

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інформаційна безпека та електронні комунікації

(найменування факультету)

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів

(найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему:

МЕТОДИКА ПОЗИЦІОНУВАННЯ БПЛА З  
ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТОТНОГО ВИСОТОМІРУ  
БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ  
METHOD OF UAV POSITIONING USING A  
CONTINUOUS FREQUENCY ALTIMETER

Виконав студент \_\_\_\_\_ 2 \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ БК-512м \_\_\_\_\_ групи

Спеціальності \_\_\_\_\_ 172 «Телекомунікації та радіотехніка» \_\_\_\_\_

Освітня програма (спеціалізація) \_\_\_\_\_ «Інтелектуальні тех-  
нології мікросистемної радіоелектронної техніки» \_\_\_\_\_

ЮРІН І.Д.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_ МАЛИЙ О. Ю.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_ МОРОЗ Г. В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет \_\_\_\_\_ ФІБЕК \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ інформаційні технології електронних засобів \_\_\_\_\_  
Ступінь вищої освіти \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 172 «Телекомунікація та радіотехніка» \_\_\_\_\_  
(код і найменування)  
Освітня програма (спеціалізація) \_\_\_\_\_ інтелектуальні технології мікросистемної  
радіоелектронної техніки \_\_\_\_\_  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІТЕЗ, к.т.н., доцент  
Олександр МАЛІЙ  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 року

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

ЮРИНА Іллі Дмитровича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Методика позиціонування БПЛА з використанням частотного висотоміру безперервної дії. Method of UAV positioning using a continuous frequency altimeter

керівник проекту (роботи) к.т.н., доцент МАЛІЙ Олександр Юрійович,  
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 21 » листопада 2023 року № 448

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 23 грудня 2023 року  
3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_ рекомендована література, технічне завдання

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
1. Теоретичні відомості та постановка завдання. 2. Математичні засади використання РВБД для орієнтування. 3. Особливості поглинання радіочастотних сигналів різними типами поверхонь. 4. Програмна реалізація системи орієнтування на основі карт висот.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)  
Слайди презентації, 21 с.

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1–5 Основна частина	МАЛИЙ О.Ю., доцент		
Нормоконтроль	ПОСПЕСВА І.Є., старший викладач		

7. Дата видачі завдання «4» вересня 2023 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз предметної області	1 тиждень	Завдання, ТЗ
2	Постановка завдання роботи	2 тиждень	Розділ 1
3	Математичні засади радіолокаційного зондування	3-6 тижні	Розділ 2
4	Огляд алгоритму узгодження висот рельєфу	7-8 тиждень	Розділ 3
5	Розробка методики і алгоритму	9-10 тижні	
6	Розробка програми	11-12 тижні	Розділ 5
7	Оформлення пояснювальної записки та документів до неї. Нормоконтроль та рецензування	12-13 тиждень	Додатки
8	Захист роботи	14 тиждень	

Студент(ка)

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Ілля ЮРІН  
\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Олександр МАЛИЙ  
\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи магістра:  
119 с., 32 рис., 6 табл., 4 дод., 34 джерела.

БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, НАВІГАЦІЯ, РАДІОВИСО-  
ТОМІР, ПОЗИЦІОНУВАННЯ, ОРІЄНТУВАННЯ, ЛІНІЙНО-ЧАСТОТНА МО-  
ДУЛЯЦІЯ, ПІДПОВЕРХНЕВЕ ЗОНДУВАННЯ, КАРТА ВИСОТ, КОРЕЛЯЦІЯ.

Об'єкт дослідження – безсупутникове орієнтування безпілотного літаль-  
ного апарату у просторі.

Предмет роботи – методика позиціонування безпілотного літального апа-  
рату за допомогою радіовисотоміру безперервної дії.

Мета роботи – провести аналіз існуючих конструктивних рішень радіови-  
сотомірів, розглянути методи безсупутникової орієнтації, розробити програму з  
алгоритмом позиціонування.

Матеріали, методи та технічні засоби: використання пакетного підходу для  
пошуку найбільш корельованої області, засоби програмування на мові Python,  
бібліотеки GDAL і Tkinter.

Результатом роботи стане розроблена методика позиціонування БПЛА з  
використанням радіовисотоміра безперервної дії та візуалізація цього методу за  
допомогою програми. Це сприятиме покращенню точності та ефективності по-  
зиціонування БПЛА та розширить їхні можливості.

Наукова новизна роботи полягає у використанні радіовисотомірів для  
БПЛА і створенні методики їх позиціонування за допомогою орієнтування за ре-  
лефом місцевості та підповерхневим зондуванням.

Галузь використання. Безсупутникове орієнтування БПЛА.

## ABSTRACT

Explanatory note to the diploma qualifying work of the master: 119 pages, 32 figures, 6 tables, 4 appendixes, 34 sources.

UNMANNED AERIAL VEHICLE, NAVIGATION, RADAR ALTIMETER, POSITIONING, ORIENTATION, FREQUENCY-MODULATED CONTINUOUS WAVE, SUBSURFACE SENSING, ELEVATION MAP, CORRELATION.

