливості радіометра.

Дані, зібрані для цього експерименту, показані в таблиці 4.1 і таблиці 4.2.

В експерименті IV ми перевіряємо продуктивність програмно визначеного радіометра за використання фільтра. Згадуючи рівняння для NEAT з рівняння 2.6, наша чутливість є функцією кількості шуму як від антени ( $T_A$ ), так і від сумарного шуму системи ( $T_N$ ). Чутливість також є функцією смуги радіометра ( $\beta$ ) і часу інтегрування ( $\tau$ ).

Наш час інтеграції можна контролювати, і його можна встановити за допомогою панелі GUI програмно визначеного радіо. У типовому радіометрі

ми часто не маємо жодного контролю над смугою пропускання. Його часто встановлюють встановлені механічні смугові фільтри та схема квадратичного детектора для вимірювання потужності шуму. У радіостанції SDR ми маємо більше контролю над пропускнуою здатністю, оскільки ми можемо змінювати частоту дискретизації, яка, у свою чергу, контролює нашу пропускну здатність. Існує обмеження, оскільки більші частоти дискретизації вимагають високопродуктивних АЦП і більшої швидкості обчислення.

Таблиця 4.1 – Виміряна чутливість і смуга пропускання фільтра

NEΔT(K)	Пропускна здатність (МГц)	NEΔT(K)	Пропускна здатність (МГц)
0,139	0,125	0,195	5
0,141	0,250	0,234	6
0,143	0,500	0,252	7
0,147	1	0,318	8
0,153	2	0,450	9
0,166	3	1,45	10
0,181	4		

Таблиця 4.2 – Виміряна загальна потужність і смуга пропускання сигналу

Загальна потужність (rQ)	Пропускна здатність (МГц)	Загальна потужність (rQ)	Пропускна здатність (МГц)
0,003	0,125	0,125	5
0,006	0,250	0,140	6
0,012	0,500	0,170	7
0,025	1	0,200	8
0,050	2	0,230	9
0,071	3	0,250	10
0,101	4		

Незважаючи на те, що ми змогли відфільтрувати шкідливий сигнал і відновити вимірювання загальної потужності, це відбувається за рахунок зменшення загальної смуги пропускання, доступної для виявлення потужності. У цьому експерименті ми перевіряємо, як це впливає на чутливість на основі рівняння 4.2.

$$NE\Delta T = \frac{T_A + T_N}{\sqrt{(\beta - \beta_{filter})\tau}} \quad (4.2)$$

Оскільки ми вирізаємо частину смуги пропускання, щоб усунути шкідливий сигнал, це також видаляє цю смугу пропускання для виявлення повної потужності. Коли пропускна здатність фільтра ( $\beta_{\text{фільтр}}$ ) збільшується, тим більша пропускна здатність віднімається від загальної доступної смуги пропускання ( $\beta$ ). Рівняння 4.2 враховує ці втрати шляхом віднімання смуги пропускання фільтра ( $\beta_{\text{фільтр}}$ ) із загальної смуги пропускання ( $\beta$ ).

