МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

_____ Інформаційної безпеки та електронних комунікацій_____

(повне найменування інституту, факультету)

_____Інформаційних технологій та телекомунікацій_____

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

_____Магістр_____

(ступінь вищої освіти)

на тему_ **ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ ЗАДАНОЇ ФОРМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОРАДАРУ**

Виконав: студент(ка) _6__курсу, групи РТ-512м_

Спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

Керівник _____Малий О.Ю._____

(прізвище та ініціали)

Рецензент_____

(прізвище та ініціали)

2023

Форма № 25

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

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
Кафедра__ Інформаційних технологій електронних засобів_____
Ступінь вищої освіти _Магістр_____
Спеціальність _172 Телекомунікації та радіотехніка _____
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація): Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки_____
(назва освітньої програми (спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІТЕЗ_____
_____
«_____» _____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

_____Щукіна Тетяна Валеріївна_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи)_Оптимізація алгоритмів визначення металевих предметів заданої форми з використанням георадару_____
_____

керівник проєкту (роботи)_Малий Олександр Юрійович, к.т.н, доцент, в.о.зав. каф.ІТЕЗ_____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «11»_листопада_2023_року №_448_

2. Строк подання студентом проєкту (роботи)_20 грудня_____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи)_ тип радару FMCW, розгортка частоти: fmjn=1,3 ГГц, fmax=2,6 ГГц_____
_____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Використання та класифікація георадарів, принцип роботи георадару, методика роботи георадару та структурна схема, вибір компонентів для радіочастотної частини георадару, вибір компонентів для інших вузлів георадару, складання кінцевої конструкції, програмне та мікропрограмне забезпечення для керування мікроконтролером, запуск та тестування системи

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
__18 слайдів_____

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	**Олександр МАЛИЙ**	**03.10.23**	
2	**Олександр МАЛИЙ**	**17.10.23**	
3	**Олександр МАЛИЙ**	**07.11.23**	
4	**Олександр МАЛИЙ**	**21.11.23**	
нормоконтроль	**Ірина ПОСПЕЄВА**	**01.12.23**	

7. Дата видачі завдання «04» __вересня_____2023_року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	**Використання та класифікація георадарів**	**9.10.23**	
2	**Принцип роботи георадару**	**11.10.23**	
3	**Методика роботи георадару та структурна схема**	**12.10.23**	
4	**Вибір компонентів для радіочастотної частини георадару**	**20.10.23**	
5	**Вибір компонентів для інших вузлів георадару**	**15.11.23**	
6	**Складання кінцевої конструкції**	**25.11.23**	
7	**Програмне та мікропрограмне забезпечення для керування мікроконтролером**	**02.12.23**	
8	**Оформлення ПЗ та захист дипломного проекту**	**16.12.23**	

Студент(ка) _____ __**Щукіна Т.В.**_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ __**Малий О.Ю.**_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 60 сторінок, 39 рисунків, 6 таблиць, 7 джерел, 1 додаток.

ГЕОРАДАР, ПІДСИЛЮВАЧ, ФІЛЬТР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМА, ВІДБИТТЯ, ХВИЛЯ, ДЕФРАКЦІЯ, ПЕРЕДАВАЧ, ПРИЙМАЧ

Об’єктом дослідження є методи виявлення підземних утворень.

Предметом дослідження є методика роботи георадару

Метою дипломного проєкту є розробка методів визначення підземних обєктів різно форми та реалізація георадару на базі запропонованих методів.

У першому розділі розглядаються огляд області розробки та постановка завдань магістерської роботи.

У другому розділі проводиться розробка методів визначення підземних обєктів та розробка апаратної частини георадару.

У третьому розділі проводиться складання георадару та розробка програмного забезпечення для керуючого мікроконтролеру, а також програмного забезпечення для ПК, що дозволить проводити аналіз виявлених пдземних обєктів за допомогою розробленого георадару.

ЗМІСТ

Реферат 4

Вступ 6

1 Використання георадарів для пошуку підземних предметів 8

1.1 Використання та класифікація георадарів 8

1.2 Принцип роботи георадару 13

1.3 Постановка задач магістерської роботи 22

2 Розробка методики роботи та вибір апаратних компонентів 23

2.1 Методика роботи георадару та структурна схема 23

2.2 Вибір компонентів для радіочастотної частини георадару 25

2.3 Вибір компонентів для інших вузлів георадару 29

3 Розробка кінцевої конструкції, програмного забезпечення та тестування роботи 45

3.1 Складання кінцевої конструкції 45

3.2 Програмне та мікропрограмне забезпечення для керування мікроконтролером 46

3.3 Запуск та тестування системи 53

Висновки 58

Перелік джерел посилання 59

Додаток А – Презентація 60

ВСТУП

Георадіолокація - це геофізичний метод, заснований на випромінюванні імпульсів електромагнітних хвиль і реєстрації сигналів, відбитих від різних об'єктів зондованого середовища.

Прилад, у якому реалізовано принципи георадіолокації, називається георадаром. Основні його елементи - імпульсний генератор з антеною, що передає, приймальна антена і блок управління. Принцип дії більшості сучасних георадарів той самий, що й у звичайних імпульсних радарів. У середовище, що вивчається, випромінюється електромагнітна хвиля, яка відображається від розділів середовищ і різних включень. Відображений сигнал приймається та записується георадаром.

Як безпечний та неруйнівний метод георадар є ідеальним способом дослідження надр для широкого спектру застосувань. Георадар простий у застосуванні, сканування поверхні відбувається швидко і точно, що робить його економічним вибором.

З самого початку розроблений як неруйнівний метод геофізичних досліджень, георадар може використовуватися для отримання інформації про те, що знаходиться під поверхнею землі, а також для виявлення та картування неруйнівного як природних геологічних об'єктів, так і підземної штучної інфраструктури:

- безпечний;
- ефективність – простота в експлуатації, швидкі результати;
- універсальність:
    - працює через будь-які проникаючі середовища;
    - може виявляти як металеві, так і неметалеві об'єкти/особливості;
    - потрібен лише односторонній доступ для дослідження штучної інфраструктури.

Буквально за декілька годин георадарне дослідження, яке використовує неруйнівний метод аналізу під поверхні, надасть інформацію про ділянку для забудови чи проєктування автомагістралі. Георадар дозволяє дізнатися усі секрети під

поверхнею та майже одразу побачити їх на екрані, але досі він робить свої вимірювання за допомогою людини, яка рухає прилад вздовж досліджуваної поверхні.

1 ВИКОРИСТАННЯ ГЕОРАДАРІВ ДЛЯ ПОШУКУ ПІДЗЕМНИХ ПРЕДМЕТІВ

1.1 Використання та класифікація георадарів

GPR - це абревіатура від Ground Penetrating Radar (георадар), і, як випливає з назви, це система радіолокації, яку ви використовуєте для зображення надр. Його можна використовувати на безлічі різних проникаючих матеріалів для виявлення та картування особливостей або об'єктів усередині.

Ця технологія набула широкого поширення і регулярно використовується для різних областей застосування, таких як картографування корінних порід, порожнин/воронок, археологічних артефактів та рівнів ґрунтових вод.

Зовсім недавно георадар став застосовуватися у військових/контртерористичних, правоохоронних та пошуково-рятувальних цілях.

Інші поширені назви георадару: імпульсний радар, георадар та надширокосмуговий радар.

Області застосування георадару:

- пошук підземних комунікацій;
- археологія;
- інфраструктура;
- геологічні дослідження;
- георадарні дослідження у військових та правоохоронних цілях;
- екологічні дослідження;
- дослідження льоду/снігу;
- огляд доріг/мостів;
- гірничодобувна промисловість;

Сучасні георадари є універсальними приладами, які мають найширшу сферу застосування.

Їх успішно використовують у наступних сферах діяльності:

- пошук під землею, водою неметалічних та металевих предметів на великій глибині (залежно від моделі георадару глибина дослідження може досягати кількох кілометрів);

- визначення рівня ґрунтових вод, промерзання ґрунту;

- виявлення в ґрунті підземних порожнин, промоїн;

- проведення контролю якості покриття автомобільних шляхів.

В даний час георадари використовуються при експлуатації автомобільних доріг для встановлення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу та потужності ґрунтів земляного полотна та підстилаючої основи, просторового розташування підошви геологічних шарів та рівня ґрунтових вод (РГВ), визначення товщини льоду на зимниках, глибини промерзання дорожніх конструкцій, оцінки стійкості ґрунтів на зсувних ділянках, вологості ґрунтів, стану бетонних конструкцій тощо.

Однією з головних потреб у георадарах є обстеження існуючих автомобільних доріг, що дозволяє на основі даних випробувань ухвалити рішення щодо вибору ефективних видів ремонтних робіт. Особливостями застосування георадарів у цьому випадку є можливість швидкого отримання довгих та безперервних профілів хвильового зображення ґрунтово-гідрогеологічного розрізу в поздовжньому напрямку, а також на важких ділянках та у поперечному напрямку.

За допомогою георадару крім пошуку інженерних підземних комунікацій можуть бути виконані геологічні, гідрогеологічні та інженерно-геологічні завдання, що включають картування поверхні корінних порід під пухкими опадами (піску, глини, мерзлих ґрунтів торфу і т. д.), визначено рівні ґрунтових вод та межі між шарами з різним ступенем водонасичення, товщина льоду та снігу, оцінено потужність водного шару та виконано картування піддонних відкладень. При проведенні інженерно-геодезичних робіт георадар зазвичай застосовується для пошуку та обстеження локальних об'єктів, що мають невелику глибину залягання (0,2-15 метрів), наприклад, для пошуку підземних порожнин, обстеження мостів та дорожнього покриття, картування комунікацій (трубопроводів та кабелів), обстеження бетонних конструкцій, засолених грунтів, забруднених грунтів і т. п., ділянок розрізу з порушеним природним заляганням грунту - рекультивованих

земель, засипаних виїмок, а також для профілювання дна водойм та піддонних відкладень, та інших схожих завдань.

Георадари також використовуються при проведенні гірничих досліджень, гляціології, археології, судової медицини, для картування рівня грунтових вод. У геології - для побудови геологічних розрізів, визначення положення рівня ґрунтових вод, товщини льоду, глибини та профілю дна річок та озер, меж поширення корисних копалин у кар'єрах, положення карстових воронок та порожнин. У транспортному будівництві - для визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу та якості ущільнення дорожньо-будівельних матеріалів, дослідження кар'єрів дорожньо-будівельних матеріалів, оцінки основ під транспортні споруди, визначення глибини промерзання в ґрунтових масивах та дорожніх конструкціях, вмісту вологи в ґрунті земляного полотна та підстилаючих ґрунтових основах, ерозії ґрунтів на ділянках мостових переходів. У промисловому та цивільному будівництві - для визначення якості та стану бетонних конструкцій (мостів, будівель і т. д.), стану дамб і гребель, виявлення зсувних зон, розташування інженерних мереж (металевих та пластикових труб, кабелів та інших об'єктів комунального господарства) . В археології - для знаходження археологічних об'єктів та межі їх поширення. При екологічних дослідженнях - з метою оцінки забруднення грунтів, виявлення витоків з нафто- і водопроводів, місць поховання екологічно небезпечних відходів. Георадари використовуються також і силовими структурами виявлення мін, контрабандних вкладень тощо.

Дослідження георадар активно і успішно проводить і в сфері безпеки, де прилад дозволяє успішно вести пошук і виявлення не тільки боєприпасів, що не розірвалися, а й інших вибухонебезпечних предметів. В умовах бойових дій за допомогою георадару можна виявити приховані та замасковані споруди. Незамінне використання георадару у боротьбі з тероризмом та контрабандною діяльністю. Георадар виявився затребуваним у роботі міністерства надзвичайних ситуацій, коли фахівці цього відомства використовують його для проведення профілактичних досліджень, таких як перевірка технічного стану гідротехнічних споруд, мостів, насипів, залізниць та автомобільних доріг. Він став незамінним при пошуку та порятунку людей, які

опинилися під завалами. Можливості георадарних досліджень активно використовуються у криміналістиці. Слідчими органами активно застосовується георадар для знаходження прихованих доказів на великі

Існує дві класифікації георадарів залежно від можливості використання одного або кількох каналів та залежно від потужності сигналу:

За кількістю використання каналів георадари поділяються на такі групи:

- одноканальні радари (радар оснащується лише одним приймачем та передавачем);

- багатоканальні парні радари (до складу радарів даного типу входить кілька приймачів та передавачів);

- багатоканальні радари із синтезованою апертурою.

Одноканальні георадари. У таких георадарах є один передавач і один приймач, більшість компаній-виробників георадарів мають одноканальні георадари.

Багатоканальні парні георадари. У таких георадарах є кілька пар приймач-передавач, тому зйомка геопрофілю з кожного каналу відбувається одночасно. Такі системи поширені у багатьох зарубіжних виробників, які спеціалізуються на геопрофілюванні дорожніх покриттів. Така система фактично містить кілька одноканальних георадарів та дозволяє значно зменшити час профілювання. Недоліком таких систем є громіздкість (вони значно більші за одноканальні) і висока вартість.

Багатоканальні георадари із синтезованою приймальною апертурою.

Це найскладніший тип георадарів, у якому одну передавальну антену припадає кілька прийомних, які синхронізовані між собою. Фактично такі георадари є аналогом фазованої антеної решітки. Основною перевагою таких систем є набагато більш чітке позиціонування об'єктів під землею — фактично вони працюють за принципом стереогляду, якби радар мав кілька очей-антен. Основним недоліком таких систем є дуже складні обчислювальні алгоритми, які необхідно вирішувати в реальному часі, що призводить до використання дорогих електронних компонентів, як правило, на основі FPGA і GPGPU. Зазвичай такі системи застосовуються лише у надпотужних георадарах із рознесеними антенами. У той же час, такі системи більш завадові і

дозволяють отримувати найбільш точну картину розподілу діелектричної проникності під землею.

За потужністю сигналу георадари поділяються на такі види:

- стробоскопічні (недорогі моделі, призначені для роботи на невеликій глибині);

- слабоімпульсні (найпоширеніший тип георадарів, що дозволяє проводити дослідження на глибині до 10 метрів);

- надпотужні (складні прилади, оснащені рознесеними антенами, які дають змогу отримувати відображення на глибині навіть кількох кілометрів).

В даний час більшість серійно вироблених радарів можна згрупувати в кілька підтипів, які відрізняються основними принципами функціонування:

Стробоскопічні георадари. Такі радари випромінюють переважно імпульси з невеликою енергією, близько 0.1-1 мкДж, але таких імпульсів випромінюється досить багато 40-200 тисяч імпульсів на секунду. Використовуючи стробоскопічний ефект, можна отримати дуже точну розгортку – радарограму у часі. Практично усереднення даних з безлічі імпульсів дозволяє значно поліпшити ставлення сигнал/шум. У той же час, потужність 0.1-1 мкДж накладає серйозні обмеження на глибину проникнення таких імпульсів. Зазвичай, такі радари використовують для глибин зондування до 10 метрів. Проте, в окремих випадках «пробивна» здатність сягає понад 20 метрів.

Слабоімпульсні радари. Такі радари випускають значно менше 500-1000 імпульсів на секунду, потужність кожного такого імпульсу вже значно вище і досягає 100мкДж. Оцифровуючи в кожному такому імпульсі одну точку з різним зрушенням від початку, можна отримати радарограму у часовій області без стробування. У той же час такий апарат дозволяє знімати близько однієї радарограми на секунду і практично не дозволяє використовувати усереднення для покращення відношення сигнал/шум. Це дозволяє отримувати радарограми з глибин у десятки метрів, але трактувати такі радарограми може лише навчений спеціаліст.

Надпотужні радари з рознесеними антенами. Такі радари випускають лише кілька імпульсів на секунду, але енергія імпульсу сягає 1-12 Дж. Це дозволяє значно покращити ставлення сигнал/шум і динамічний діапазон георадара і отримувати

відбиття від багатьох глибинних шарів або працювати на важких і вологих грунтах. Для обробки радарограми потрібне спеціальне програмне забезпечення, яке виробники таких георадарів поставляють у комплекті з георадаром. До недоліків потужних радарів можна віднести небезпеку радіоопромінення біологічних об'єктів та значну (до 2-3 метрів від поверхні) «мертву» зону. Існує альтернативна думка щодо радіоопромінення біооб'єктів надпотужними георадарами. Звичайний георадар знімає одну запис за безліч запусків (це з проблемами оцифровки сигналів). Надпотужний робить всього кілька запусків на секунду, (це призвело до того, що для цих георадарів довелося розробляти систему оцифрування сигналів не пов'язану зі стробоскопічним перетворенням). Якщо підрахувати випромінювану георадаром енергію за секунду, вийде звичайний георадар стріляє дуже часто, але невеликими імпульсами. А надпотужний видає великий амплітудою імпульс, але робить це рідко. Різниця параметрів така, що у другому випадку біооб'єкт падає менше випромінюваної енергії.

1.2 Принцип роботи георадару

Сучасний георадар є складним геофізичним приладом, що створюється при дотриманні певних технологій. Основний блок складається з електронних компонентів, що виконують такі функції: формування імпульсів, що випромінюються передавальною антеною, обробка сигналів, що надходять з приймальної антени, синхронізація роботи всієї системи. Таким чином, георадар складається з трьох основних частин: антени, блоку реєстрації та блоку управління. Антенна частина включає передавальну та приймальну антени. Під блоком реєстрації розуміється ноутбук чи інший записуючий пристрій, а роль блоку управління виконує система кабелів та оптико-електричних перетворювачів.

Георадар є високочастотним (від 10 МГц до 1000 МГц) методом електромагнітних хвиль високої роздільної здатності для отримання зображень

грунтів і наземних структур. Антена використовується для передачі та відновлення радіолокаційних імпульсів, що генеруються генератором імпульсів. Потім повернутий імпульс обробляється для отримання зображень профілю ґрунту. Основні геотехнічні застосування - це отримання зображень профілю ґрунту та визначення місця розташування похованих об'єктів. Георадар забезпечує безперервну роздільну здатність зображення ґрунтового профілю з дуже невеликим порушенням ґрунту. GPR не підходить для вологих глин та мулів з високою провідністю (0,15 міліом/м). Роздільна здатність георадару зменшується з глибиною.