Object of research – satellite-free orientation of an unmanned aerial vehicle in space.

The subject of the study is the methodology for positioning an unmanned aerial vehicle using a continuous radio altimeter.

The aim of this work is to analyze the existing design solutions of radar altimeters, to consider methods of satellite-free orientation, and to develop a program with a positioning algorithm.

Materials, methods and techniques: using a batch approach to find the most correlated area, Python programming tools, GDAL and Tkinter libraries.

The result of the work will be a developed method of UAV positioning using a continuous radio altimeter and visualization of this method using a program. This will improve the accuracy and efficiency of UAV positioning and expand their capabilities.

Conclusions. The scientific novelty of the work is the use of radio altimeters for UAVs and the creation of a methodology for their positioning using terrain orientation and subsurface sensing.

Field of application. Satellite-free orientation of UAVs.

## ЗМІСТ

<b>Реферат .....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>Зміст .....</b>	<b>6</b>
<b>Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів ..</b>	<b>9</b>
<b>Вступ .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Теоретичні відомості та постановка завдання.....</b>	<b>11</b>
1.1 Висотоміри .....	11
1.1.1 Барометричний висотомір .....	11
1.1.2 Гідролокатор .....	12
1.1.3 Лазерний висотомір.....	13
1.1.4 Радіовисотомір .....	15
1.1.5 Система глобального позиціювання (GPS).....	16
1.1.6 Порівняння та вибір висотоміру .....	17
1.2 Радіовисотомір безперервної дії.....	19
1.2.1 Структура та принцип роботи РВБД.....	19
1.2.2 Типові характеристики радіовисотомірів .....	21
1.2.3 Вибір та порівняльний аналіз радіовисотомірів безперервної дії .....	23
1.3 Постановка задач магістерської роботи .....	23
<b>2 Математичні засади використання РВБД для орієнтування .....</b>	<b>25</b>
2.1 Методи безспутникового орієнтування.....	25
2.1.1 Застосування астрономічних об'єктів.....	25

2.1.2	Інерційна навігація .....	25
2.1.3	Навігація за рельєфом місцевості .....	26
2.1.4	Зіставлення цифрових зображень поверхні землі .....	27
2.1.5	Зондування підповерхневого шару землі.....	28
2.2	Методи радіолокаційного підповерхневого зондування .....	29
2.2.1	Радіоімпульсний метод .....	29
2.2.2	Метод безперервного випромінювання радіохвиль із частотною модуляцією (частотний метод).....	34
2.2.3	Особливості частотного методу.....	37
2.3	Похибки радіочастотних вимірювань.....	40
2.3.1	Врахування нерівностей відбивальної поверхні .....	40
2.3.2	Частотна залежність рівняння дальності.....	42
2.4	Радіолокаційна апаратура для зондування з поверхні землі.....	44
<b>3</b>	<b>Особливості поглинання радіочастотних сигналів різними типами поверхонь .....</b>	<b>49</b>
3.1	Радіолокаційні профілі зондованих середовищ.....	49
3.1.1	Способи отримання радіолокаційних профілів.....	49
3.1.2	Радіолокаційний профіль підповерхневої точкової цілі.....	52
3.1.3	Вплив великомасштабних неоднорідностей рельєфу поверхні на результати радіолокаційного підповерхневого зондування .....	58
3.2	Радіолокаційне зондування піску, вапнякових порід і мерзлого ґрунту .....	61
3.2.1	Радіолокаційне зондування ґрунтових вод під шаром піску .....	61
3.2.2	Радіолокаційне зондування вапняків.....	65

3.2.3	Радіолокаційне зондування мерзлих порід .....	67
3.3	Алгоритм узгодження висот з використанням РВБД .....	71
3.3.1	Огляд радіовисотоміру безперервної дії NARA24.....	71
3.3.2	Алгоритми узгодження висот рельєфу.....	73
3.3.3	Кореляційно-екстремальні системи навігації.....	75
<b>4</b>	<b>Програмна реалізація системи орієнтування на основі карт висот</b>	<b>79</b>
4.1	Огляд загальнодоступних баз даних висот .....	79
4.2	Використання бібліотеки GDAL для формування бази даних для орієнтування .....	80
4.3	Реалізація програми позиціонування БПЛА .....	82
	<b>Висновки .....</b>	<b>87</b>
	<b>Перелік джерел посилання.....</b>	<b>88</b>
	<b>Додаток А .....</b>	<b>92</b>
	<b>Перелік джерел посилання.....</b>	<b>98</b>
	<b>Додаток Б .....</b>	<b>99</b>
	<b>Додаток В .....</b>	<b>101</b>



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРО-  
ЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

БПЛА – Безпілотний літальний апарат

РВ – Радіовисотомір

РВБД – Радіовисотомір безперервної дії

ЛЧМ – Лінійно-частотна модуляція

РЛ – Радіолокатор

РМ – Рельєф місцевості

GPS – Global Positioning System

ІНС – Інерційна навігаційна система

## ВСТУП

На сьогоднішній день, особливо важливим є питання розробки безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різного призначення. Для ефективного керування ними використання відповідних механізмів управління та позиціонування є важливою умовою. Можливості управління можуть включати в себе планування маршрутів за координатами GPS чи ручне управління за допомогою пультів, що працюють у діапазоні 2,4–5,8 ГГц.