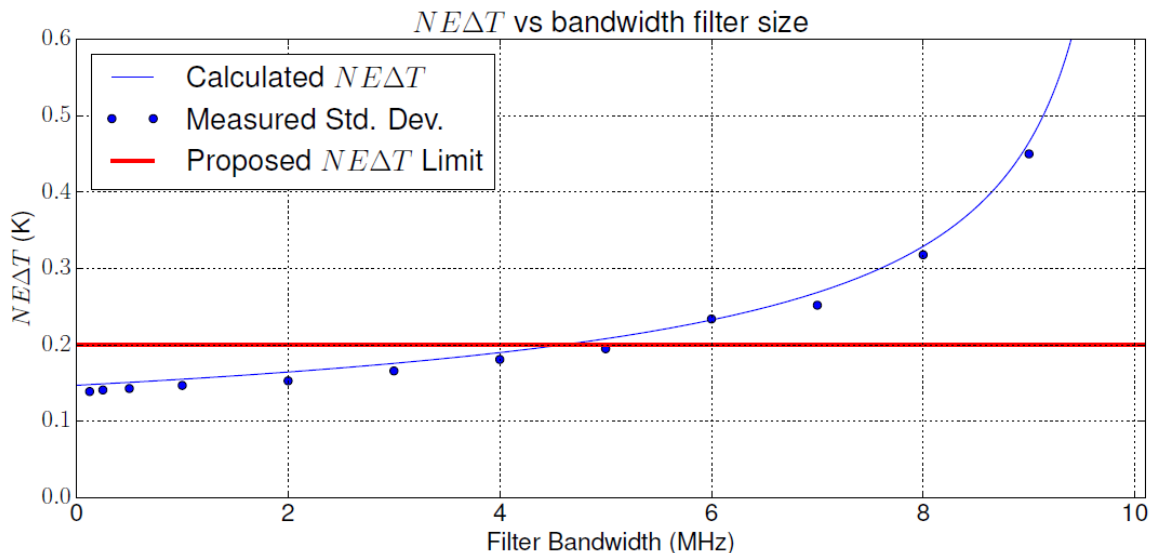


Рисунок 4.16 – Графік розрахованого NE ΔT, запропонованого обмеження для чутливості радіометра та виміряного стандартного відхилення відповідно до смуги пропускання фільтра

Ми можемо побудувати графік очікуваного відгуку NEΔT, регулюючи значення  $\beta_{\text{filter}}$  у діапазоні від вузькосмугового фільтра, у нашому прикладі 125 кГц, аж до 9,99 МГц або майже всієї смуги пропускання.

На рисунку 4.16 показано вимірні точки стандартного відхилення для радіометра на основі SDR для різних розмірів фільтрів. Ці розміри фільтрів і зібрані дані наведено в таблиці 4.2. На рисунку 4.16 видно, що існує хороша кореляція між очікуваною чутливістю радіометра та вимірною чутливістю радіометра.

Нарешті, на рисунку 4.16 додано рядок, щоб показати можливе обмеження, коли ми могли відфільтрувати занадто багато. У цьому прикладі використовується NEΔT 0,2 Кельвіна. На рисунку 4.16 видно, що приблизно на 5 МГц наш NEΔT перевищує наш поріг у 0,2 Кельвіна. Це означатиме, що для відповідності цим критеріям продуктивності нам не потрібно буде перевищувати 5 МГц для нашого розміру фільтра. Це припускається, що наш час інтеграції ( $\tau$ ) і пропускна здатність ( $\beta$ ) залишаються постійними.

Тепер ми розглянемо співвідношення загальної отриманої потужності зі зменшенням пропускну здатності. На рисунку 4.17 показано як виміряну загальну отриману потужність, так і очікувану загальну отриману потужність із збільшенням пропускну здатності фільтра.

Загальна потужність розраховується за рівнянням 2.2 і базується на шумі системи ( $T_N$ ), антени ( $T_A$ ), смузі пропускання ( $\beta$ ) і посиленні потужності ( $G$ ) використовуваних підсилювачів. Наше посилення потужності та шумові температури є фіксованими, і в цьому експерименті ми використовуємо коефіцієнт посилення системи 30 дБ. Це являє собою приріст потужності, який ми бачимо з трьома МШУ, що використовуються, за вирахуванням будь-яких втрат або затухання в радіочастотному ланцюзі.

Зміною в цьому експерименті є пропускна здатність, яку спостерігає радіометр на основі SDR. Знову ж таки, ми можемо змінити рівняння 2.2,

віднявши смугу пропускання фільтра ( $\beta_{\text{фільтр}}$ ) із загальної доступної смуги пропускання, і це показано в рівнянні 4.3.

$$P_{out} = k(\beta - \beta_{filter})G(T_A + T_N). \quad (4.3)$$

Щоб порівняти цю теоретичну потужність із фактично вимірною потужністю, ми зібрали значення  $rQ$ , знову створивши різні розміри фільтрів, а потім вимірявши значення  $rQ$ . Ці значення можна знайти в таблиці 4.2 і додано крапками на рисунку 4.17. Це також демонструє дуже хорошу кореляцію між очікуваною загальною отриманою потужністю та вимірною загальною потужністю, отриманою для експерименту IV.