Радари підповерхневого зондування призначені для вивчення середдіелектриків зі зміни діелектричної проникності та/або електропровідності. Найчастіше георадари застосовуються для інженерно-геотехнічного обстеження ґрунтів та неруйнівного контролю (неметалевих) будівельних конструкцій.

Принцип дії більшості сучасних георадарів той самий, що й у звичайних імпульсних радарів. У середовище, що вивчається, випромінюється електромагнітна хвиля, яка відображається від розділів середовищ і різних включень. Відображений сигнал приймається та записується георадаром.

В даний час більшість серійно вироблених радарів можна згрупувати в кілька підтипів, які відрізняються основними принципами функціонування:

Стробоскопічні георадари. Такі радари випромінюють переважно імпульси з невеликою енергією, близько 0.1-1 мкДж, але таких імпульсів випромінюється досить багато 40-200 тисяч імпульсів на секунду. Використовуючи стробоскопічний ефект, можна отримати дуже точну розгортку - радарограму в часі. Практично усереднення даних з безлічі імпульсів дозволяє значно поліпшити ставлення сигнал/шум. У той же час, потужність 0.1-1 мкДж накладає серйозні обмеження на глибину проникнення таких імпульсів. Зазвичай, такі радари використовують для глибин зондування до 10 метрів. Проте, в окремих випадках «пробивна» здатність сягає понад 20 метрів.

Слабоімпульсні радари. Такі радари випускають істотно менше 500-1000 імпульсів в секунду, потужність кожного такого імпульсу вже істотно вище і досягає 100 мкДж. Оцифровуючи в кожному такому імпульсі одну точку з різним зрушенням від початку, можна отримати радарограму у часовій області без стробування. У той

же час такий апарат дозволяє знімати близько однієї радарограми на секунду і практично не дозволяє використовувати усереднення для покращення відношення сигнал/шум. Це дозволяє отримувати радарограми з глибин у десятки метрів, але трактувати такі радарограми може лише навчений спеціаліст.

Надпотужні радари з рознесеними антенами. Такі радари випускають лише кілька імпульсів на секунду, але енергія імпульсу досягає 1-12 Дж. Це дозволяє значно покращити ставлення сигнал/шум і динамічний діапазон георадару і отримувати відбиття від багатьох глибинних шарів - аж до кілометрової глибини - або працювати на важких і вологих ґрунтах. Для обробки радарограми потрібне спеціальне програмне забезпечення, яке виробники таких георадарів поставляють у комплекті з георадаром. До недоліків потужних радарів можна віднести небезпеку радіоопромінення біологічних об'єктів та значну (до 2-3 метрів від поверхні) «мертву» зону. Існує альтернативна думка щодо радіоопромінення біооб'єктів надпотужними георадарами. Звичайний георадар знімає одну запис за безліч запусків (це з проблемами оцифровки сигналів). Надпотужний - робить всього кілька запусків на секунду (це призвело до того, що для цих георадарів довелося розробляти систему оцифрування сигналів, не пов'язану зі сторобоскопічним перетворенням). Якщо підрахувати випромінювану георадаром енергію за секунду, то вийде, що звичайний георадар стріляє дуже часто, але невеликими імпульсами. А надпотужний видає великий амплітудою імпульс, але робить це рідко. Різниця параметрів така, що у другому випадку біооб'єкт падає менше випромінюваної енергії.

Для всіх вищезгаданих типів радарів є можливість використання одного або декількох каналів. І тут умовно можна розділити всі ці георадари ще кілька класів:

Одноканальні георадари. У таких георадарах є один передавач і один приймач, більшість компаній-виробників георадарів мають одноканальні георадари.

Багатоканальні парні георадари. У таких георадарах є кілька пар приймач-передавач, тому зйомка геопрофілю з кожного каналу відбувається одночасно. Такі системи поширені у багатьох зарубіжних виробників, які спеціалізуються на геопрофілюванні дорожніх покриттів. Така система фактично містить кілька

одноканальних георадарів і дає змогу в рази зменшити час профілювання. Недоліком таких систем є громіздкість (вони в рази більші за одноканальні) і висока вартість.

Багатоканальні георадари із синтезованою приймальною апертурою. Це найбільш складний тип георадарів, в якому на одну антену, що випускає, припадає кілька прийомних, які синхронізовані між собою. Фактично такі георадари є аналогом фазованих решітки. Основною перевагою таких систем є набагато чіткіше позиціонування об'єктів під землею - фактично вони працюють за принципом стерео зору, як би у радара було б кілька очей-антен. Основним недоліком таких систем є дуже складні обчислювальні алгоритми, які необхідно вирішувати в реальному часі, що призводить до використання дорогих електронних компонентів, як правило, на основі FPGA і GPGPU. Зазвичай такі системи застосовуються лише у надпотужних георадарах із рознесеними антенами. У той же час, такі системи більш завадові і дозволяють отримувати найбільш точну картину розподілу діелектричної проникності під землею.

Георадар працює шляхом передачі невеликого імпульсу надширокосмугової електромагнітної енергії досліджуваний матеріал, а потім записує час, необхідний для повернення частини або всієї цієї енергії, а також міру потужності її сигналу.

Антена георадару, яка містить як передавальні, так і приймальні елементи, розміщується на поверхні землі (або досліджуваного матеріалу) або дуже близько до неї і переміщається по ній для сканування області.

Шляхом безперервної передачі імпульсів та реєстрації відповідних відображень можна створити радарограму надр та переглянути її в режимі реального часу на відповідному екрані (ПК/планшет).

Зміни у складі надр можна побачити на основі вмісту повітря, мінералів та води, наявності корінних порід чи інших геологічних особливостей, а також таких об'єктів, як підземні інженерні комунікації.

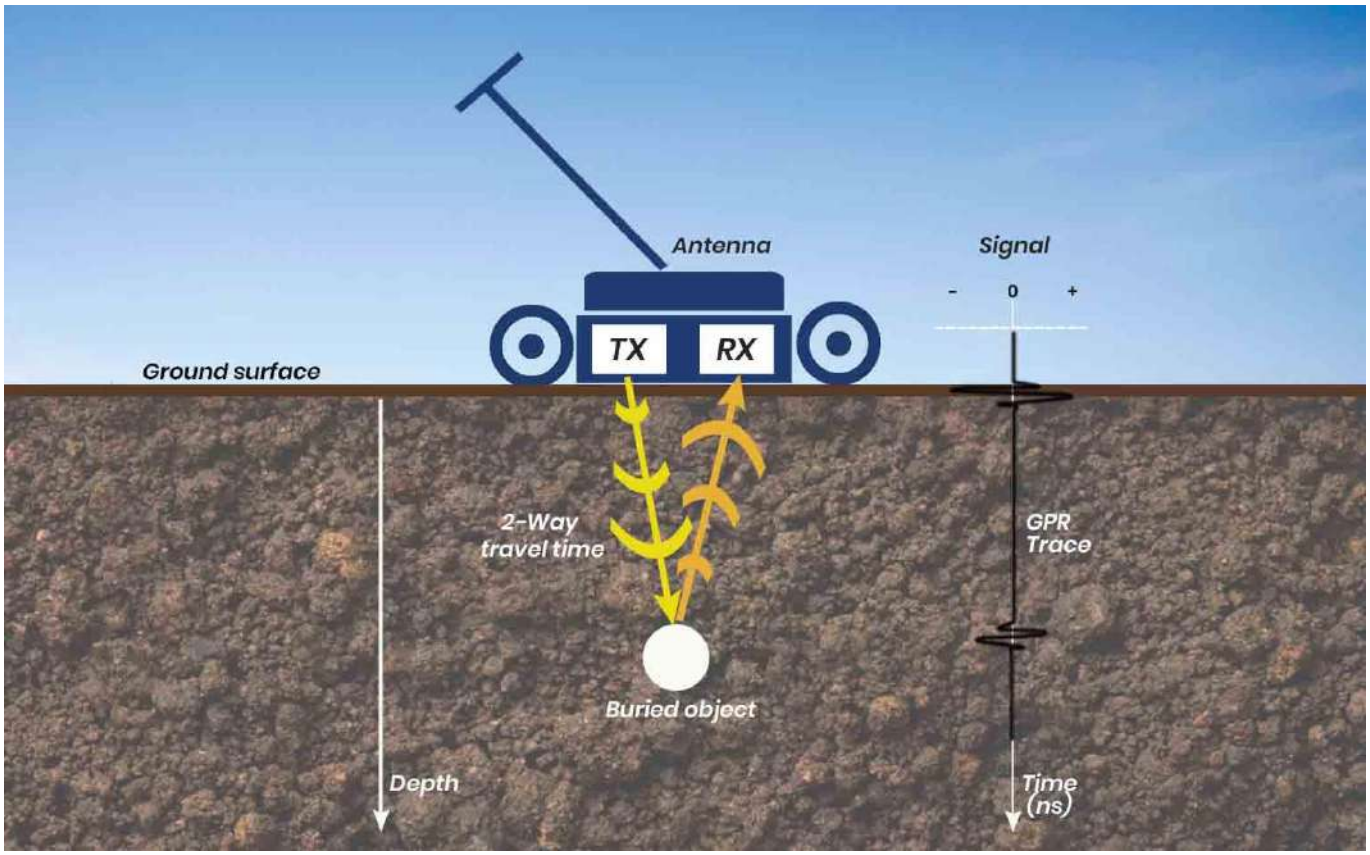


Рисунок 1.1 – Структура роботи георадару

Методи вибірки сигналу

Усі георадарні системи повинні знімати аналогові сигнали з антени та оцифровувати їх для обробки та відображення. Метод відбору проб, і навіть швидкість відбору проб можуть суттєво вплинути якість результатів. Отже, частота дискретизації є важливою характеристикою, що визначає продуктивність системи.

Традиційно в георадарних системах використовується метод, званий «еквівалентна тимчасова вибірка», який вимагає відправки нового імпульсу з антени, що передає, для кожної вибірки, записаної на стороні приймача. Системи, використовують цей метод, широко відомі як звичайні георадари.

Однак сучасні компоненти тепер дозволяють використовувати метод, який називається вибіркою в реальному часі або RTS, і саме цей метод використовується в проектах ImpulseRadar. Як випливає з назви, це означає, що реальний сигнал захоплюється безпосередньо і, на відміну від звичайних систем, не вимагає

повторення циклу передачі-запису. У результаті система георадару збирає дані у тисячі разів швидше, ніж звичайна.

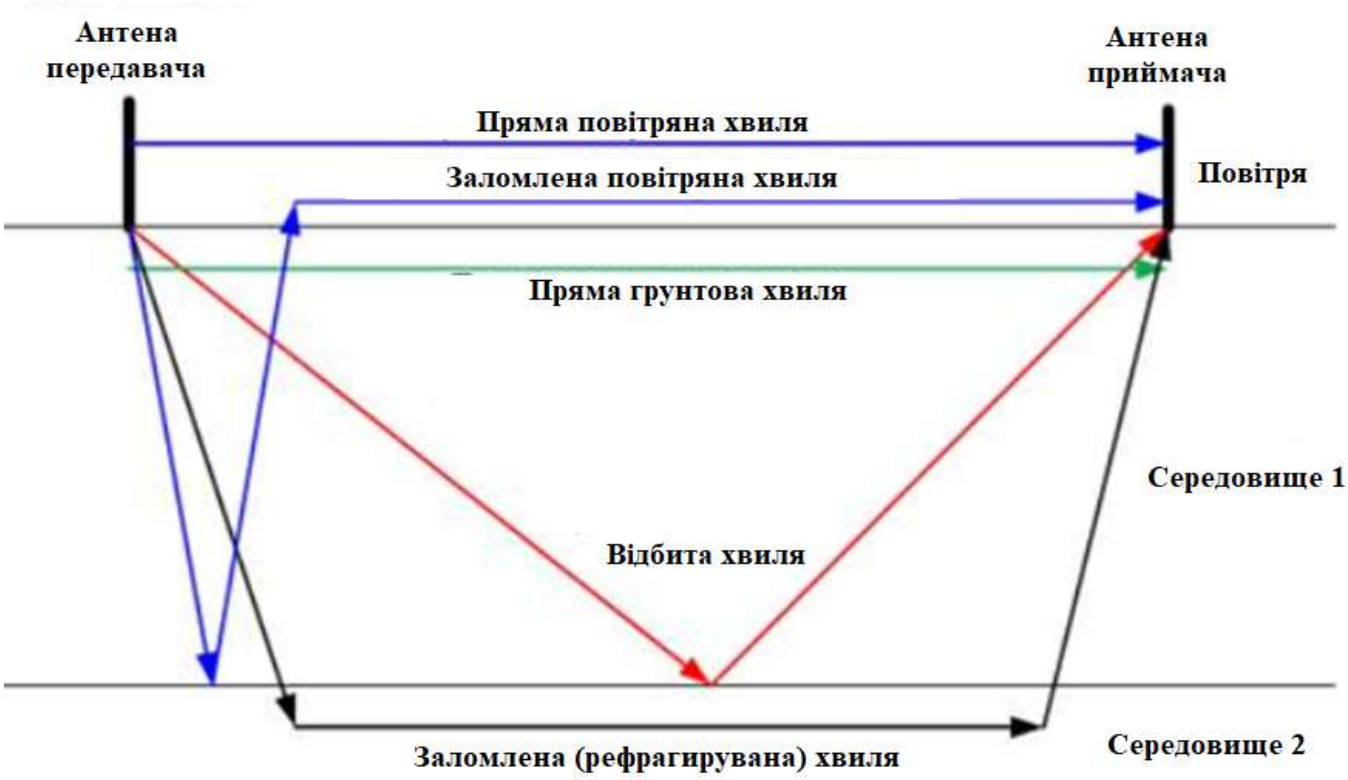


Рисунок 1.2 – Розповсюдження радіохвиль при використанні георадару

Обробка георадарних даних

Зазвичай називається постобробкою, при якій необроблені георадарні дані (зібрані та збережені на місці) можуть керуватися та переглядатися (за межами майданчика) за допомогою програмного забезпечення для ПК. Обробка даних георадара може допомогти в аналізі та інтерпретації результатів.

Практика пост-обробки георадарних даних часто може бути більш ефективною, ніж спроба розмітити та прийняти рішення безпосередньо на місці. Досвід оператора, складність об'єкта та/або тимчасові обмеження проекту можуть сприяти такому підходу. Як правило, дані постобробки є більш докладними та надають більше інформації для ухвалення важливих рішень.

ImpulseRadar пропонує програмне забезпечення для обробки як 2D-, так і 3D-даних для підтримки наших продуктових лінійок, а кілька сторонніх постачальників

пропонують програмне забезпечення для обробки георадарних даних, яке підтримує наші формати даних.

Для формування імпульсів малої тривалості використовується збудження широкосмугової антени, що передає, перепадом напруги з дуже короткими фронтами (так званий ударний метод збудження). Вибір тривалості імпульсу є компромісом між необхідною глибиною зондування і роздільною здатністю приладу – чим коротший імпульс, тим вища роздільна здатність, але менша глибина зондування. Існуючі георадари, побудовані за цим принципом, працюють зазвичай в діапазоні 10 2000 МГц, при цьому тривалість зондуючого імпульсу становить 0,5 10 нс. Такі сигнали мають широкий спектр, і для їх обробки потрібні широкосмугові приймальні системи зі смугою 53000 МГц.

Пряма обробка імпульсів такої малої тривалості досить складна. Тому для спрощення технічних рішень, що забезпечують прийом і обробку широкосмугових сигналів, використовується стробоскопічне перетворення, в процесі якого часовий інтервал реалізації розбивається на необхідну кількість точок, в кожній з яких значення сигналу фіксується в одному періоді зондування. При цьому короткий широкосмуговий сигнал, що надходить на вхід приймача, перетворюється на тривалий сигнал низькочастотного діапазону, обробка та відображення якого не становить технічних труднощів.

Випромінений передавальною антеною в досліджуване середовище електромагнітний імпульс відбивається від предметів, що знаходяться в ній (як металевих, так і неметалевих), або будь-яких неоднорідностей, що мають відмінну від середовища діелектричну проникність або провідність. Такими неоднорідностями можуть бути порожнечі, межі поділу шарів різних порід, ділянки з різною вологістю тощо.

Відбитий сигнал приймається приймальною антеною, перетворюється на цифровий вигляд і запам'ятовується для подальшої обробки.

При переміщенні георадару поверхнею досліджуваного середовища на екран монітора виводиться сукупність сигналів (радарограма чи профіль), яким можна визначити місцезнаходження, глибину залягання і протяжність об'єктів.

Необхідність подальшої обробки радарограми пояснюється кількома причинами. По-перше, для вирішення інженерних завдань необхідно мати залежність амплітуди сигналу від глибини його відображення, тоді як вихідна радарограма є залежністю амплітуди сигналу від часу відображення. По-друге, необхідно позбавлятися різного роду перешкод, що приховують корисний сигнал.

Обробка радарограм здійснюється у спеціальних програмних комплексах: GeoScan32, ГЕОРАДАР-ЕКСПЕРТ, Крот, Easy3D, Prism. У наукових цілях використовується також система моделювання георадарних даних GprMax, заснована на методі кінцевих різниць, і продукт MatGPR, що вільно розповсюджується за ліцензією GNU, написаний на базі MATLAB.