Для цивільних потреб такі методи можуть бути достатніми, але використання БПЛА за військовим призначенням, зокрема для виконання завдань на передовій, може ускладнюватися як через обмежену дальність дії, так і через застосування протидійних систем, з боку противника, так звані «глушилки».

Постає питання, як можна забезпечити надійне управління та позиціонування БПЛА під час виконання завдань. З цим питанням можна повернутися до минулого досвіду і подивитися, як із цим завданням справлялися ракети далекого призначення раніше.

Уже з початку 50-х років почалися активні розробки способів навігації військових літаків за заданим маршрутом, і зрештою, одним з успішних розроблених варіантів стала система відстеження рельєфу місцевості TERCOM (Terrain Contour Matching), що використовувалася для систем наведення крилатих ракет на початку 1980-х років. У цій системі отримували дані висот за допомогою радіовисотоміру і порівнювали отримані дані з картою рельєфу. TERCOM залишається ефективною і використовується в повітряних системах разом із іншими методами позиціонування.

Отже, на основі цього досвіду ми пропонуємо розглянути новий метод позиціонування БПЛА у випадках відсутності супутникового зв'язку.

## **1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ**

### **1.1 Висотоміри**

Висотомір або альтиметр – це прилад, який використовується для вимірювання та відображення висоти підйому об'єкта або над рівнем моря.

Висотоміри можна поділити на кілька основних типів, кожен з яких має свої унікальні особливості та застосування.

#### **1.1.1 Барометричний висотомір**

Барометричний висотомір – це пристрій, що використовується для визначення барометричної висоти або відносної висоти в польоті. Його принцип роботи заснований на вимірюванні атмосферного тиску, який змінюється зі зміною висоти. Важливо зазначити, що висотомір фактично вимірює тиск повітря, а не висоту безпосередньо. Конструктивно він складається з коробочки з мембраною, яка реагує на зміни тиску і передає ці зміни на стрілки, що відображають результат на шкалі з цифровим маркуванням.

Висота польоту повітряного судна визначається різницею повітряного тиску між точкою, де перебуває судно, і рівнем землі або води під ним. Інформація про атмосферний тиск на рівні землі надається екіпажу наземними службами, зазвичай поблизу аеродромів, гірських районів, а також небезпечних місць. Щоб правильно відображати висоту на бортових приладах, екіпаж повинен вручну встановити поточний атмосферний тиск на рівні землі або привести його до рівня моря.

Переваги та недоліки барометричних висотомірів наведені нижче.

Переваги:

- автономність і дешевизна;
- легкість і компактність;

Недоліки:

- невелика точність яка також може залежати від людського фактору;
- чутливість до змін погоди (змін атмосферного тиску);
- залежність від змінної точки відліку;
- неможливість зчитування рельєфу поверхні;
- залежно від конкретної ситуації, атмосферний тиск може бути виміряний з різних точок, (наприклад для літаків вимірюють тиск у районах аеродромів для посадки, гірських масивів та великих небезпечних перешкод, ці дані передаються екіпажу через наземні служби.

### **1.1.2 Гідролокатор**

Гідролокатор, також відомий як сонар – це пристрій, призначений для виявлення, зазвичай, підводних об'єктів шляхом використання звукових хвиль і акустичної передачі.

Звук поширюється по-різному в різних середовищах. Вода має вищу густину порівняно з повітрям, що робить саме воду гарним середовищем для передачі звукових хвиль, тому ультразвукову технологію використовують саме для замірів під водою.

За принципом дії гідролокатори розділяють на:

- активні гідролокатори, вони випромінюють звукові сигнали і вимірюють час, який потрібен для їхнього відбиття від об'єкта і зворотного повернення до датчика;
- пасивні гідролокатори, які просто «слухають» звукові сигнали, створювані об'єктами, такими як підводні човни або морські тварини.

Принцип дії гідролокаторів ґрунтується на передаванні звукових імпульсів у воду і прийомі їх відбитих сигналів від об'єктів під водою.

Основні компоненти гідролокатора містять такі елементи:

- джерело звукових сигналів – це може бути підводний датчик або проєктор, який створює звукові імпульси і випромінює їх у воду;

– гідрофон (приймач) – це пристрій, здатний реєструвати відбиті звукові сигнали від об'єктів під водою;

– обробка сигналу та відображення даних – сигнали, отримані гідрофоном, обробляються електронними пристроями для визначення відстані до об'єкта, його розмірів та інших характеристик та відображаються на екрані.

Гідролокатори мають свої переваги та недоліки залежно від конкретної сфери застосування та умов роботи.

Переваги гідролокаторів:

– використовується для різних видів діяльності на воді, це пов'язано з тим, що звукові хвилі, які використовує сонар, не сильно затухають у морській воді порівняно з радіолокаційними хвилями та світловими хвилями.