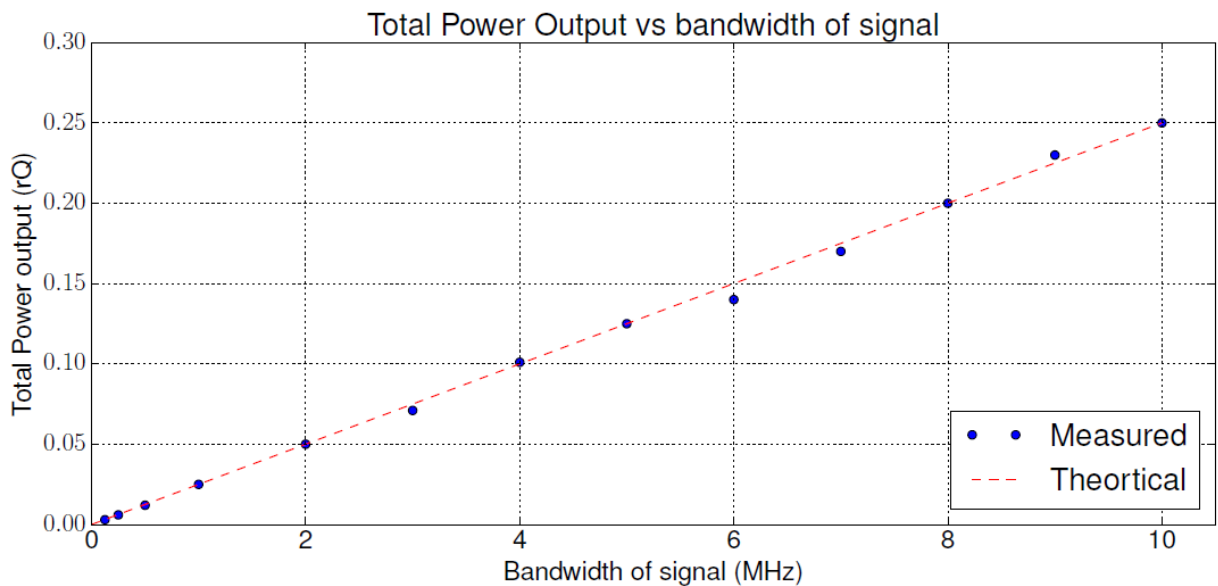


Рисунок 4.17 – Графік залежності загальної вимірної потужності та теоретичної потужності від смуги пропускання виміряного сигналу



### 4.3 Переваги програмно визначеного радіорадіометра

Було проведено дослідження щодо того, які переваги матиме програмний радіометр перед більш традиційним радіометром. Ми зосередилися на трьох основних сферах; вартість, вага та розмір, а також цінність, яку може додати радіометр на основі SDR порівняно з традиційними радіометрами.

Останніми роками програмно визначені радіостанції стали більш поширеними, і це породило низку готових комерційних рішень (COTS). Рішення COTS часто є дешевшим рішенням через масове виробництво, яке має місце. Це призвело до того, що вартість багатьох SDR знизилася до 400-500 доларів, але при цьому вони мали відмінні робочі характеристики. HackRF, придбаний для цього дослідження, коштував 12000 грн. Основна відмінність між програмно визначеними радіостанціями на ринку полягає в їх роздільній здатності та смузі пропускання, яку вони підтримують.

Найбільша економічна вигода полягає в тому, що ключові компоненти, які представлені в радіометрі, фільтри та квадратурний детектор, можуть бути виконані програмним забезпеченням замість додаткового обладнання. Система також є набагато гнучкішою за частотою, що означає, що вона може працювати в ширшому діапазоні частот, ніж більшість традиційних радіометрів, з дуже невеликими змінами в апаратному забезпеченні, а в деяких випадках може не вимагати жодних змін в апаратному забезпеченні. HackRF, наприклад, працює в діапазоні від 10 МГц до 6 ГГц, але робить це за рахунок нижчої роздільної здатності, меншого приросту потужності в інтерфейсі та підтримки нижчої смуги пропускання.