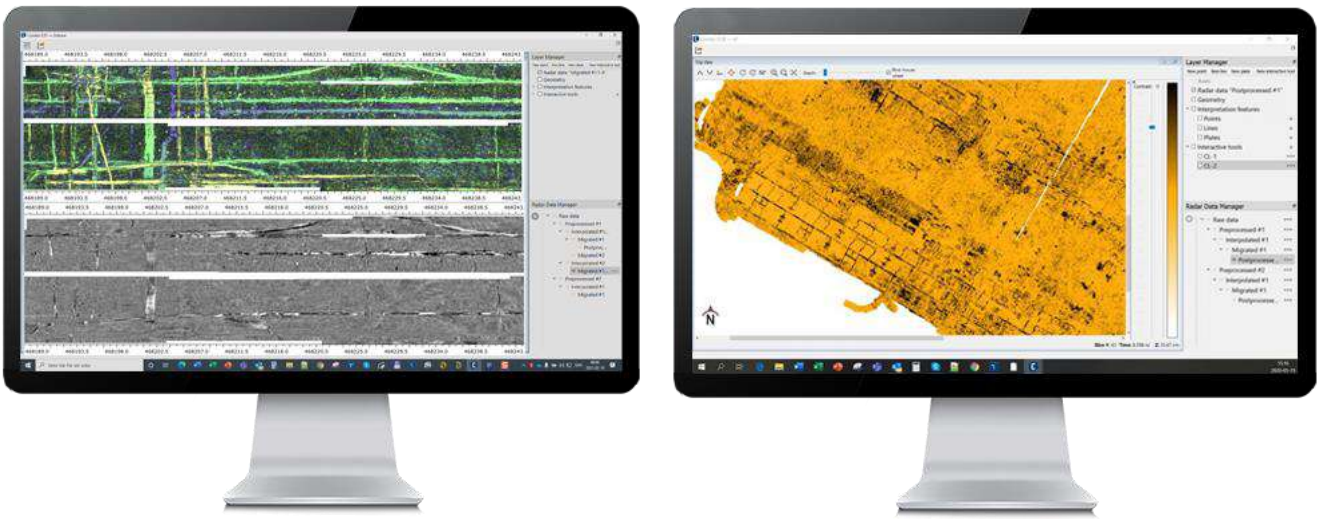


Рисунок 1.3 – Обробка даних георадару у GeoScan32

Рисунок 1.4 – Обробка даних георадару у Prism

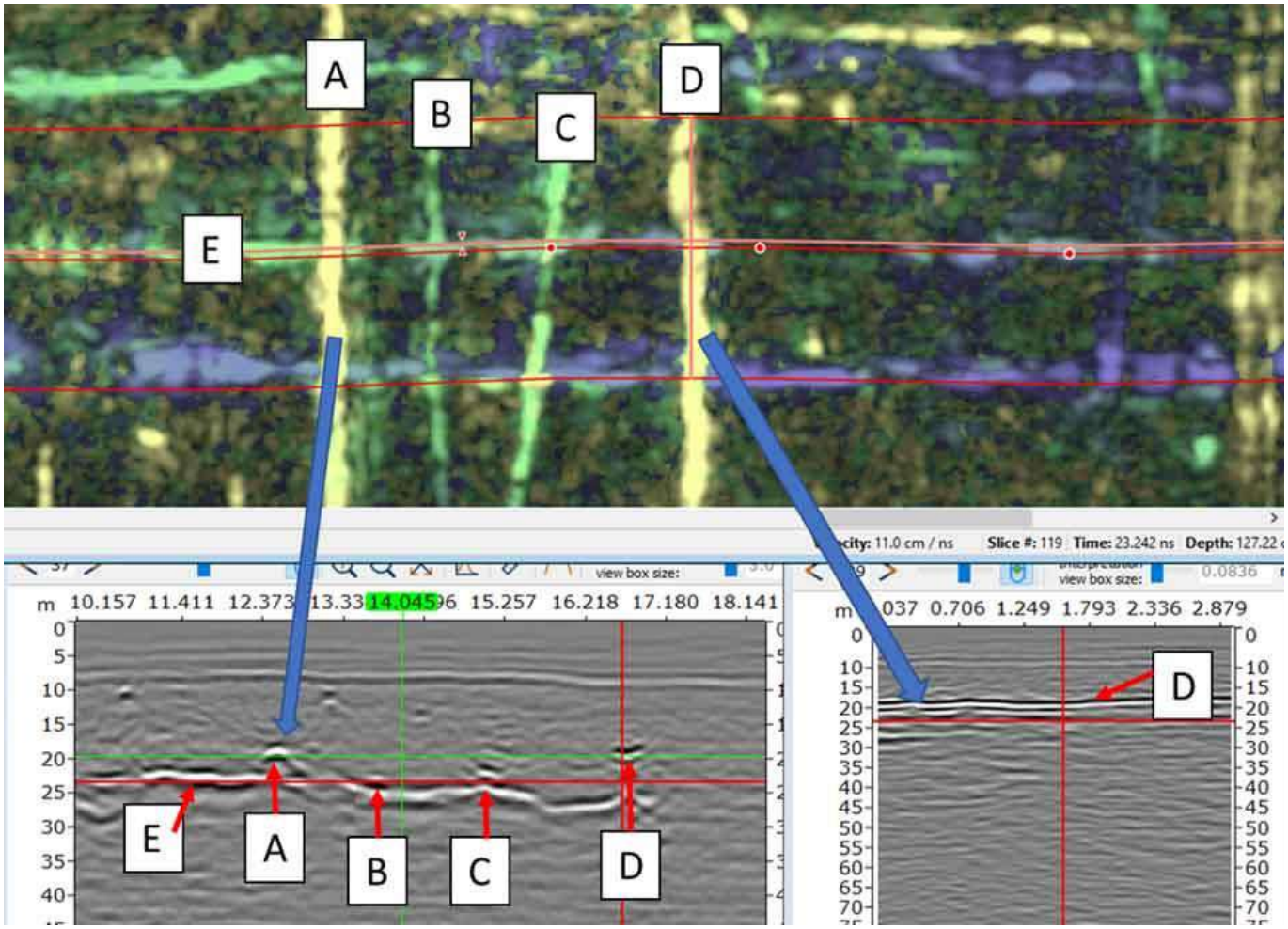


Рисунок 1.5 – Виявлення шарів грунту у програмах обробки

1.3 Постановка задач магістерської роботи

Зараз актуальним є питання виявлення металевих предметів під землею, оболиво це стосується мін та всіляких уламків снарядів, а отже виникає питання не лише визначення певного матеріалу, а й його форми. Тому у роботі були поставлені задачі розробки власно системи з використанням методів та алгоритмів, що будуть враховувати форму металевих предметів.

В роботі ставляться задачі розробки георадару, що має наступні параметри:

- тип радару FMCW;
- використання модульних підсистем, які дозволяють замінювати компоненти для реалізації варіантів дизайну та отримувати більше розуміння у випадку навчальної діяльності;
- пристрій, керований ПК для інтерактивного керування георадаром;
- розгортка частоти: fmjn=1,3 ГГц, fmax=2,6 ГГц;
- вибір меншого інтервалу для частот використання;
- вибір форми хвилі модуляції;
- вибір модуляційного періоду хвилі;
- використання COTS (компоненти готові);
- низька вартість.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОБОТИ ТА ВИБІР АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ

2.1 Методика роботи георадару та структурна схема

Робота радара FMCW базується на безперервному випромінюванні синусоїдальної форми (CW), частота якої модулюється відповідним чином (FM).

Як і CW радар, FMCW радар використовує ефект Доплера та може вимірювати швидкість виявлених рухомих об’єктів. Крім того, радіолокатор FMCW перевищує обмеження радара CW щодо можливості вимірювання відстані до виявлених стаціонарних об’єктів через відсутність прив’язки часу.

FMCW радар передає сигнали, які періодично змінюють частоту. Коли радар отримує сигнал з частотою, що відрізняється від переданого сигналу в цей момент, він отримує затримку At, корельовану зі зсувом часу виконання.

Отже, базова конструкція РЛС FMCW показує:

- прийняття гетеродина (LO);
- отриманий сигнал, належним чином посилений, змішується з LO для створення биття;
- частота сигналу биття пропорційна відстані між виявленим об'єктом і радаром.

Включивши пристрій VCO як гетеродин, ми можемо виконувати різні частотні модуляції, змінюючи форму сигналу керування напругою: зубчастий, трикутний прямокутний ступінчастий.

Рисунок 2.1 – Форми генерованого сигналу

Переданий чирп-сигнал у часовій області є лінійним нахилом у частотній області.

$$f' = \frac{f_1 - f_o}{T_{mod}}$$

Рисунок 2.2 – Форма та перетри трикутного сигналу гетеродину

Переданий сигнал - це частотно-модульована синусоїда

$$S_{Tx} = sin\left[2\pi t\left(f_o + \frac{f' \cdot t}{2}\right)\right] \tag{2.1}$$

Отриманий сигнал - це затримана синусоїда, знову частотно-модульована

$$S_{Rx} = sin\left[2\pi(t - t_d)\left(f_o + \frac{f' \cdot (t - t_d)}{2}\right)\right] \tag{2.2}$$

де затримка співвідносить відстань до об’єкта (d) і швидкість світла в середовищі (c),

$$t_d = \frac{2d}{c} \tag{2.3}$$

Коли переданий і прийнятий сигнали змішуються і фільтруються за допомогою фільтра низьких частот, результуючий сигнал (Sout) показує частоту (fout), пропорційну відстані до цілі

$$f_{out} = f' \cdot t_d \tag{2.4}$$

Максимальний радіус дії радара FMCW залежить від ширини розгортки частоти

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot (f_1 - f_o)} \tag{2.5}$$

Застосування швидкого перетворення Фур'є до вихідного сигналу дозволяє отримати частотні дані, а отже, обчислити відстань до кількох виявлених об'єктів.

Використання фільтра низьких частот збільшує співвідношення сигнал/шум, зменшуючи широкосмуговий високочастотний шум.

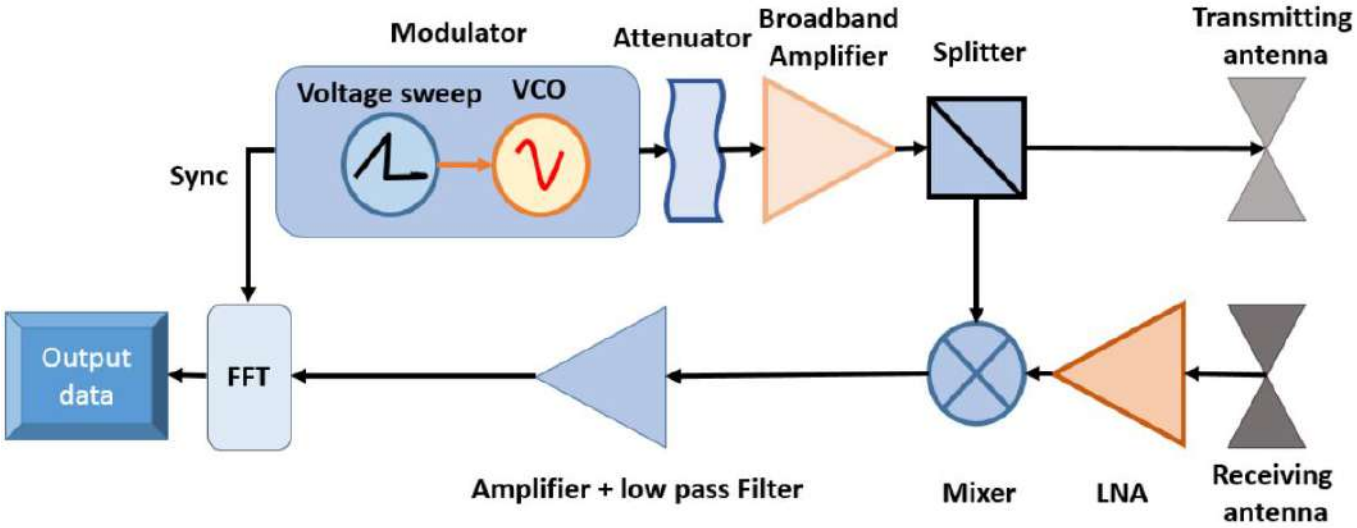


Рисунок 2.3 – Базова структурна схема проектованого георадару

2.2 Вибір компонентів для радіочастотної частини георадару

Щоб збільшити інтерактивні функції та універсальність форм модуляції, було замінено аналоговий функціональний генератор на універсальну плату мікроконтролера (MCU) mbed LPC1768 з високопродуктивним ядром ARM Cortex-M3.

В процесі проетування було змінено структурну схему радара FMCW з базової на нову версію, яка додає лінії управління та підключення до ПК.

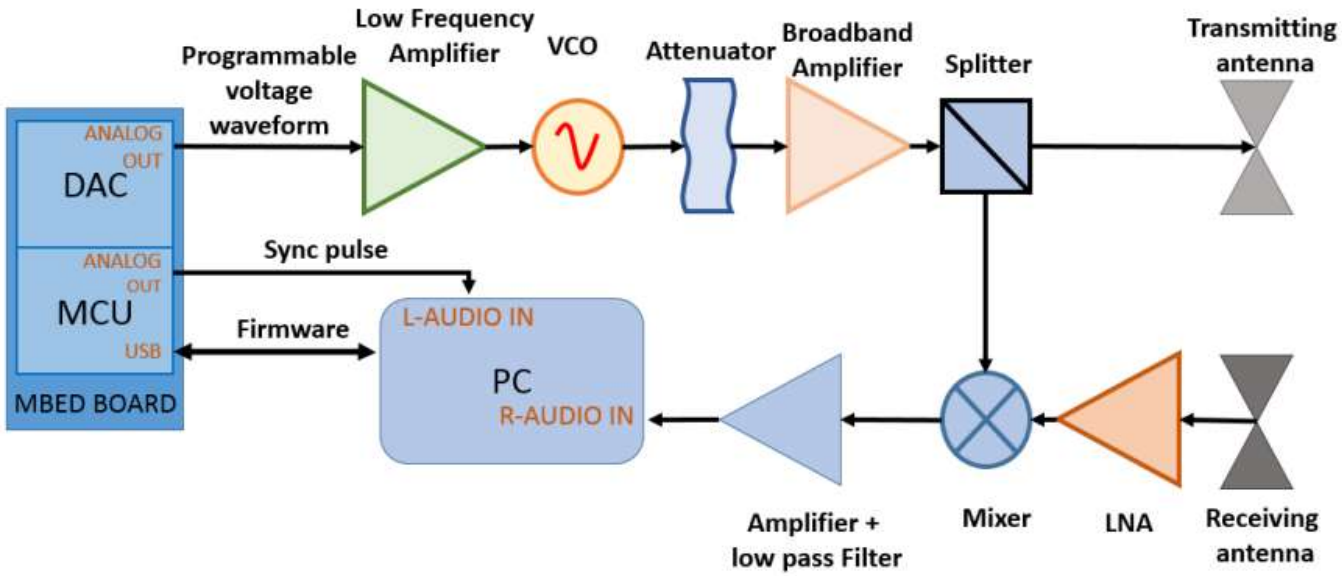


Рисунок 2.4 – Змінена структура проектованого георадару

Компоненти та пристрої, включені в проект, вимагають джерела постійної напруги не завжди однакового значення. Отже, проект георадара повинен доповнюватися проектом системи живлення, щоб генерувати всі необхідні рівні напруги. Крім того, щоб забезпечити належну автономність роботи, буде вставлено перезаряджувану літієву батарею 12 В.

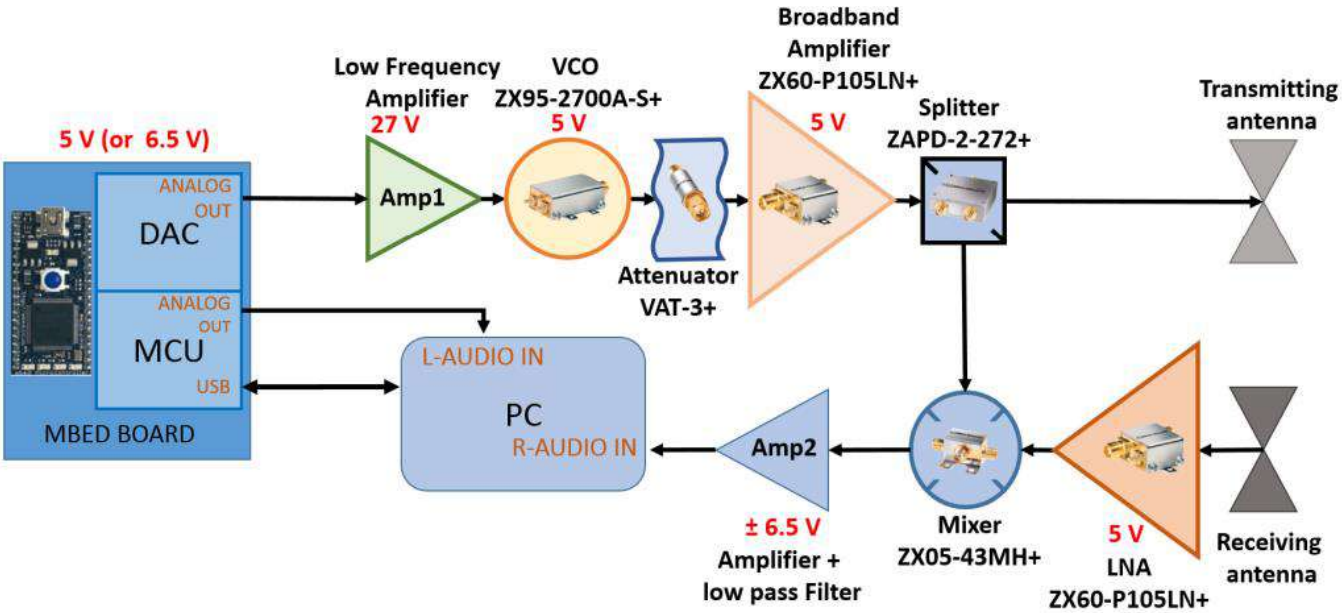


Рисунок 2.5 – Компоненти живлення на структурній схема георадару

Для реалізаці схеми радіочастотної частини георадару були обрані компоненти, що наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Специфікація чадіочастотної підчастини.