– це єдина система, що використовується для визначення глибини води а також для ефективного пошуку та ідентифікації об'єктів у воді;

– точна та відносно не дорога система.

Недоліки гідролокаторів:

– гідролокатор генерує багато шуму, який залежить від рівня звуку, що генерується гідролокатором;

– хвилі, що випромінюються гідролокатором, заважають китам, дельфінам, тюленим, черепахам, морським левам тощо;

– на акустичні хвилі, що використовуються в СОНАР, впливають зміни швидкості звуку по глибині. Це спричиняє заломлення акустичної енергії. Крім того, океан діє як середовище з втратами для акустичних хвиль. Це вимагає використання звукових хвиль високого рівня для компенсації втрат, що створює загрозу для людей (наприклад, водолазів і військових) і морських тварин.

### **1.1.3 Лазерний висотомір**

Лазерний висотомір – це прилад, що використовує лазерний промінь для вимірювання відстаней.

Принцип роботи лазерних висотомірів полягає у вимірюванні часу, витраченого на проходження випромінюваного лазером сигналу від передавача до поверхні і назад.

Після того як лазерний промінь потрапляє на поверхню і відбивається, він спрямовується через низку дзеркал і лінз. Ці оптичні елементи фокусують промінь світла на фотоелементі, який здатний реагувати на інфрачервоне випромінювання і перетворювати його у вимірюваний сигнал.

Лазерні висотоміри мають свої переваги та недоліки.

Переваги лазерних висотомірів:

- висока точність та швидкість;
- дані про поверхню мають вищу щільність вибірки;
- існує здатність збирати дані про висоту в густому лісі;
- не має спотворень геометрії.

Недоліки лазерних висотомірів:

- неефективний під час сильного дощу або низьких хмар;
- погіршується при високих кутах нахилу сонця, оскільки лазерні імпульси залежать від принципу відбиття;
- при використанні на водних поверхнях або там, де поверхня неоднорідна, він може не давати точних даних, оскільки велика глибина води впливає на відбиття імпульсів;
- дуже великі масиви даних, які важко інтерпретувати;
- помилки у визначенні висоти через неможливість проникнення в дуже густі ліси.
- лазерні промені можуть впливати на людське око у випадках, коли промінь дуже потужний;
- технологія лазерних висотомірів не може працювати на висотах понад 2000 метрів, оскільки імпульси не будуть ефективними на таких висотах.

### 1.1.4 Радіовисотомір

Радіовисотомір (РВ) – це прилад, який визначає справжню висоту, на якій перебуває повітряне судно (літак, гелікоптер, безпілотник, тощо), застосовуючи при цьому радіотехнічні методи.

Існують два різних підходи до передачі радіосигналів в радіовисотомірах:

- 1) безперервна хвиля – у цьому методі, прилад відправляє постійний сигнал з постійною частотою на об'єкт, який відбиває сигнал назад;
- 2) імпульсний сигнал – у цьому методі, прилад відправляє короткий імпульсний сигнал, а потім вимірює час, який потрібний для отримання відбитого сигналу від об'єкта. Висоту обчислюють на основі часу затримки сигналу.

Ось деякі переваги та недоліки радарних висотомірів:

Переваги:

- радарні висотоміри забезпечують високу точність та швидкість вимірювання висоти;
- незалежність від погодних умов – радарні хвилі можуть проникати крізь хмари, туман і дощ, що дає змогу радарним висотомірам працювати в різних метеороумовах;
- мають значну дальність дії і можуть вимірювати висоту на дуже великих відстанях від поверхні;
- краще за інші висотоміри справляється з вимірами у густих лісах;

Недоліки:

- велика ціна радіовисотоміру в залежності від виконання приладу;
- радарні хвилі можуть піддаватися інтерференції від інших радіопристроїв або перешкод, що може вплинути на точність вимірювань;
- радарних висотомірів можуть бути сліпі зони, де вимірювання висоти ускладнене через географічні особливості або перешкоди;
- зі збільшенням дистанції виміру або зменшенням частоти роботи потрібно значно збільшувати розміри антен та пристрою в цілому.

### 1.1.5 Система глобального позиціонування (GPS)

Вимірювання висоти за допомогою пристрою з GPS використовує супутникову технологію для точного визначення висоти місця розташування. Основна ідея його роботи полягає в прийомі сигналів від кількох супутників, що перебувають на відомих орбітах, і на основі математичних обчислень визначенні вертикальної координати місця.

Суть процесу полягає в одночасному вимірюванні відстані до кількох супутників, звертаючи увагу на їхні точні позиції на орбіті. Мінімальна кількість супутників, необхідних для точного визначення висоти, становить три. Однак, для більш високої точності та надійності, зазвичай використовується більша кількість супутників.

Отримана інформація дає змогу GPS пристрою обчислити не тільки широту і довготу місця розташування, а й абсолютну висоту над рівнем моря або висоту над певним еліпсоїдом, як-от WGS84, що широко використовується в глобальних навігаційних системах.