Типовий радіометр має багато компонентів, які беруть участь у його конструкції. Це включає в себе фільтри, МШП та виявлення потужності (тобто квадратичний детектор). Ці компоненти збільшують вагу, розмір і вартість радіометра. Однак радіостанція, визначена програмним

забезпеченням, оцифровує сигнал, і ми можемо замінити фільтри та квадратурний детектор їхнім програмним еквівалентом. У той час як радіостанція з програмним забезпеченням додає АЦП і, як правило, ПЛІС для обробки сигналів, прогрес у напівпровідникових технологіях продовжує зменшувати ці компоненти. Ці компоненти також легші за фільтри, які часто використовуються в традиційних радіометрах.

Розмір є ще однією перевагою, оскільки напівпровідникова технологія продовжує зменшувати компоненти. Знову ж таки, оскільки такі елементи, як фільтри та квадратурний детектор, замінено програмними реалізаціями, це допомагає зменшити загальний розмір.

Радіометр на основі SDR додає додаткову цінність з двох причин. По-перше, він здатний працювати як з інформацією про частоту, так і з магнітудою, чого не має традиційний радіометр. Це дозволяє проводити додатковий аналіз сигналу та може допомогти виявити такі проблеми, як заважаючий сигнал, що було продемонстровано в цій дипломній роботі.

По-друге, ми можемо мати гнучку систему, яка здатна пристосовуватися до мінливих умов з дуже незначними змінами в апаратному забезпеченні або без них. Можуть бути реалізовані різні типи радіометрів, наприклад радіометр Діке, радіометр з подвійною поляризацією або радіометр, який може вимірювати параметри Стокса. Також можливе впровадження нових типів радіометрів, які ще не розроблені. Нарешті, оскільки ми маємо інформацію як про частоту, так і про потужність, ми можемо створити систему, здатну адаптуватися до мінливих умов, наприклад, мати справу із заважаючим сигналом.

#### 4.4 Недоліки радіометра на основі SDR

Хоча ми окреслили ряд переваг використання радіометра на основі COTS SDR і те, як SDR може додати додаткову цінність системі радіометрів, у радіометра на основі SDR є деякі недоліки.

Одним із найбільших недоліків радіометра на основі SDR може бути енергоспоживання SDR. З переходом до виконання таких функцій, як виявлення потужності та фільтрація, нам тепер потрібна додаткова обчислювальна потужність для виконання цих завдань. З цими обчислювальними циклами тепер потрібна додаткова потужність. Використання FPGA та SoC може допомогти мінімізувати ці проблеми з живленням, оскільки вони більш ефективні, ніж використання ПК.

Вимоги до потужності та процесора також збільшуються, оскільки ми додаємо додаткові функції, такі як фільтрація образливого сигналу. Хоча ці доповнення можуть не вимагати додаткового обладнання, вони можуть вимагати додаткових вимог до процесора та пам'яті. Збільшення вимог до обробки також збільшить потреби в електроенергії та може додати додаткові вимоги до охолодження.

Хоча технологія SDR прогресує, пропускна здатність все ще є обмеженням, яке впливає на SDR і, у свою чергу, на радіометр на основі SDR. Пропускна здатність відіграє вирішальну роль у чутливості радіометра, як пояснюється в цій тезі, тому той факт, що багато SDR мають обмежену пропускну здатність, створює недолік. У багатьох випадках це вузьке місце виникає як у транспортуванні, так і в обробці систем із великою пропускною здатністю. Це також стосується недоліків енергоспоживання, оскільки більша пропускна здатність також означає потребу в додаткових обчислювальних циклах.

## ВИСНОВКИ

В роботі досліджується використання технології програмно визначеного радіо (SDR) для розробки радіометра, який має продуктивність на рівні з традиційним радіометром. Крім того, що радіометр на основі SDR може досягти таких же характеристик, як традиційний радіометр, з точки зору чутливості та стабільності, показано, що гнучкість, притаманна технології SDR, дозволяє реалізувати функціональні можливості, які виходять за рамки традиційних радіометрів. Крім того, завдяки зниженню вартості та підвищенню гнучкості технологія SDR може стати привабливим шляхом для розширення доступності радіометрії для широкого дослідницького співтовариства.

Основні результати отримані в роботі:

- розробка програмно визначеного радіометра;
- скрипти на основі Python для аналізу даних, створених радіометром;
- техніка пом'якшення радіочастотних перешкод (RFI), реалізована за допомогою програмно визначеної радіотехнології.