Найменування	Кіл-ть	Опис
ZX95-2700A-S+	1	Генератор із керуванням напругою Широкий діапазон від 1300 до 2700 МГц
VAT-3+	1	Фіксований аттенюатор SMA 50Q 1 Вт 3 дБ від постійного струму до 6000 МГц
ZX60-P105LN+	2	Підсилювач з низьким рівнем шуму 500 від 40 до 2600 МГц
ZAPD-2-272-S+	1	Розгалужувач/об'єднувач потужності 2 Way-0° 500 800 до 2700 МГц
ZX05-43MH-S+	1	Частотний змішувач, широкосмуговий рівень 13 (потужність LO +13 дБм) від 824 до 4200 МН
SM-SM50+	4	Адаптер, SMA-M на SMA-M 500 DC на 18 ГГц
086-12SM+	3	Коаксіальний кабель 50 Ом DC до 18 ГГц

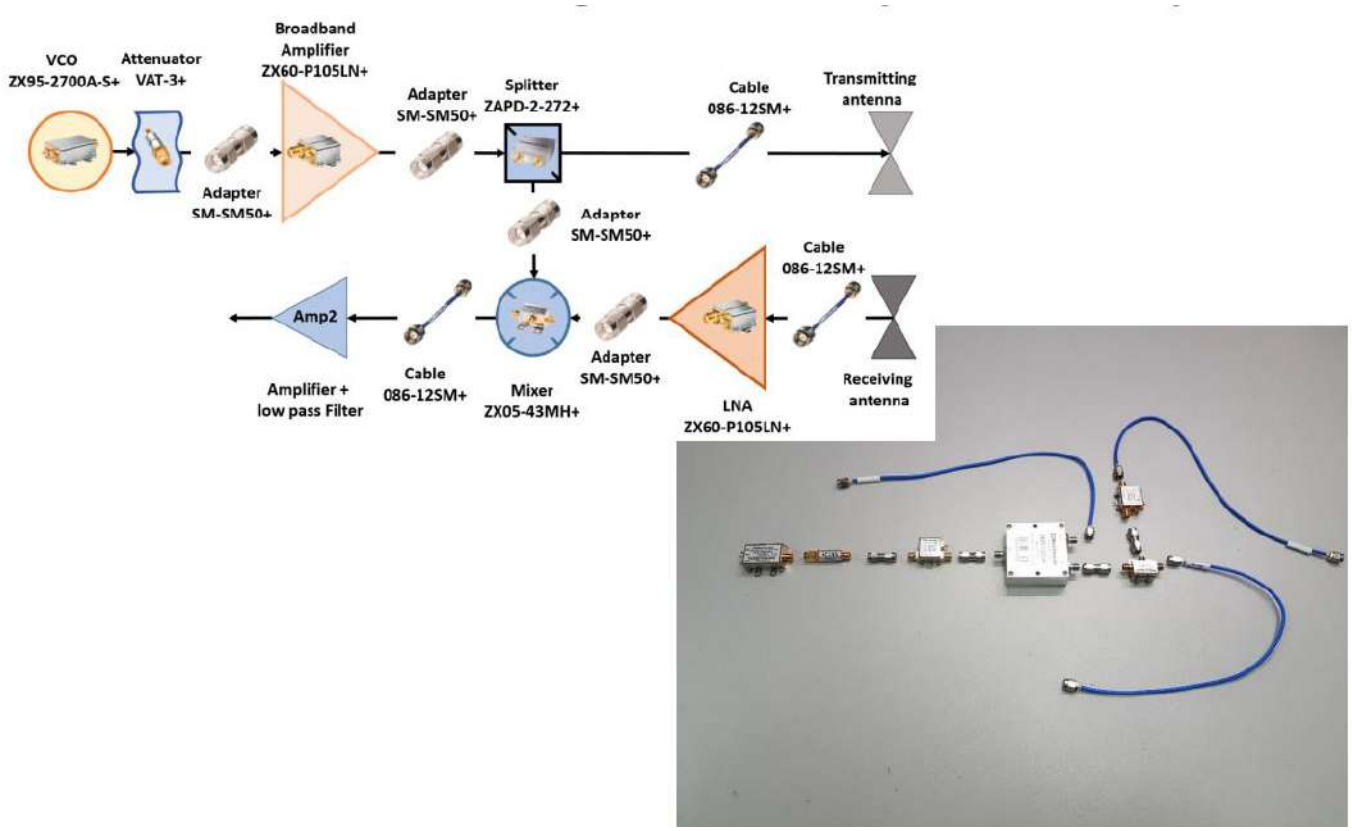


Рисунок 2.6 – Обрані компоненти радіочастотної частини

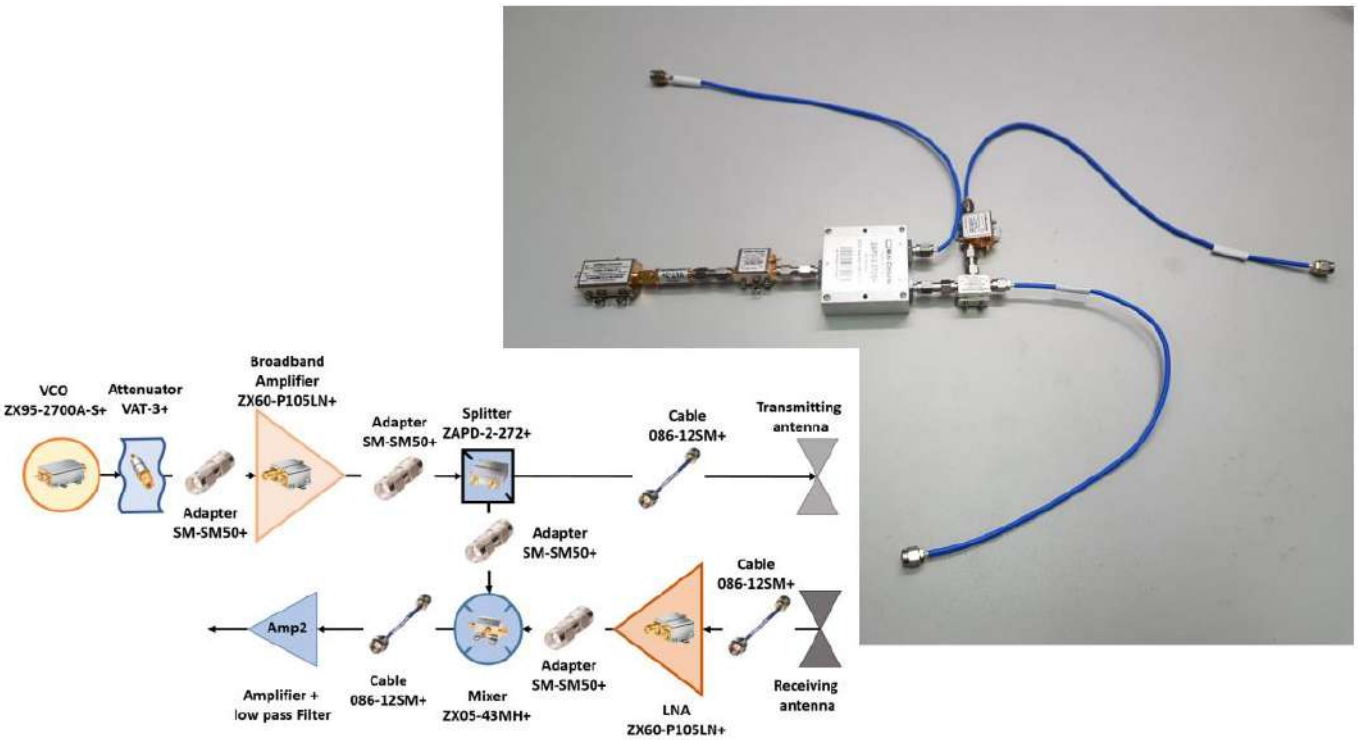


Рисунок 2.7 – Зібрана радіочастотна частина георадару

2.3 Вибір компонентів для інших вузлів георадару

Решта вузлів георадару побудовані за допомогою друкованих плат. Щоб спростити реалізацію друкованих плат, ми використовували одношарові друковані плати, щоб можна було виготовити без замовлення на заводі.

Після проетування процес виготовлення тестових зразків був розбитий на наступні етапи:

- після створення макета друкованої плати за допомогою програмного засобу для проектування друкованої плати та лазерного принтера, фоторезист потрібно помістити поверх мідного шару для його покриття;
- використовуючи пристрій для вирівнювання маски, позитивна фоторезистна плівка (наприклад, AZ1518), нанесена на шар міді;
- після цього була зроблена операція м’якого випікання протягом однієї хвилини із сумішшю проявника AZ 351B і деіонізованої води за об’ємом: 1 частина проявника та 4 частини води для отримання гарного контрасту при темпаратурі 100°C;
- за допомогою мікроскопа перевірили, чи всі з’єднання правильні;
- у фазі твердого випікання плата підігрівається при 115°C за допомогою технології HT-302D ATV протягом 2 хвилин;
- останнім етапом є ванна в розчині хлорного заліза протягом приблизно 10 хвилин;
- плату потрібно очистити ацетоном і можна зробити лудіння, додавши шар олова, щоб допомогти наступній операції припаювання компонентів.

Для підсистеми підсилення низької частоти було обрано компоненти, що наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Перелік компонентів підсистеми підсилювача низької частоти (Amp1).

Номер частини	Кіл-ть	Опис
LT1077S8#PBF	1	Micropower, Single Supply, Precision Opera Amp (Ul)
WCR0805-1M0FI	1	Резисторна мікросхема SMD, 1 Мег, 150 В, 0805 [2012 Metrico], 125 мВт, ± 1% (Rl)
ERJ3EKF5763V	1	Резистор SMD, 576k0±l%,0,iw, ±1% (R2)
CRCW08053 MOOF KEA	2	Резистор SMD, 3MO, ±1%, 0.125W (R3, R4)
282834-2	3	2-позиційний провід до клемної колодки плати горизонтально з платою 0,100 дюйма (2,54 мм) через отвір (P1, P2, P3)

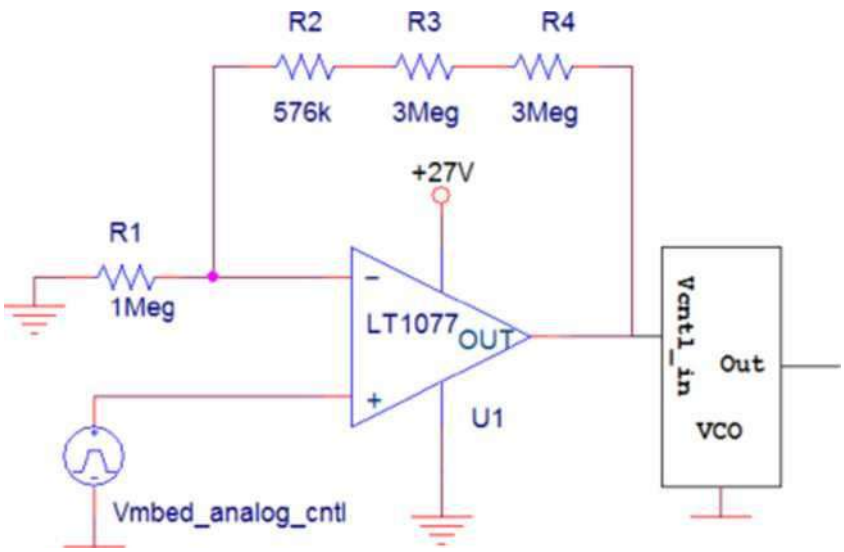


Рисунок 2.8 – Схема підсистема підсилювача низької частоти (Amp1)

Значення резисторів призводять до посилення неінвертуючого каскаду, що дорівнює Av=7,576.

Сигнал Vmbed_analog_out, який показує діапазон амплітуди 0-3,3 В, посилюється у відповідному інтервалі амплітуди 0-25 В вихідного сигналу (Vcntl_in).

Цей інтервал збігається з максимальним діапазоном керуючої напруги VCO і дозволяє максимальний діапазон зсуву частоти.

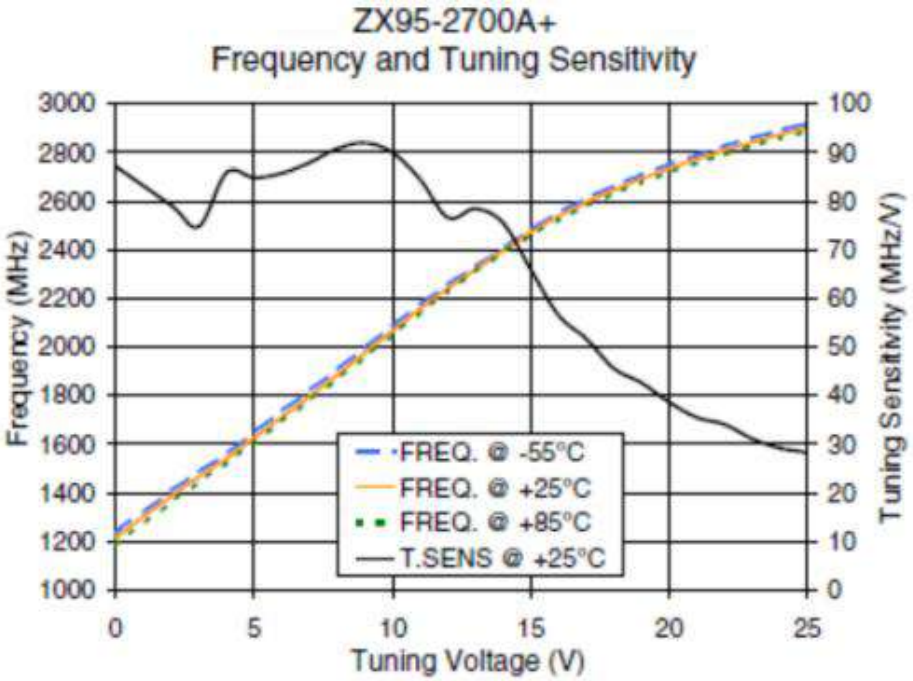


Рисунок 2.9 – Залечність частоти від напруги для VCO ZX95-2700A+

У випадку трикутної ЧМ нелінійна характеристика «налаштування напруга-частота» VCO вимагає використання форми хвилі керуючої напруги, відмінної від трикутної, для компенсації компресії, що проявляється при більш високих значеннях напруги.

У будь-якому випадку ми можемо створити максимальну частоту, що дорівнює 2902,5 МГц (@25°C)

На жаль, вибір широкосмугового підсилювача ZX60-P105LN+ був результатом компромісу між продуктивністю та ціною. Отже, верхня частотна межа смуги пропускання підсилювача визначає максимальне значення дозволеної частотної модуляції.

При використанні цього широкосмуговий підсилювач, можливі дві альтернативи:

- встановити 2600 МГц як максимальну частоту, яку оператор може вибрати у вхідних даних (недоліком є використання меншої динаміки для аналогового виходу mbed, тобто 2,24 В замість максимального значення 3,3 В);

- щоб збільшити роздільну здатність даних, треба відрегулювати значення посилення підсилювача, тобто Av=5,15 (це призводить до необхідності підбору нових значень опорів і зміни в прошивці неминучі).

Мінімальне значення використовуваного періоду трикутної хвилі становить приблизно 0,625 мс. Коли частота тієї самої трикутної хвилі перевищує 1,6 кГц, посилення підсилювача поступово зменшується, а значення керуючої напруги VCO є неправильним.

Якщо генеруються прямокутні або ступінчасті сигнали, треба враховувати значення SR (швидкість наростання) того самого підсилювача, визначене в діапазоні 0,07-0,12 В/мс, що обмежує вибір діапазону ширини кроку.

В програмі Sprint Layout було проведено проектування плати підсилювачча низької частоти (рис.2.10) з подільшим її виготовленнм (рис.2.11).

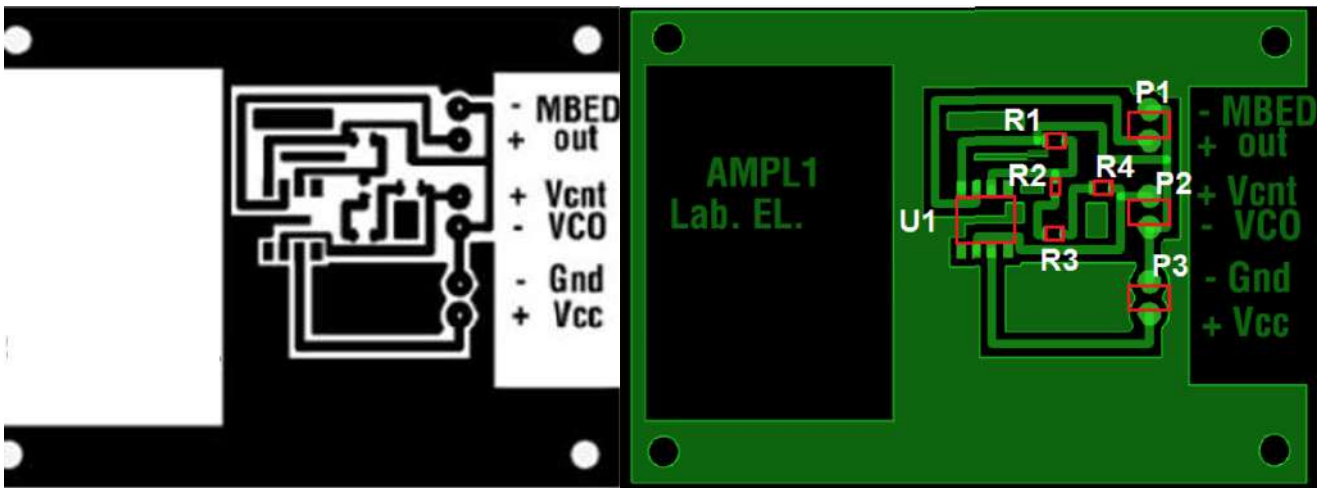
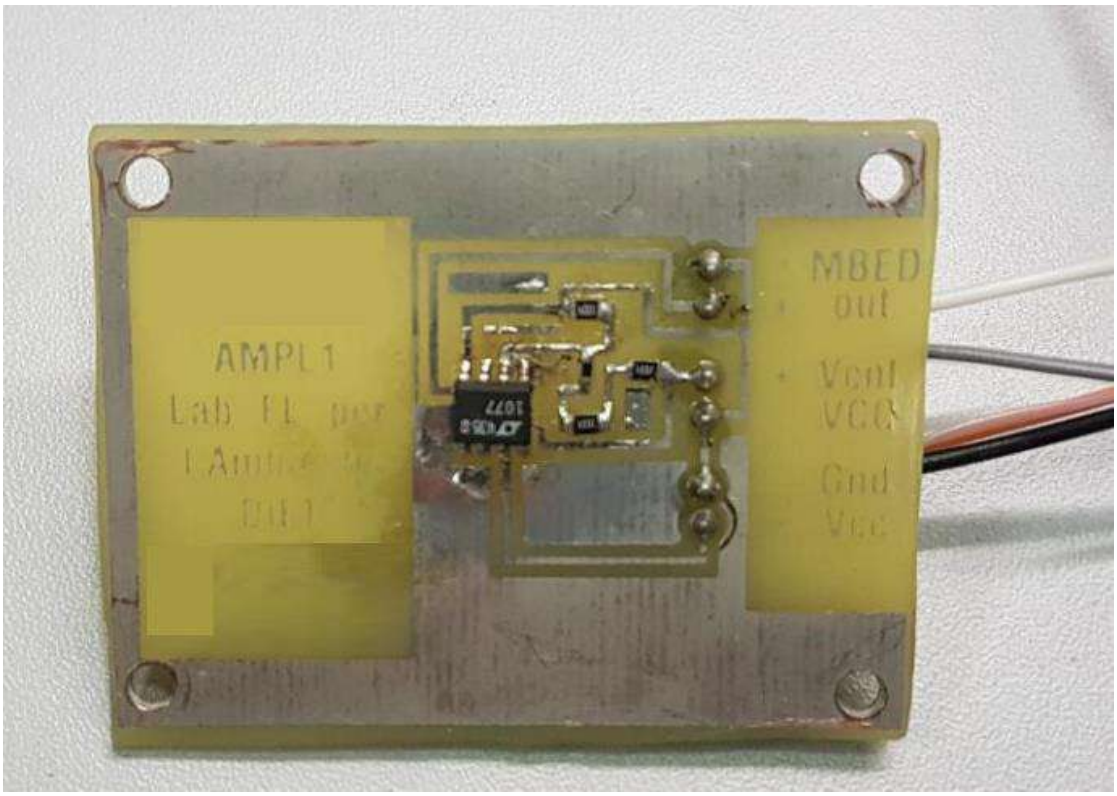