Переваги та недоліки застосування такого методу виміру висоти наведені нижче.

Переваги:

- мала ціна та доступність;
- мала вага та розміри пристрою;

Недоліки:

- для визначення висоти GPS-приймачу необхідно бачити мінімум чотири супутники GPS;
- невелика точність вимірювань для побутового застосування (у закритих військових каналах точність значно підвищена);
- данні із супутників можуть приходити з затримкою у зв'язку з дальністю та обробкою інформації у супутниках;
- неможливість отримання інформації про рельєф місцевості;



– погана завадостійкість не дає змоги використовувати GPS у тих умовах, де можуть створюватися такі перешкоди.

### **1.1.6 Порівняння та вибір висотоміру**

Кожен тип висотоміра має свої переваги та недоліки. Вибір висотоміра залежить від конкретних завдань та вимог, які поставлені в задачі. У нашому випадку, відповідно до поставленого завдання, нам необхідний висотомір, який забезпечить точне і швидке вимірювання, буде компактним для уміщення на БПЛА різних типів та має відносно невелику вартість. Також важливо, щоб висотомір не перешкоджав роботі в погодних умовах.

З ряду варіантів висотомірів можна відразу виключити гідролокатор, оскільки вимірювання висоти під водою не входить в наші потреби.

Також слід врахувати, що конструктивні виконання висотомірів можуть бути різних розмірів, тому ми уникатимемо характеристики варіантів висотомірів, габаритне виконання яких перевищує допустимі розміри.

З урахуванням наших вимог до висотоміра, складемо порівняльну схему основних характеристик висотомірів різних типів, які представлені в таблиці 1.

Оглядаючи порівняльну таблицю висотомірів, ми можемо обрати той тип висотоміра, який задовольняє нашим потребам. Залежно від дальності дії, всі перераховані параметри відповідають нашим вимогам.

Для точного позиціонування нам необхідний якнайточніший висотомір. З чотирьох варіантів наразі підходять три: барометричний, лазерний і радарний висотоміри. Вимірювання за допомогою GPS у даному випадку не підходить, оскільки наша ціль - це позиціонування без системи GPS, і може давати занадто велику похибку у вимірах, що є неприпустимим для точного позиціонування.

Також важливо відзначити, що на сьогоднішній день барометричні висотоміри можуть бути досить точними. Однак їх виміри залежать від атмосферного тиску, і точка відліку вимагає постійного оновлення даних тиску на поверхні.

Через це їх можна використовувати як систему допоміжного виміру висоти, але не для точного позиціонування.

Таблиця 1 – Порівняння характеристик висотомірів для дронів.

Тип висото- міру	Барометрич- ний	Лазерний	Радарний	GPS
Характерис- тика				
Дальність дії, м	0,6–10000+	0,2–450	0,1–100	0,5–10000+
Точність, м	±0,5–10	±0,01–0,04	±0,1–0,02	±5–25
Середні габаритні розміри (виконання для БПЛА), мм	~30x20x2(ДП)	30x20x30– 160x110x160	100x70x15	25x25x7(ДП)
Ціна, \$	~8–30	80–15000	67–800	~8–70

Примітка. ДП – габаритні розміри друкованої плати без корпусу.

Щодо габаритних розмірів, взагалі всі варіанти задовольняють наші потреби. Проте, за ціною, найбільш економічним варіантом було б обрати або барометричний, або GPS пристрій. Але, як було вже описано вище, ці два варіанти ми відкидаємо, тому будемо вибирати між радарним і лазерним висотомірами.

Порівнюючи радарний і лазерний висотоміри, можна сказати, що вони за своїми параметрами в цілому схожі, але є декілька нюансів, які треба пояснити. Якщо вибирати лазерні висотоміри, то вони мають декілька недоліків у порівнянні з радарними висотомірами, а саме:

- лазерні висотоміри залежать від погодних умов, таких як дощ, туман і подібні явища, оскільки ці умови перешкоджають вільному проходженню променів і точність вимірювань може погіршуватися, тоді як радарний висотомір майже не залежить від погодних умов;

– лазерні висотоміри можуть давати більшу похибку в густих лісах порівняно з радарними, це пов'язано з тим, що промінь лазера не має такої проникної здатності, як у радіохвиль;

– дуже великі масиви даних, які складніше інтерпретувати порівняно з радіовисотоміром.

Розглянувши всі висотоміри і проаналізувавши їх переваги та недоліки, було обрано саме радарний висотомір.

## **1.2 Радіовисотомір безперервної дії**

Для досягнення поставлених цілей у цій роботі було важливо правильно вибрати висотомір, який найбільше відповідає нашим потребам. Наш вибір зупинився на радіовисотомірі (РВ) з лінійно-частотною модуляцією (ЛЧМ), також відомому як радіовисотомір безперервної дії (РВБД). Зараз такі радіолокаційні пристрої є найпопулярнішими та найбільш дослідженими.

Спосіб лінійно-частотної модуляції дозволяє забезпечити високу точність і роздільну здатність в різних умовах. На відміну від імпульсних радіолокаторів, він також має знижене енергоспоживання.