Двома можливими майбутніми завданнями є:

- перенесення обробки сигналу на спеціальний процесор;
- створення складніших радіометричних систем (наприклад, радіометр Діке).

Для цієї роботи ми використовували програмне забезпечення, яке могло б працювати на ПК або подібній комп'ютерній системі з повноцінною операційною системою, такою як Linux. Це дозволило швидко розробити за допомогою програмних засобів, таких як GNURadio, для розробки радіометра на основі SDR. Незважаючи на те, що це чудова платформа для створення прототипу радіометра на основі SDR, вона потребує апаратного забезпечення, здатного працювати з повною операційною системою та

відповідним програмним забезпеченням. Деякі додатки радіометра вважатимуть це прийнятним, однак інші програми дистанційного зондування (наприклад, космічний супутник) вимагатимуть більш ефективної конфігурації. Одне з рішень полягає в тому, щоб перенести обробку сигналу з ПК на програмовану вентильну матрицю (FPGA) або спеціальну інтегральну схему (ASIC) для підвищення ефективності.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Behnke P. Senior capstone: A software defined radio design for amateur astronomy / P. Behnke, D. Soberal, S. Bredeweg, B. Dunne, A. Sterian, D. Furton. In Interdisciplinary Engineering Design Education Conference (IEDEC), 2013. – p. 104-111.
2. Cross D. Time domain filtering techniques for digital audio. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://groovit.disjunkt.com/analog/time-domain/timefilt.html> (дата звернення 09.10.2024) – Назва з екрану.
3. De Roo, R., Ruf, C., and Sabet, K. An l-band radio frequency interference (rfi) detection and mitigation testbed for microwave radiometry. In Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2007. IEEE International, – p. 2718-2721.
4. Ellingson, S., Hampson, G., and Johnson, J. Design of an l-band microwave radiometer with active mitigation of interference. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International. – Volume 3. – p. 1751-1753.
5. Erbas, C., Hornbuckle, B., and De Roo, R. (2006). Iowa state university/the university of michigan direct sampling digital radiometer. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on, p. 3074-3077.
6. Fischman, M. A. (2001). Development of a direct-sampling digital correlation radiometer for earth remote sensing applications. PhD thesis, University of Michigan.
7. Forte, G., Tarongi Bauza, J., dePau, V., Vall llossera, M., and Camps, A. (2013). Experimental study on the performance of rfi detection algorithms in microwave radiometry: Toward an optimum combined test. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 51(10):4936-4944.

8. Jonard, F., Weihermuller, L., Jadoon, K., Schwank, M., Vereecken, H., and Lambot, S. (2011). Mapping field-scale soil moisture with l-band radiometer and ground- penetrating radar over bare soil. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49(8): 2863-2875.

9. Jondral, F. K. (2005). Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio. *EURASIP journal on wireless communications and networking*, 2005(3): 275-283.

10. Kerr, Y. (2012). Smos rfi detection: Today's maps. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS\\_blog/?p=2963](http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/?p=2963) (дата звернення 17.11.2024) – Назва з екрану.

11. Liu, P.-W., Judge, J., DeRoo, R., England, A., and Luke, A. (2013). Utilizing complementarity of active/passive microwave observations at l-band for soil moisture studies in sandy soils. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International*, pages 743-746.

12. McIntyre, E. and Gasiewski, A. (2012). A new technique for detecting the presence of weak interfering digital signals in radiometric noise. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, pages 1517-1520.

13. Misra, S., De Roo, R., and Ruf, C. (2012). An improved radio frequency interference model: Reevaluation of the kurtosis detection algorithm performance under central- limit conditions. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(11):4565- 4574.

14. Uengtrakul, B. and Bunnjaweht, D. (2014). A cost efficient software defined radio receiver for demonstrating concepts in communication and signal processing using python and rtl-sdr. In *Digital Information and Communication Technology and it's Applications (DICTAP), 2014 Fourth International Conference on*, pages 394-399.

15. Ulaby, F. T. and Long, D. G. (2014). *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.

16. Wang, Z., Liu, J., Lu, H., Zheng, W., Wang, X., and Li, B. (2012). A digital correlation full-polarimetric microwave radiometer design and calibration. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International, pages 4688-4690.