Рисунок 2.10 – Розроблена конструкція плати підчилювача низької частоти



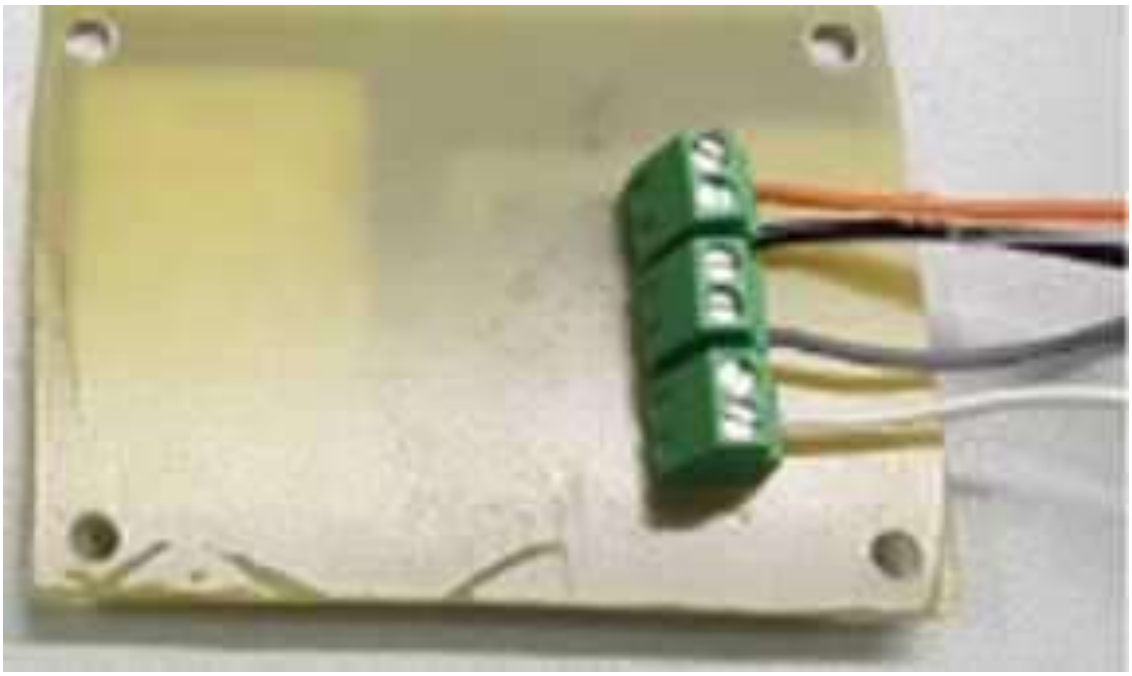


Рисунок 2.11 – Виготовлена конструкція плати підчилювача низької частоти

Для фільтру низьких частот були обрані компоненти наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Перелік компонентів підсистеми фільтру низьких частот підсилювача (Amp2).

Номер частини	К-ть	Опис
OP467	1	Quad Precision, високошвидкісний операційний підсилювач IC OPAMP GP 28MHZ 14DIP (OP467GP)
CCF0710K0JKE36	1	RES 1/4W 10K 5% (Rl)
RN55D8451FB14	1	RES 8.45K 1/8W 1% AXIAL (R4)
MFR-25FBF52-7K15	1	RES 7.15K 1/8W 1% AXIAL (R5)
YR1B102KCC	1	RES 102K 1/4W 1% AXIAL (R6)
RN60D1212FB14	1	RES 12.IK OHM 1/4W 1% AXIAL (R8)
RN55C1001FB14		RES IK 1/8W 1% AXIAL (R7, R13)
RN55D1742FB14	1	RES 17.4K 1/4W 1% AXIAL (R9)
MFR-25FBF52-28K	1	RES 28K 1/4W 1% AXIAL (RIO)
MFR-25FBF52-4K12	1	RES 4.12K 1/4W 1% AXIAL (Rll)
RN55D1621FB14	1	RES 1/8W 1.62K 1% (R12)
RN55D1100FRE6	2	RES 1/8W llOohms 1% lOOppm (R2,R3)
RN55D1100FRE6	2	RES 1/8W llOohms 1% lOOppm (R2,R3)
CFR16J47K	1	RES47K 1/4W 1200PPM (R14)
489D105X0025A6VE3	1	CAP luF ±20% 25V c.c., +85°C (Cl)
A102J15C0GF5TAA	4	CAP l000pF 50V 5% COG Axial (C2,C3,C4,C5)
PV36Y103C01B00	1	Trimmer resistivo Murata serie PV36W 10kQ, ±10%, 0,5W, 25 turn (Trimmer)
901-9889-RFX	1	Роз’єм, радіочастотний коаксіальний, sma blkhd ecept, передня частина, кріплення, клема для пайки, нікелева яма [V_beat(Jl)]
282834-3	1	3 позиції проводу до клемної колодки плати горизонтально з платою 0,100 дюйма (2,54 мм) через отвір (PI)
282834-2	1	2-позиційний провід до клемної колодки плати горизонтально з наскрізним отвором плати 0,100 дюйма (2,54 мм) (P2)

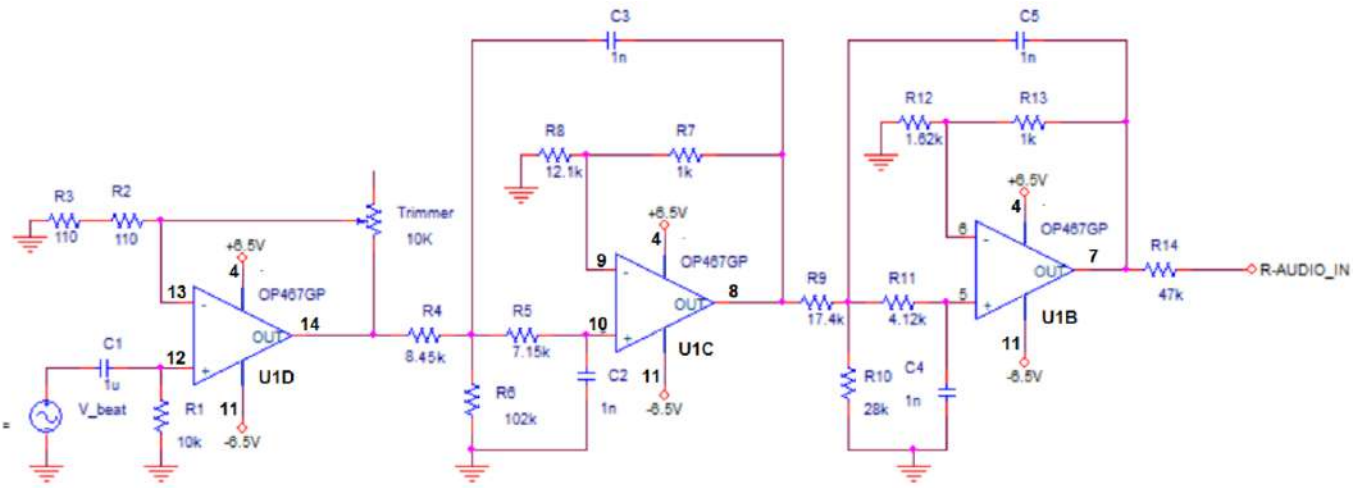


Рисунок 2.12 – Схема фільтру низьких частот підсилювача (Amp2)

Посилення встановлюється тримером, а модулі фільтрації визначають максимальну частоту смуги частот близько 15 кГц.

В програмі Sprint Layout було проведено проектування плати фільтру низьких частот підсилювача (Amp2) (рис.2.13) з подільшим її виготовленнм (рис.2.14).

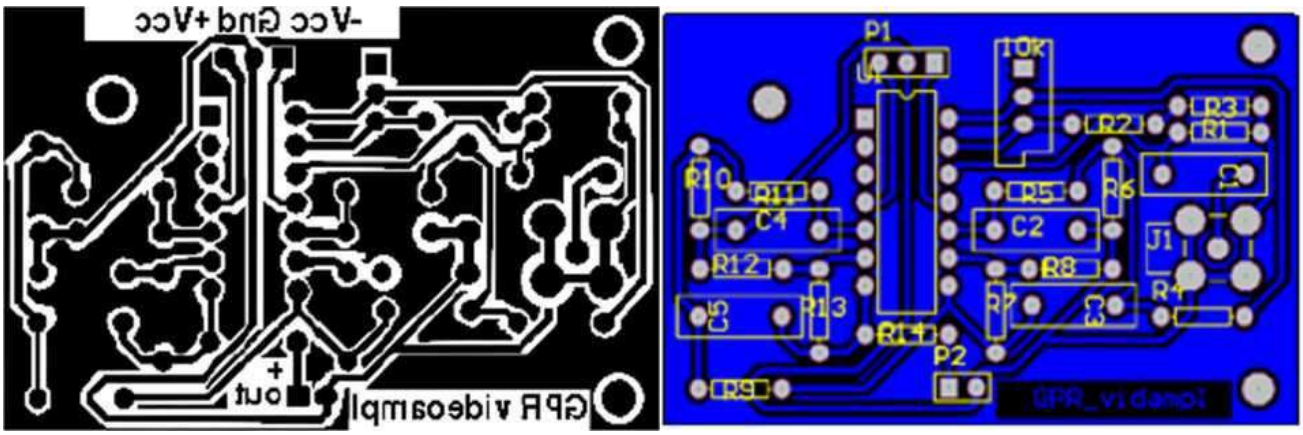


Рисунок 2.13 – Розроблена конструкція плати фільтру низьких частот підсилювача (Amp2)

Для забезпечення роботи контакт «+ out» необхідно підключити до роз’єму P2 за допомогою дроту до правого каналу аудіовходу ноутбука. Такий самий роз’єм, який використовується для плати mbed (сигнал «+ Sync pulse»).

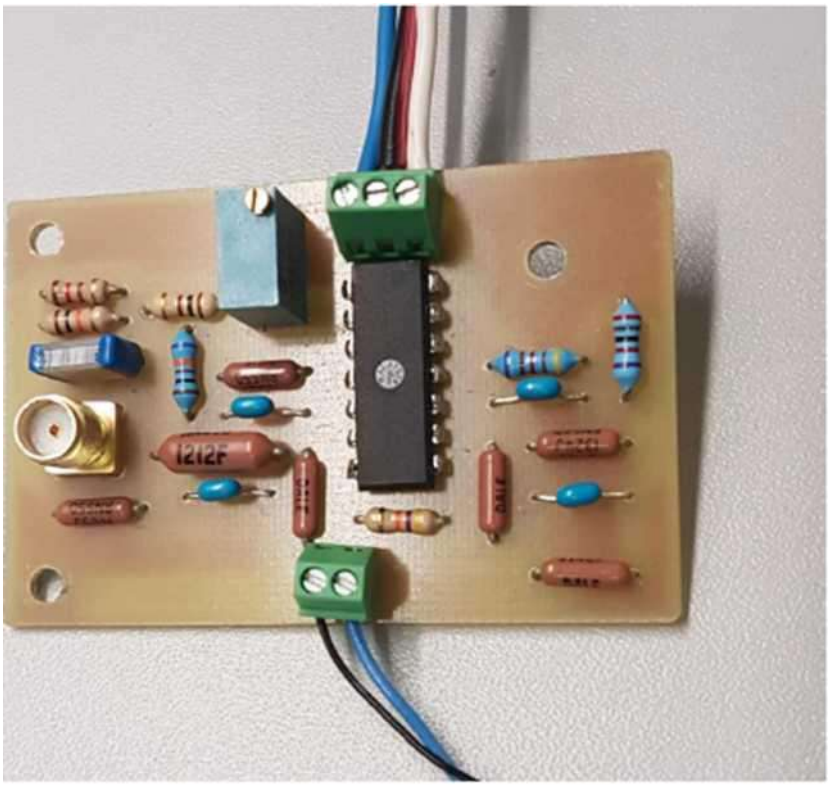


Рисунок 2.14 – Виготовлена конструкція плати фільтру низьких частот підсилювача (Amp2)

Для блоку керування георадаром було обрано елементи, які наведено у табл.2.4.

Таблиця 2.4 – Специфікація плати керування

Найменування	Кіл-ть	Опис
MBED-LPC1768	1	Плата прототипування ARM mbed LPC1768 (MBED)
282834-2	3	2-позиційний провід до клемної колодки плати горизонтально з платою 0,100 дюйма (2,54 мм) через отвір (P1, P2, P3)
801-43-020-10-20P	2	однорядний (мама) профіль lo SKT Mill-Max 1,86 x 2 012000 довгий дюйм

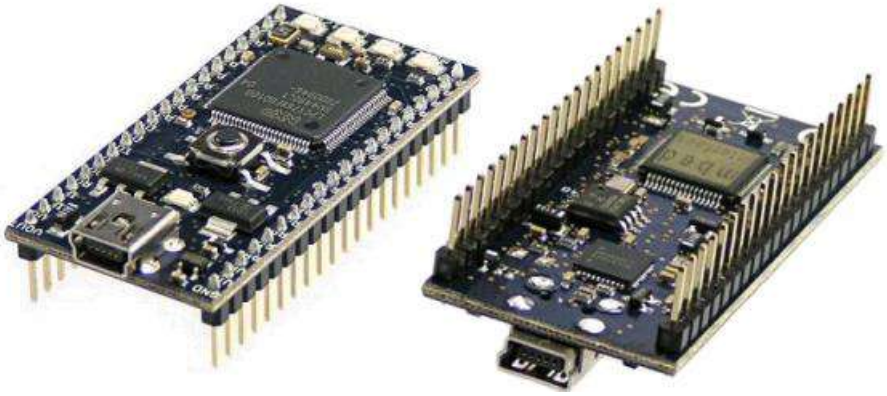


Рисунок 2.15 – Плата прототипування ARM mbed LPC1768 (MBED)

Для роботи системи георадару необхідно підключити дріт «+ Sync pulse» до лівого каналу аудіовходу ноутбука за допомогою роз’єму. Той самий роз’єм, який використовується для вихідного сигналу відеопідсилювача (Amp2).

Колодки зі знаком збігаються з землею, і можна підключити лише одну з них.

В програмі Sprint Layout для спрощення зєднання плати протипування з іншою частиною георадару було проведено проектування зєднальної плати (рис.2.16).

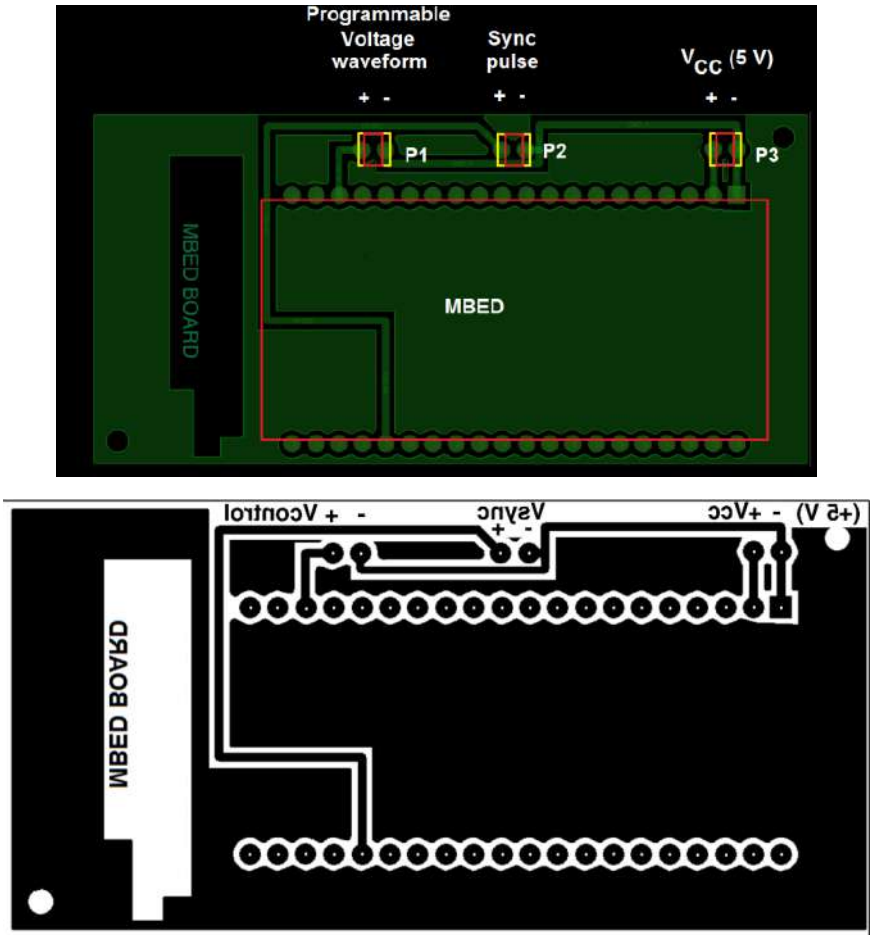


Рисунок 2.17 – Розроблена конструкція з’єднувальної плати

Vcc слід вибирати в діапазоні 4,5 В-9 В. Можна вибрати одну з двох напруг +5 В або +6,5 В, що генеруються DC-DC перетворювачем.