У цьому підрозділі ми розглянемо РВ, який ми обрали і проаналізуємо структуру, принцип роботи і його характеристики.

### **1.2.1 Структура та принцип роботи РВБД**

Застосування лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) сигналу при створенні висотоміра надає можливість розроблення високоточного і високороздільного пристрою з безперервним випромінюванням. Цей метод дає змогу досягти високої точності вимірювання висоти, заснованої на аналізі зміни частоти випромінюваного сигналу.

Загальну схему радіовисотоміру зображено на рисунку 1.

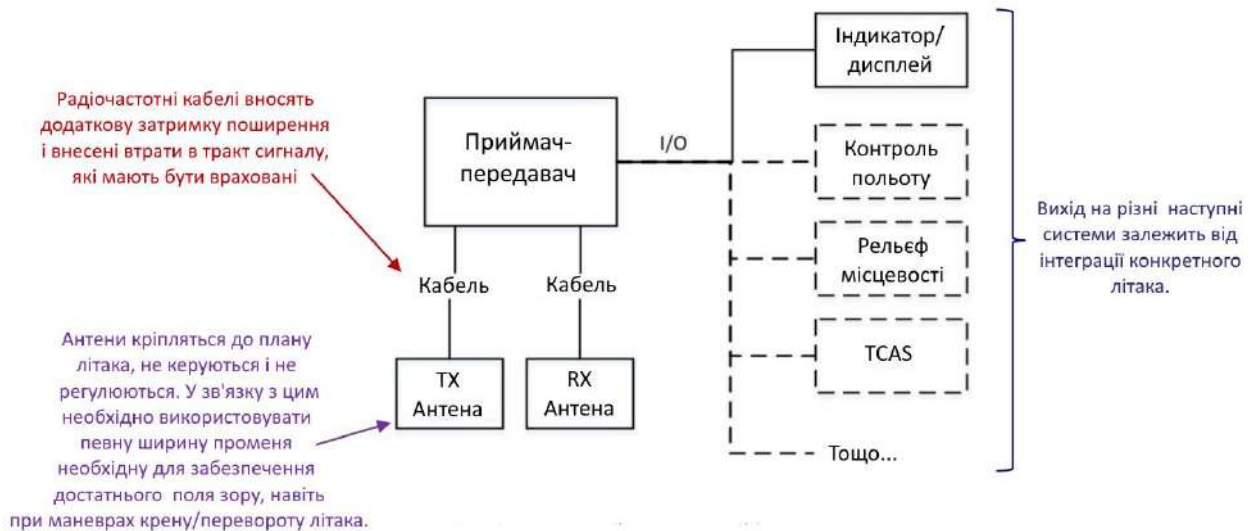


Рисунок 1 – Загальна схема радіовисотоміру [1]

Важливою перевагою лінійної частотної модуляції є безперервність випромінювання, що забезпечує безперервне і плавне вимірювання висоти без істотних перерв або дискретизації даних. Це дає змогу поліпшити роздільну здатність пристрою, забезпечуючи точніші та надійніші результати вимірювань.

Частотна модуляція дає змогу висотоміру реєструвати зміни частоти залежно від топографії поверхні. Це дає змогу створювати детальні карти рельєфу, що відображають висотні особливості місцевості.

Інформацію про рельєф поверхні можна візуалізувати і представити у вигляді тривимірних моделей, карт висот або графіків, що робить цей пристрій корисним для різних застосунків, включно з геодезією, навігацією, картографією та геологічними дослідженнями.

Роботу висотоміра за постійного рівня висоти (відсутності вертикальної швидкості) пояснює часова діаграма (рисунок 2).

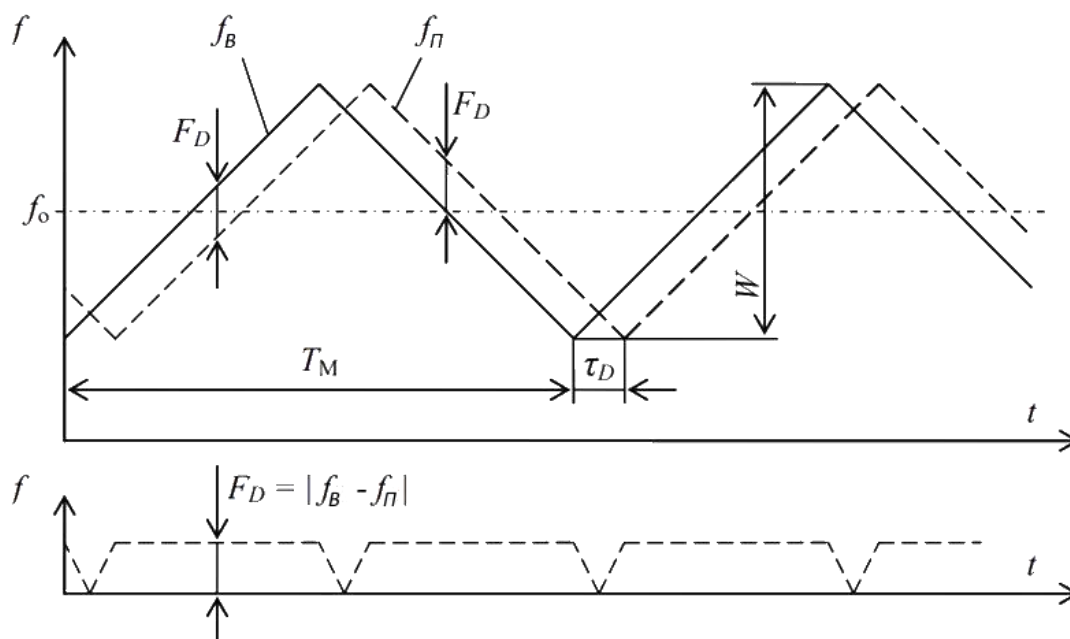


Рисунок 2 – Часова діаграма роботи РВ з лінійно частотною модуляцією [2]

Графік показує зміну частоти випромінюваних і прийнятих коливань, суцільна лінія та пунктирна лінія відповідно, що мають середню частоту  $f_0$ , період модуляції  $T_M$  і девіацію частоти  $W$ . Нижній графік відтворює зміну різниці далекомірної частоти  $F_D$ , яку ще називають частотою биття.

### 1.2.2 Типові характеристики радіовисотомірів

Для розуміння того, який радіовисотомір потрібен для наших завдань, слід визначити, який діапазон характеристик він охоплює. У таблиці 2 наведено характеристики радіовисотомірів, які відповідають вимірюванню висоти перебування літальних апаратів.

Загалом існуючі РВБД можна розділити на два типи: радіовисотоміри діапазону 4,3 ГГц і 24 ГГц. Перші найчастіше використовують у цивільній авіації, винищувачах, ракетах дальнього призначення (максимальна висота вимірювань до 800 м) і мають доволі великі габарити, що становлять проблему для БПЛА (приблизно 20 см у довжину та 10 см у ширину і висоту). Другі РВБД вже мають прийнятні розміри для будь-яких типів БПЛА, але й дальність вимірювання

таких висотомірів сягає максимум до 100 метрів (іноді до 200 метрів, але при цьому похибка зростає).

Таблиця 2 – Діапазон характеристик радіовисотометрів для ЛА

Параметр	Радіовисотомір безперервної дії	Імпульсний радіовисотомір
<b>Передавач</b>		
Пікова потужність	0,05 – 2 Вт	1 – 10 Вт
Номінальна частота	4 – 26,5 ГГц	4 – 26,5 ГГц
Ширина імпульсу	–	20 нс – 20 мкс
Інтервал повторення імпульсів	–	10 – 200 $\mu$ с
Смуга розгортки	100 – 180 МГц	–
Період розгортки	0,2 – 10 мс	–
<b>Приймач</b>		
Проміжна частота	–	20 – 80 МГц
Пропускна здатність	0,2 – 2 МГц (односторонній)	10 – 50 МГц
Смуга пропускання детектора	0,1 – 10 кГц	0,1 – 50 кГц

На рисунку 3 наведено приклади виконання РВБД з різними номінальними частотами.



Рисунок 3 – РВБД різного виконання:  
а) з частотою 4.3 ГГц; б) з частотою 24 ГГц

### 1.2.3 Вибір та порівняльний аналіз радіовисотомірів безперервної дії

У таблиці 3 наведено порівняння ряду РВБД-пристроїв за рядом характеристик. Це порівняння дозволить вибрати найоптимальніший варіант, відповідний поставленим завданням.

Таблиця 3 – Характеристики та порівняння РВБД

Мо- дель РВБД	Ціна, \$	Номі- нальна час- тота, ГГц	Спо- жи- вання , Вт	Даль- ність дії, м	Точність виміру висоти, м	Роз- дільн а зда- т- ність, м	Горизон- тальна ширина променю	Вертика- льна ши- рина променю	Розміри, мм
FM24- NP100	~67.08	24	0,4	0,5–20	±0,1	0,01	78(-3db)	23(-3db)	44x34x5 (PCB)
ISTRA24	~261,76 (CHINA) ~410,99 (UA)	24– 24.25	~1	0,2–50	–	–	20 (-19db)	31 (-19db)	93,66x 50,8x17
Nanorada r NRA24	~203,15	24–24,2	1,4– 1,8	0,1– 200	±0,02	–	28 (-6db)	18 (-6db)	130x70 x14,5
Nanorada r NRA15 (30M)	~169.15	24–24,2	1,1	0,1– 30	±0,04	–	41 (-6db)	37 (-6db)	100x57x 16,5
Nanorad ar NRA15( 30M)	~78	24–24,2	0,5	0,1– 30	±0,1	0,75	100 (-6db)	38 (-6db)	40x31x6 (PCB)
US-D1	~599	24	2	0,5– 50	0,06 (<1м) 0,04 (>1м)	–	46	43	108x79x 20
LD-24	~519	24– 24.25	~1,1	0,2– 50	–	–	31	20	93,66x35,8x 17

### 1.3 Постановка завдань магістерської роботи

У даній магістерській роботі буде розглянуто тему "Методика позиціонування БПЛА з використанням частотного висотоміру безперервної дії". Основна мета роботи – розробити методику позиціонування БПЛА з використанням

радіовисотоміра безперервної дії та створити просту програмну реалізацію для ілюстративного прикладу.