Загалом для системи живлення було обрано елементи наведені у табл.2.5.

Таблиця 2.5 – Специфікація елеметнів підсистеми живлення (перетворювачі DC-DC).

Найменування	К-ть	Опис
TSRN 1-2465	2	DC/ Перетворювач постійного струму 6.5V 1° (U2,U3)
R-78E5.0-0.5	1	CONV DC/DC 5V 500MA OUT THRU (Ui)
282834-4	2	4-позиційний провід до клемної колодки плати горизонтально з платою 0,100 дюйма (2,54 мм) через отвір (PI, VinDC+VnSHDN+Gnd+Vout)
447687 (supplier: Jonathan ®)	1	FullPower- Акумулятор Lipo4S 2200mAh 35C Silver V2 - DEANS (BT1)
C0603X103F5JACTU	2	Багатошаровий керамічний конденсатор (MLCC) Стандарт 1000pF, ± 5%, 50 В постійного струму, SMD (C1,C2)
282834-2	1	Горизонтальна клемна колодка 2-позиційного проводу до плати з наскрізним отвором плати 0,100 дюйма (2,54 мм) (BT1)
LT3461AES6#TRMPBF	1	(Step Up) DC-DC, Reg. 2.5V-16Vin, 1.25V-38Vout, 250mAout, TSOT-23-5
GRM21BR71H105KA12L	1	CAP (MLCC) Murata GRM lpiF, ±10%, 50 Vc.c., SMD (Cl_2)
C1206C474K5RACTU	1	CAP (MLCC) KEMET C 470nF, ±10%, 50 V, SMD
C1206C220J5GACTU	1	CAP (MLCC) KEMET C 22pF, ±5%, 50 V c.c., SMD (C3)
MCTC0525B4533T5E	1	RES 453 kohm, 100 V, 100 mW (Rl)
ERA6ARB2212V	1	RES 22.1 kohm, 100 V, 0805, 125 mW (R2)
LQH66SN330M03L	1	Inductor 33 nH, 860 mA, 2525 (LI)

Схема № 1 для перетворення з 12 В постійного струму на чотири рівні вихідної напруги постійного струму: 5 В, ± 6,5 В і GND BT1: акумулятор Full Power© Li-Po 4S 2200 мАг 35C

Рисунок 2.18 – Акумулятор Full Power© Li-Po 4S 2200 мАг 35C

U1, U2, U3: Ефективність комутаційних регуляторів: 91 %-Н93 %

U2,U3 U1

Рисунок 2.19 – Комутаційні регуляторів: 91 %-Н93 %

Схема № 1 для перетворення з 12 В постійного струму на чотири рівні вихідної напруги постійного струму наведена на рис.2.20.

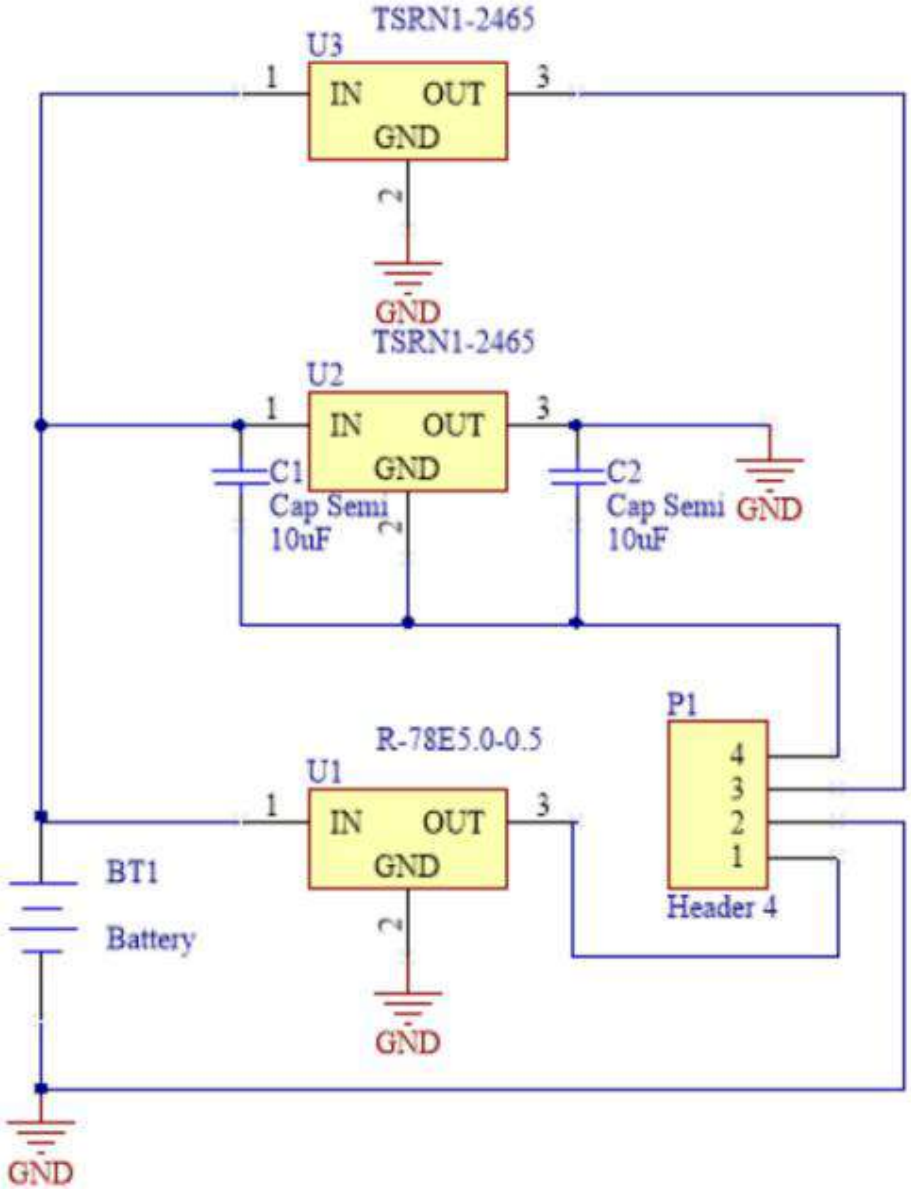


Рисунок 2.20 – Схема підсистеми живлення (DC-DC перетворювачі).

В програмі Sprint Layout було проведено проектування плати підсистеми живлення (рис.2.21) з подільшим її виготовленнм (рис.2.22).

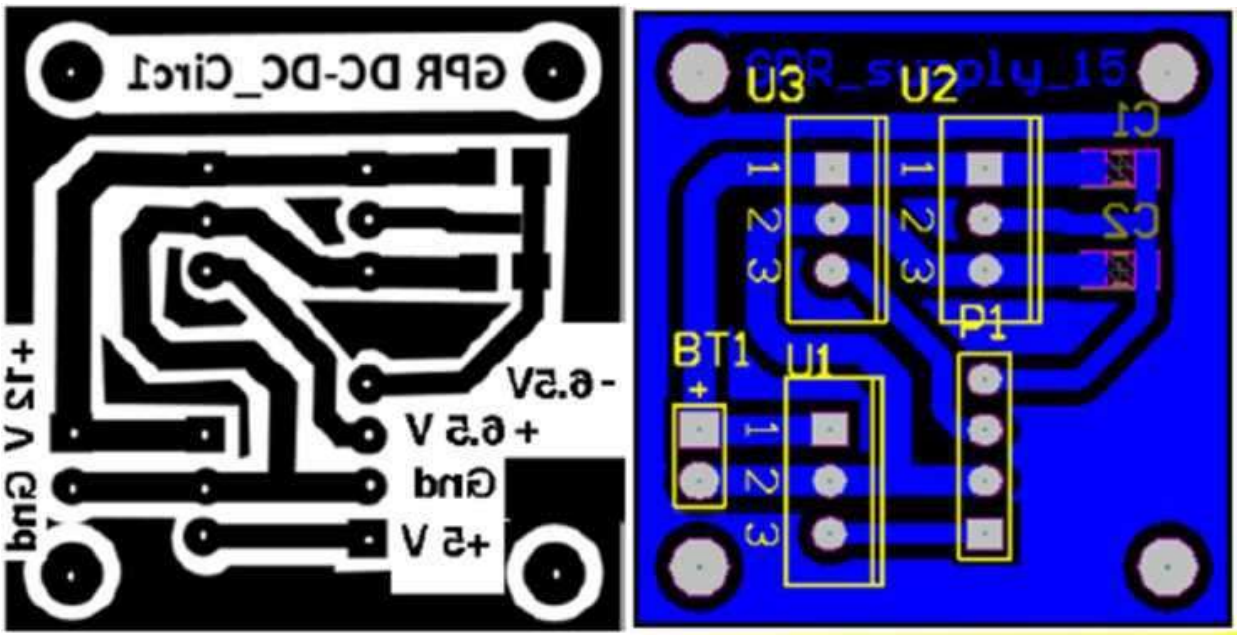


Рисунок 2.21 – Розроблена конструкція плати підсистеми живлення

Не рекомендується не приварювати безпосередньо до мідного шару перетворювачі TCPH 1-2465, які не витримують високих температур і відповідно було використано однорядний (гніздовий) роз’єм 3P SKT.

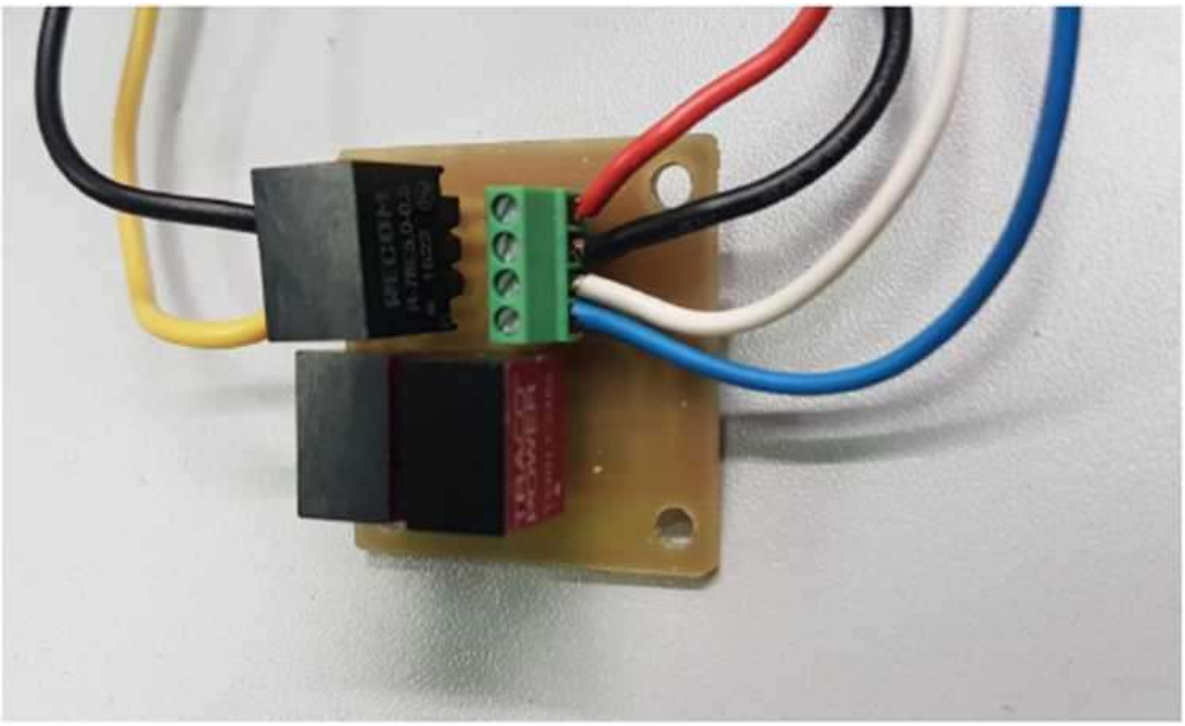


Рисунок 2.22 – Виготовлена конструкція плати підсистеми живлення

Схема №2 є підвищуючим перетворювачем DC-DC. Пристрій LT3461A перемикається на частоті 3 МГц. Ця висока частота перемикання дозволяє використовувати крихітні недорогі конденсатори та індуктори малої висоти.

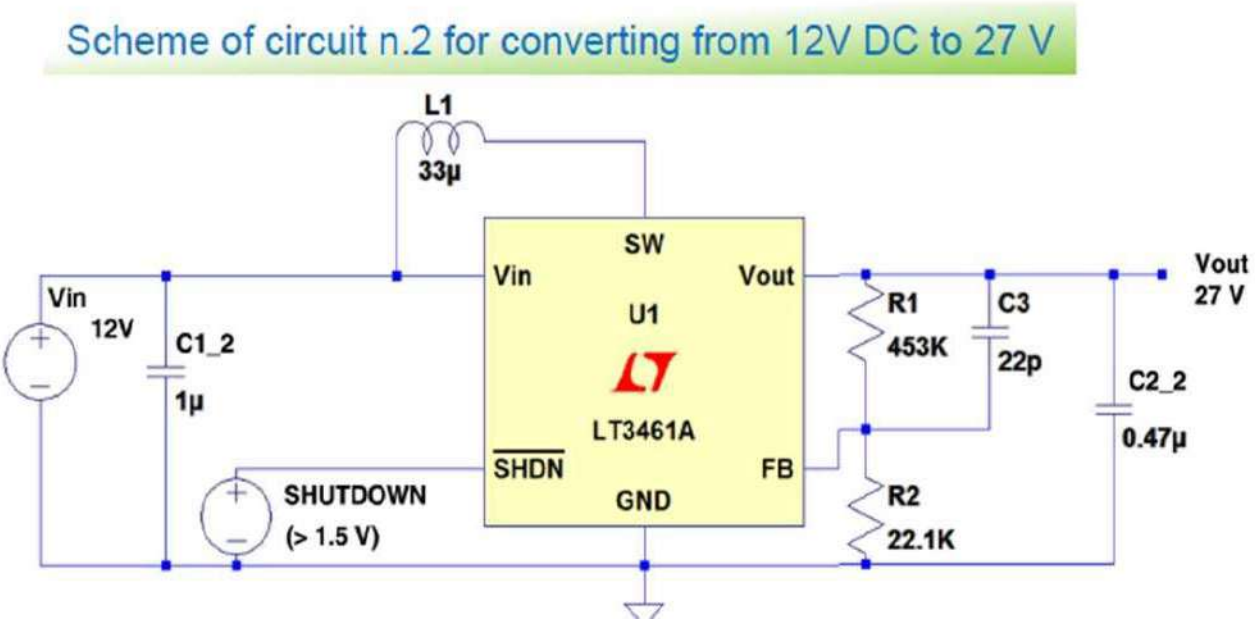


Рисунок 2.23 – Схема підвищуючого перетворювача DC-DC

В програмі Sprint Layout було проведено проектування плати підвищуючого перетворювача DC-DC (рис.2.24) з подільшим її виготовленнм (рис.2.25).

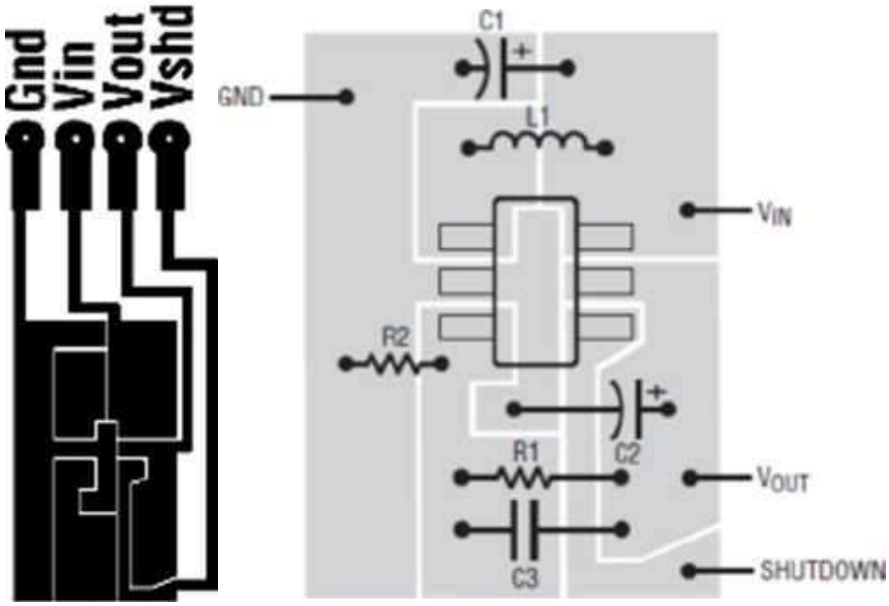


Рисунок 2.24 – Розроблена конструкція плати підвищуючого перетворювача DC-DC

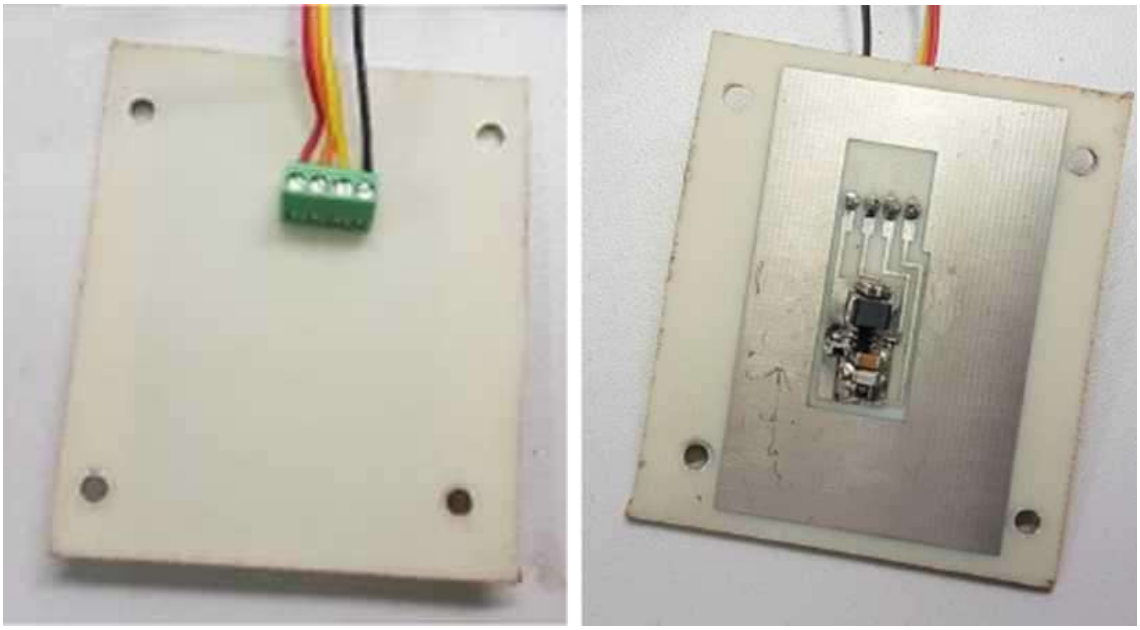


Рисунок 2.25 – Виготовлена конструкція плати підвищуючого перетворювача DC-DC

Таблиця 2.6 – Список матеріалів

Номер частини	К-ть	Опис
1532 02	1	Аудіо стереороз'єм, 3,5 мм, папа (R-AUDIOJN)
AD10	1	Одношарова мідь AD22 150 x 100 x 1,6 мм мідний лист FR4 з товщиною міді 35 мкм

3 РОЗРОБКА КІНЦЕВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ

3.1 Складання кінцевої конструкції

Після виготовлення усіх компонентів було проведено їх складання в єдину систему георадару для проведення подальших етапів (розробки програмного забезпеення та тестування).

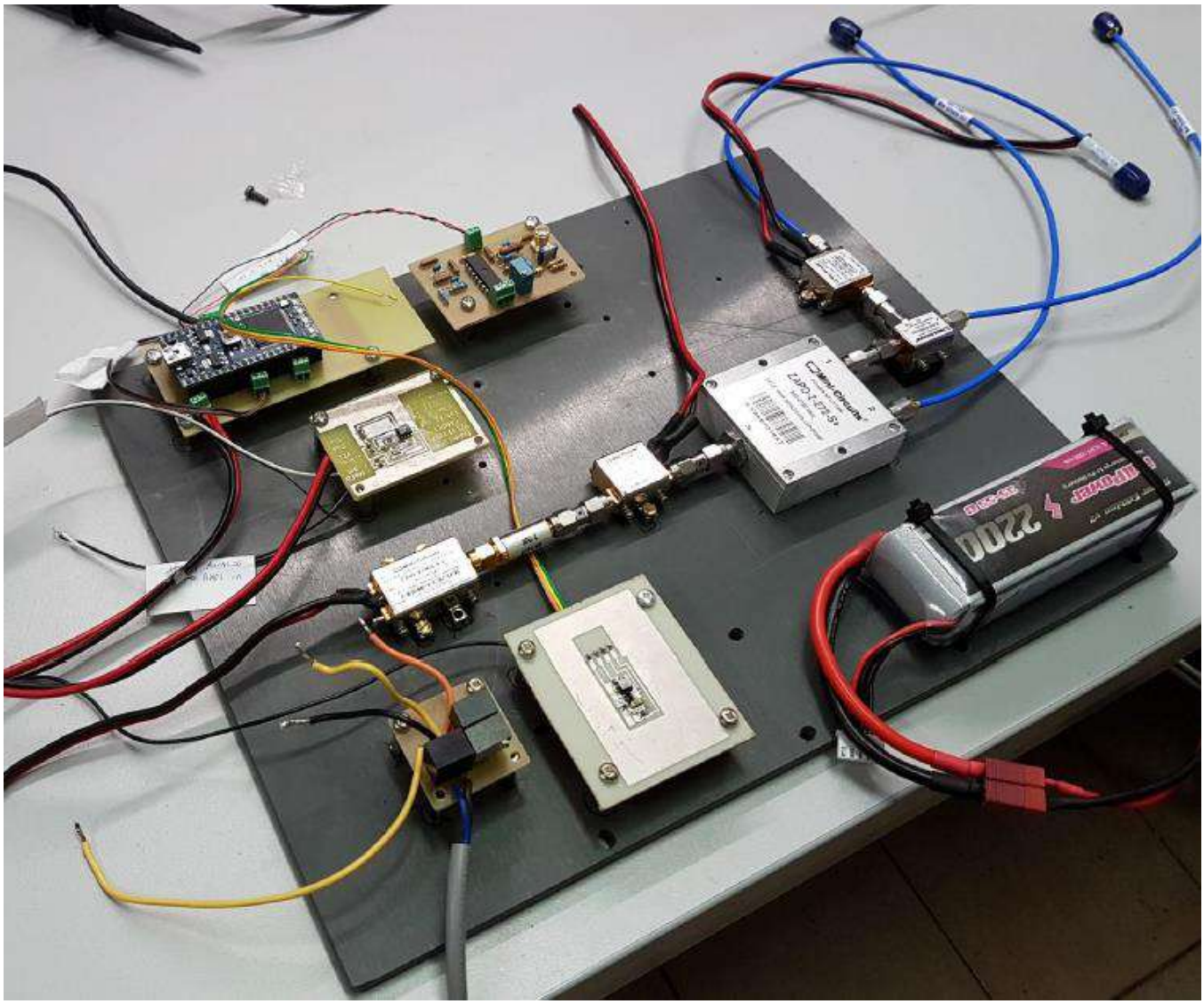


Рисунок 3.1 – Складання елементів розробленого георадару

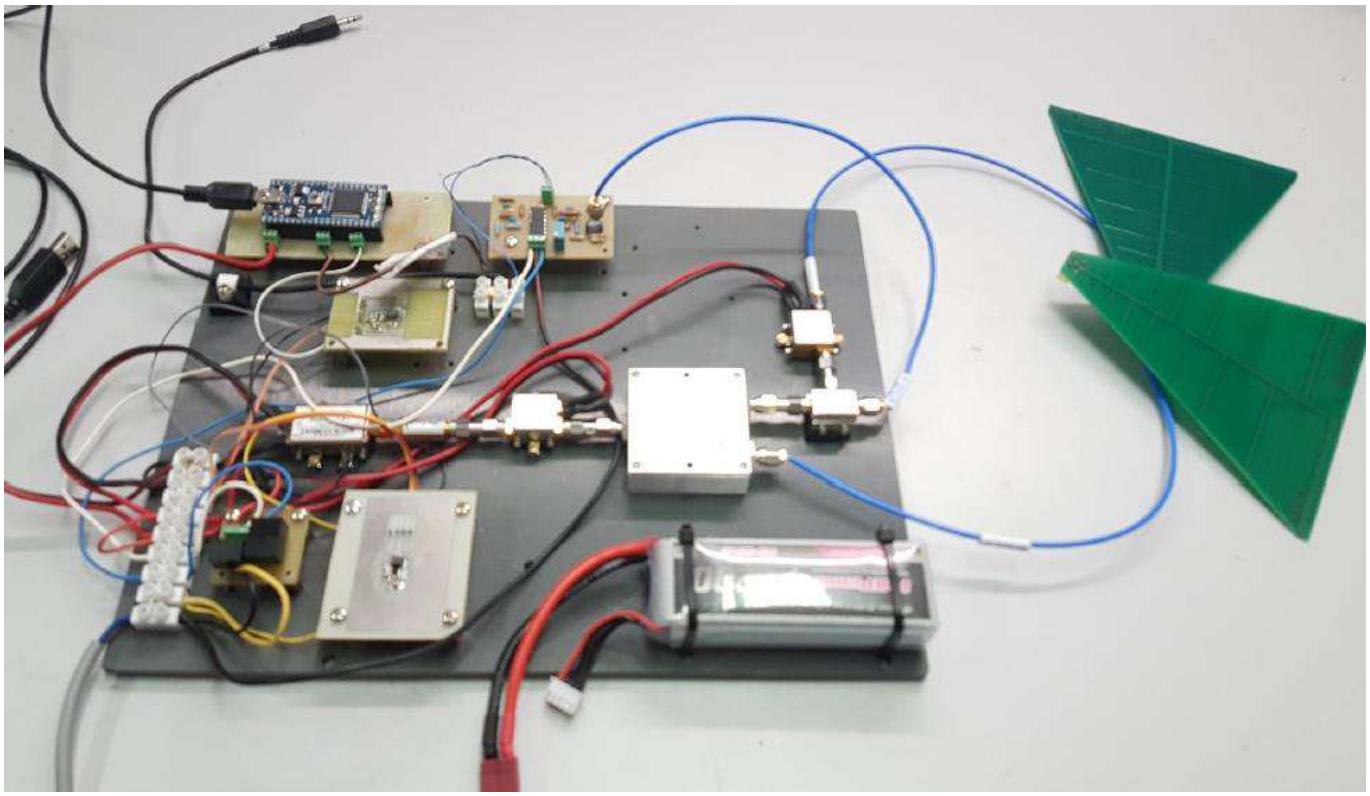


Рисунок 3.2 – Приєднання логоперіодичних антен до системи георадару

3.2 Програмне та мікропрограмне забезпечення для керування мікроконтролером

Для своєї роботи система потребує таких програмних компонентів:

- операційна система Arm Mbed OS, яка включає пакет Cortex Microcontroller Software Interface Standard (CMSIS) і надає C/C++ SDK з відповідними бібліотеками, які можна використовувати, зайшовши на веб-сайт os.mbed.com і вибравши розділ «Компілятор», після безкоштовного входу до облікового запису;

- дистрибутив Anaconda можна завантажити з веб-сайту: https://www.anaconda.com/download. Anaconda надає робочий простір Spider, але спочатку потрібно завантажити Python 3.6 documentation, який включає Tkinter, з веб-сайту www.python.org/downloads;

- MbedWinSerial – драйвер для послідовної передачі даних між портом ПК користувача та платою Mbed, його можна завантажити з сайту: https://os.mbed.com.

Під час розробки кінцевої конструкції георадару було розроблені програмні компоненти, що наведені нижче.

Програма мікроконтролеру, що забезпечує функції керування прототипною платою Mbed NXP LPC1768. Вона забезпечує функціональність, необхідну для належного функціонування георадара, наприклад генерування або змінення вибраних форм сигналу. Крім того, він забезпечує зв'язок між головним ПК користувача та периферійною радіолокаційною системою, дозволяючи інтерактивне керування георадаром та обмін даними.

Програмне забезпечення для ПК для прототипу георадару FMCW у вигляді графічного інтерфейсу користувача (GUI), що дозволяє простіше та зручніше взаємодіяти користувача з системою. Графічний інтерфейс забезпечує простий у використанні робочий простір, користувач може перемикати багато параметрів для керування радарною системою та надсилати їх на мікроконтролер.

Для графічного інтерфейсу користувача (GUI) була обрана мова програмування Python. В якості бібліотеки Python для створення GUI було обрано пакет Tkinter121. Цей набір інструментів було обрано через його простоту, що містить докладні навчальні посібники та готові макети. Крім того, середовище розробки Python необхідне для розробки програмного забезпечення як Spider 3.1, яке надається Anaconda, популярним дистрибутивом Python

Встановлено ОС Arm Mbed, яка включає пакет стандарту програмного інтерфейсу мікроконтролера Cortex (CMSIS) і надає C/C++ SDK з відповідними бібліотеками, можна використовувати, зайшовши на веб-сайт

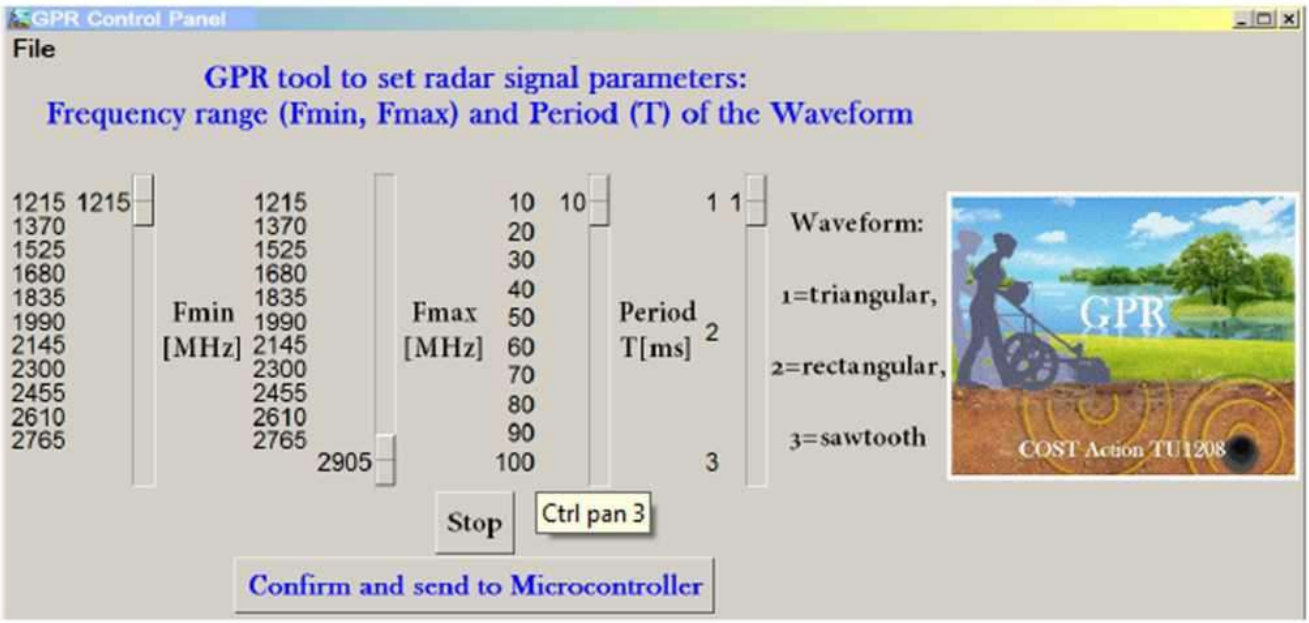


Рисунок 3.3 – Інтерфейс програми для ПК

У розробленій програмі GUI зміна стану кнопки викликає функцію, яка зчитує значення повзунків (рис.3.3), використовує їх у обчисленнях буфера даних, пакує дані та надсилає їх до Mbed MCU.

Функція також перевіряє, чи на початковій частоті заданий повзунком сигнал нижче кінцевої, у разі порушення цієї умови з'являється попередження.

Кнопка «Зупинити» на панелі GUI зупиняє передачу радіолокаційного сигналу, у цьому випадку програма встановлює значення останнього четвертого повзунка рівним 4.

Розроблене програмне забезпечення виконує всі обчислення на стороні користувача, що підвищує швидкість генерації радіолокаційних даних у порівнянні з обчисленнями на стороні Mbed MCU.

Ця програма надає функції для обчислення буфера значень напруги ЦАП, необхідних для отримання потрібної форми сигналу на виході VCO, а також для упаковки буфера в двійковий формат і передачі його до Mbed MCU через послідовне з’єднання.

Файл Python_GUI_4_Sliders.py містить код програми GUI.

Перша частина коду програми присвячена імпорту бібліотек, які дозволяють послідовний зв'язок і пакет Tkinter. Tkinter надає інтерфейс Python для набору інструментів Tk GUI. Крім того, потрібно імпортувати деякі модулі Tkinter. Після цього потрібно налаштувати послідовний порт і встановити COM-порт.

Продовжуючи, значення параметрів сигналу було ініціалізовано, щоб встановити значення за замовчуванням для чотирьох слайдів. Четвертий слайд встановлено як значення 1 для передачі трикутної хвилі, але його можна перемкнути як значення 2 (прямокутна), 3 (пилоподібна) або 4, щоб зупинити передачу радара.

```
import  serial
from    numpy   import append
from    tkinter import Scale,Button, VERTICAL, Tk, Menu, messagebox, Label, TclError
from    PIL     import ImageTk
from    struct  import pack

import  Calc_DAC_with_Predistortion as dac # Functions available: W_form_triang //
                                #W_form_rectang() // W_form_sawtooth() // Predistort()

#-----------------------------------------------------------------------------------------
# Configure the Serial port:
# change COM number according to your PC connection!
ser = serial.Serial("COM20", baudrate=9600, bytesize=8, parity='N',
                    stopbits=1, timeout=None, rtscts=1)

# DEFAULT SIGNAL PARAMETERS:
# (F_max should be changed for the new RF-chain with the voltage amplifier)
num_values  = 200       # must be even
F_min_df    = 1216.7    # Minimum frequency of the radar signal [MHz]  # 0.0 V <-> 1216.7 MHz
F_max_df    = 2902.5    # Maximum frequency of the radar signal [MHz]  # 3.3 V <-> 1439.3 MHz, 25.0 V <-> 2902.5 MHz
T_df        = 20        # Period of the signal in [ms]
W_form_df   = 1         # 1 - triangular, 2 - rectangular, 3 - sawtooth waveforms, (4 - no transmission)
```

Рисунок 3.4 – Блок приєднання бібліотек

Графічний інтерфейс було створено за допомогою функцій Tkinter, починаючи з встановлення розміру головного вікна, назви, тексту презентації та зображень.

Весь шрифт, розмір, значки та назву зображення легко змінити в коді.

```
# Create a MAIN WINDOW named "master":
master = Tk()

# Set geometry and title of the main window:
master.geometry ('1100x400+200+100') # Size of the window(x,y) + position on screen (x,y)
master.minsize(width=1000, height=300)
master.title('GPR Control Panel')
try:
    master.iconbitmap("gpr_icon.ico") # Icon of the window

except TclError:
    print ('No ico file found')

# Load the logo image:
logo = ImageTk.PhotoImage(file="GPR_logo.gif")

# Add presentation text:
WelcomeImm = Label(master, image=logo).pack(side="right", expand=1) # Place the logo image
explanation =  "GPR tool to set radar signal parameters:\n Frequency range (Fmin, Fmax) and Period (T) of the Waveform\n"
WelcomeText = Label(master,
          font=("Baskerville Old Face", "10", "bold"),foreground = 'blue',
          text=explanation).pack(side="top")
```

Рисунок 3.5 – Блок основних елементів інтерфейсу програми на ПК

Створення повзунків: можливе створення графічного інтерфейсу з чотирьох повзунків, встановлюючи різні параметри, такі як орієнтація, назва, позиція, розмірність та інтервал відміток, мінімальне значення, яке можна змінити як інтервал.

Інструкції «from=» і «to-» використовуються для встановлення мінімального та максимального значення змінної.

```
# Create four SLIDERS to set Fmin, Fmax, T  and Waveform:
# 'tickinterval' - desplayed slider steps, 'resolution' - actual slider steps

# F_min Slider
sldFmin = Scale(master, from_=F_min_df, to=F_max_df, orient=VERTICAL, length =300, width=20, sliderlength=50, tickinterval=20,
sldFmin.set(0)
sldFmin.pack(side = "left", expand = 1) # side = "left" to place all sliders in the same row

freqmin = "Fmin\n[MHz]"
label1 = Label(text=freqmin, font=("Adobe Hebrew", "10", "bold")) # Insert label Fmin near its slider
label1.pack(side="left")

# F_max Slider
sldFmax = Scale(master, from_=F_min_df, to=F_max_df, orient=VERTICAL, length =300, width=20, sliderlength=50,tickinterval=20,r
sldFmax.set(F_max_df)
sldFmax.pack(side = "left", expand = 1)

freqmax = "Fmax\n[MHz]"
label2 = Label(text=freqmax, font=("Adobe Hebrew", "10", "bold"))
label2.pack(side="left")
```

Рисунок 3.6 – Блок створення повзунків керування георадаром з ПК

Функція Sliders: функція getSlider була створена для збору значень, встановлених користувачем. Він надає функції для обчислення буфера значень напруги ЦАП, необхідних для отримання потрібної форми сигналу на виході VCO, для упаковки буфера в двійковий формат і передачі його до Mbed MCU через послідовне з’єднання.

```
# Create SLIDER function:
def getSlider():
    if  (sldFmin.get()<sldFmax.get()):
        # Get values from sliders:
        F_min   = sldFmin.get()
        F_max   = sldFmax.get()
        T       = sldT.get()
        W_form  = sldW.get()

        # Calculate desired VCO frequencies:
        if W_form   == 1:
            f_desired   = dac.W_form_triang(F_min, F_max, T)
        elif W_form == 2:
            f_desired   = dac.W_form_rectang(F_min, F_max, T)
        elif W_form == 3:
            f_desired   = dac.W_form_sawtooth(F_min, F_max, T)

        # Calculate DAC voltage for f_desired:
        DAC_values  = dac.Predistort(f_desired)

        # TRANSMIT DATA TO MBED:
        dt          = T*1000/num_values  # *1000 - ms-->us, dt is time between DAC's updates
        DAC_values /= 3.3                # normalize by 3.3 V for mbed Analog Output ( - accepts 0...1)

        values_to_pack  = append(DAC_values, dt) # uniting two arrays
        str_packed      = pack('%sf' % len(values_to_pack), *values_to_pack) # pack each value into a float - 4 bytes
        ser.write(str_packed) # Sending data to Mbed through Serial
```

Рисунок 3.7 – Блок створення елементів отримання даних вимірювання

Створення кнопок подібне до створення повзунків, і кнопка підтвердження може надсилати нову інструкцію Mbed, отримуючи її за допомогою команди getSlider.

Таким же чином команда stopGPR кнопки Stop викликає функцію stopGPR, яка може дозволити блокувати радіолокаційну передачу сигналу.

Наприкінці всього коду інструкція запускає основний цикл: “master.mainloopO”

```
# Create no-transmission function:
def stopGPR():
    F_min   = F_min_df # Using default values
    T       = T_df

    # Calculate desired VCO frequencies:
    f_desired   = dac.W_form_no(F_min)
    # Calculate DAC voltage for f_desired:
    DAC_values  = dac.Predistort(f_desired)

    # TRANSMIT DATA TO MBED:
    dt              = T*1000/num_values  # *1000 - ms-->us, dt is time between DAC's updates
    DAC_values      /= 3.3               # normalize by 3.3 V for mbed Analog Output ( - accepts 0...1)
    values_to_pack  = append(DAC_values, dt)
    str_packed      = pack('%sf' % len(values_to_pack), *values_to_pack) # pack each value into a float - 4 bytes
    ser.write(str_packed) # Sending data to Mbed through Serial

# CONFIRMATION BUTTON to get the Sliders values and send them to Mbed:
getB = Button(master, text ="Confirm and send to Microcontroller", command = getSlider)
getB.pack(side = "bottom", expand = 1, fill = "none")  #Place at the bottom of the window
getB.configure(font=("Baskerville Old Face", "10", "bold"), foreground = 'blue')

# Stop button:
stopB = Button(master, text ="Stop", command = stopGPR)
stopB.pack(side = "bottom", expand = 1, fill = "none")
stopB.configure(font=("Adobe Hebrew", "9", "bold"))
```

Рисунок 3.8 – Блок розрахунків на основі отриманих виміряних даних

3.3 Запуск та тестування системи

Для запустку програмне забезпечення необхідно:

- завантажити та встановити документацію Phyton 3.6, яка включає пакет Tkinter;

- завантажити та встановити дистрибутив Anaconda, який включає середовище розробки Spider;

- скопіювати всі файли Python (Python_GUI_4_Sliders.py і Calc_DAC_with_Predistortion.py) і зображення (GPRJogo.gif і gprjcon.ico), надані в одній папці (усі файли включено до заархівованого файлу GPR.zip)$

- підключити плату Mbed, завантажити та встановити драйвер MbedWinSerial для послідовної передачі даних на ПК користувача та перевірити номер COM-порту, який використовується на панелі керування системою;

- відкрити командний рядок оболонки та написати команду для встановлення послідовного пакета для Python: pip install pyserial.

Далі відкрити файл Python_GUI_4_Sliders.py за допомогою програми робочої області Spider, потім перевірити значення COM-порту та, якщо воно не те саме, що використовується на ПК користувача з Mbed, змінити його на правильне значення:

Налаштувати послідовний порт – змінити номер COM відповідно до підключення до ПК:

ser - serial.Serial(”COM20”, швидкість передачі даних=9600, розмір байтів=8, парність='N’> stopbits=lj timeout=немає, rtscts=l)

Далі проводиться реєстрація безкоштовного облікового запису на веб-сайті Mbed OS і запуск відкритого Mbed SDK. Після підключення плати Mbed необхідно створити новий проект і відкрити файл Mbed_Python_Control_LPC1768_2_main.txt

Для роботи завантажити офіційну бібліотеку Mbed із веб-сайту: https://os.mbed.com/users/mbed_official/code/mbed/ та імпортувати її в онлайновий компілятор у тому самому проекті, де компілюється основний файл.

Файл .bin у результаті компіляції слід скопіювати в мікроконтролер Mbed, підключений через USB.

Запускаємо файл Python_GUI_4_Sliders.py за допомогою Spider. Він відкриває графічний інтерфейс користувача панелі керування георадаром. Необхідно обрати потрібні параметри та тип сигналу, а потім натиснути кнопку підтвердження, щоб переслати команди на плату Mbed, яка керує та контролює георадар.

Інтерактивне керування георадаром можливе за допомогою панелі керування георадаром, що дозволяє перемикати параметри та форму сигналу в режимі он-лайн або щоразу зупиняти передачу радара

Багато середовищ розробки програмного забезпечення дозволяють керувати вихідним георадарним сигналом, що надходить на правий аудіоканал. Python,

MathWorks є прикладами таких середовищ розробки, які надають спеціальні бібліотеки для оцінки діапазону виявленої цілі.

В даний час, напр. випуск MathWorks 2017 року визначає типову процедуру високого рівня, показану на наступному слайді. Зауважте, що перший крок (Dechirp) вже було виконано апаратними підсистемами Mixer+(Amplifier+Filter), і, отже, програмне забезпечення для інтерпретації правого аудіоканалу має починатися з «знаходження частоти биття», другого пункту процедури.

Перш ніж знайти частоту биття, треба отримати аудіосигнал за допомогою таких функцій, як

myRecording = getaudiodata(recObj);

recObj = аудіозапис(Fs_audio,Nr_bit_audio,NR_can_audio,ID);

Fs_audio — частота дискретизації Nr can audio=2 та ID=0

Для випадку зубчастого сигналу потрібна оцінка однієї частоти биття, тоді як для трикутної модуляції слід оцінювати частоти биття як висхідної, так і спадної розгортки.

Після отримання інформації про частоту, напр. за допомогою функції pwelch(), функція range2beat() дозволяє оцінити діапазон.

Ефект Доплера та доплерівський зв’язок діапазону можна оцінити за допомогою функцій

Поетапно. RangeDopplerResponse rdcoupling(fd, нахил, c)

Отже, відбувається обчислення зміщення діапазону через доплерівський зв’язок діапазону.

Крім того, інші функції допомагають знайти різні параметри, пов’язані з сигналом, такі як range2bw, range2time,....

Оцінка діапазону FMCW R20i7b

Метою оцінки дальності FMCW є оцінка дальності цілі. Наприклад, радару для запобігання зіткненням в автомобілі потрібно оцінити відстань до найближчої перешкоди. Алгоритми оцінки діапазону FMCW можуть відрізнятися в деталях, але типова процедура високого рівня виглядає так:

Етапи обрахування сигналів та отримання даних про підповерхневі об’єкти:

- дечірпування — дечірпування отриманого сигналу шляхом змішування його з переданим сигналом (якщо використовується функція dechtrp, переданий сигнал є опорним);

- знаходження частоти биття — з дечірпованого сигналу витягаємо частоту биття або пару частот биття, якщо сигнал FMCW має пилкоподібну форму (розгортка вгору або вниз з розгорткою «зубчаста форма»), виділяємо одну частоту биття, а якщо сигнал FMCW має трикутну розгортку, вилучаємо частоти биття вгору і вниз.

Для виділення частот биття можна використовувати різноманітні алгоритми. Наприклад, можна скористатися наведеними нижче функціями, щоб виконати цей крок:

```
pwelch or periodogram
psd
findpeaks
rootmusic
phased.CFARDetector
```

Обчислення діапазону — використовуємо частоту або частоти биття, щоб обчислити відповідне значення діапазону. Функція beotZrange може виконати це обчислення. Розробляючи свій алгоритм, можна виконувати такі допоміжні завдання:

- візуалізувати цілі в доплерівському домені діапазону, використовуючи фазований.RcngeDoppTerResponse System object;

- визначати, чи потрібно компенсувати доплерівський зв’язок із дальністю.

Таке з’єднання може виникнути, якщо ціль рухається відносно радара. Ви можете використати функцію rdcoupling, щоб обчислити зсув за дальністю через доплерівський зв’язок. Якщо зсув за дальністю не є незначним, Загальні методи компенсації включають:

- віднімання зміщення діапазону від початкової оцінки діапазону;

- якщо сигнал FMCW використовує розгортку tnangle замість розгортки вгору або вниз;

- дослідження взаємозв’язків між вимогами до діапазону вашої системи та параметрами форми сигналу FMCW.

Можна використовувати наступні функції:

```
range2time
time2range
range2bw
```

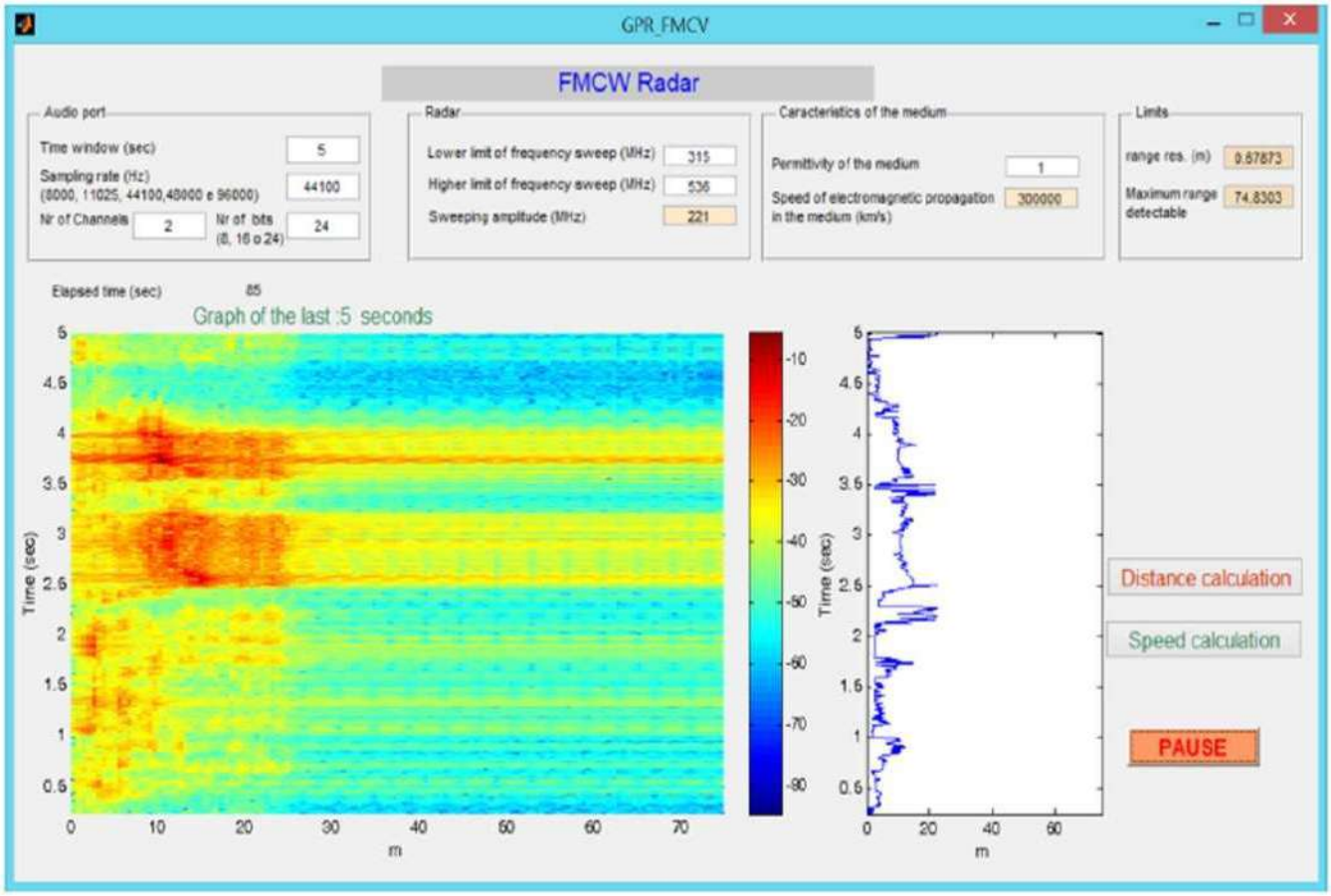


Рисунок 3.9 – Базове програмне забезпечення для інтерпретації вихідного сигналу

Щоб спростити реалізацію друкованих плат, ми використовували одношарові друковані плати. Зазвичай кожна електронна плата включає компоненти того самого типу монтажу (як SMD). У випадку SMD-компонентів монтуйте їх безпосередньо на верхній шар. У випадку компонентів DIP необхідно зробити отвори для вставлення компонента з протилежного боку мідного шару, щоб зробити зварювання до кінців штифтів.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі

- проведено аналіз існуючих систем геолокації;
- проведено аналіз існуючих методів побудови систем геолокації та розроблено структуру та методику роботи власного георадару;
- проведено вибір компонентів радіочастотної частини георадару;
- проведено розробку друкованих плат модулів низькочастотного перетворення, фільтрації, живлення та керування;
- проведено розробку програмного забезпечення, що доволить не лише працювати з георадаром а і проводити аналіз форми виявлених підземних об’єктів.

Розроблене програмне забезпечення для ПК та керуючого мікроконтролера дозволяють інтерактивно контролювати роботу георадара, реалізована програма GUI є зручною для користувача та полегшить взаємодію користувачів з радіолокаційною системою.

Загальна ціна радара не перевищує 600 євро, однак її можна додатково знизити за рахунок використання більш дешевого компонента smd RF, але в цьому випадку з використанням більш складної багатошарової друкованої плати.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mbed OS: https://www.mbed.com/en/development/mbed-os/

2. Tkinter package: https://d0cs.pyth0n.0rg/2/library/tkinter.html

3. V. Ferrara, F. Frezza, F. Mangini, E. Piuzzi, P. Simeoni, N. Tedeschi, Design and realization of a cheap GPR prototype & Recent advancements in forward- scattering methods, COST Action TU1208, 4th General Meeting, Athens, Greece, 0ctoberl9-20, 2015

4. V. Ferrara, F. Troiani, F. Frezza, F. Mangini, L. Pajewski, P. Simeoni, N.Tedeschi,

Design and Realization of a Cheap Ground Penetrating Radar Prototype @ 2.45 GHz," IEEE Browse Conference Publications - 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland', 10-15 April2016, pp. 1-4, DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7482008

5. La. Pajewski, R. Persico, V. Ferrara, S. Chicarella, F. Frezza, F. Troiani, "Ground Penetrating Radar prototypes developed in COST Action TU1208, " In the proceedings of 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2016), 2016, Split, Croatia September 22-24, 2016

6. Gregory Charvat, Jonathan Williams, Alan Fenn, Steve Kogon, and Jeffrey Herd. RES.LL-003 Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture Radar Imaging. January IAP 2011. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, https://ocw.mit.edu. License: Creative Commons BY-NC-SA.

7. Mbed DAC course-notes: https://developer.mbed.org/media/uploads/robt/mbed_course_notes_-_analog_input_and_output.pdf

ДОДАТОК А – ПРЕЗЕНТАЦІЯ