У рамках цієї роботи буде розглянуто такі завдання:

– вивчення методів безсупутникового орієнтування: Буде розглянуто різні методи безсупутникового орієнтування, з яких буде обрано ті, що найбільше підходять для подальшого використання;

– аналіз методу підповерхневого радіолокаційного зондування: буде проведено аналіз наявних методів підповерхневого радіолокаційного зондування;

– дослідження особливостей поглинання радіочастотних сигналів різними типами поверхні: буде проведено дослідження, як різні типи поверхні впливають на поглинання радіочастотних сигналів;

– розробка принципу побудови карт місцевості за допомогою радіовисотоміра безперервної дії: буде розроблено принцип побудови карт місцевості з використанням радіовисотоміра безперервної дії;

– створення програмної реалізації орієнтування на основі карт висот: наприкінці роботи буде створено просту програмну реалізацію для ілюстративного прикладу, що демонструє орієнтування на основі карт висот і ґрунтів.

Результатом цієї роботи буде розроблена методика позиціювання БПЛА з використанням радіовисотоміра безперервної дії та програмна реалізація цього методу. Це дасть змогу поліпшити точність і ефективність позиціювання БПЛА та розширити можливості їхнього використання.



## **2 МАТЕМАТИЧНІ ЗАСАДИ ВИКОРИСТАННЯ РВБД ДЛЯ ОРІЄНТУ- ВАННЯ**

### **2.1 Методи безспутникового орієнтування**

#### **2.1.1 Застосування астрономічних об'єктів.**

Цей метод ґрунтується на принципах астрономічної навігації, які були розроблені ще в стародавні часи. Метод заснований на використанні зірок, планет та інших небесних тіл як точок опори для визначення напрямку і положення ракети. Астрономічні об'єкти фіксуються за допомогою датчиків і використовуються для коригування траєкторії польоту.

Зірки мають стабільні та відомі координати, що забезпечує високу точність наведення ракети на ціль але мають обмежену видимість і доступність. Видимість зірок може бути обмежена вночі, хмарністю або географічними особливостями місцевості. Для визначення положення ракети щодо зірок потрібні складні математичні обчислення і високоточні датчики, усе це спонукало, згодом, для цілей позиціонування літальних апаратів придивитися до інших методів безспутникової орієнтації.

#### **2.1.2 Інерційна навігаційна система**

Інерційна навігаційна система (ІНС) – це навігаційний пристрій, який використовує датчики руху (акселерометри), датчики обертання (гіроскопи) та комп'ютер для безперервного обчислення методом "мертвої точки" положення, орієнтації та швидкості (напрямку та швидкості руху) рухомого об'єкта без необхідності зовнішніх послань [3]. Часто інерційні датчики доповнюються барометричним висотоміром, а іноді магнітними датчиками (магнітометрами) та/або пристроями вимірювання швидкості. ІНС використовуються на мобільних

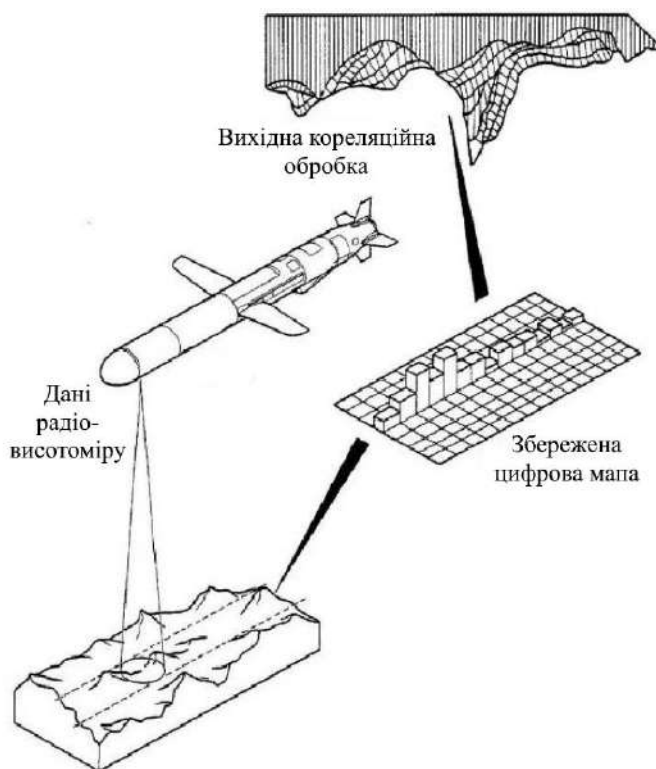
роботах і на транспортних засобах, таких як кораблі, літаки, підводні човни, керовані ракети і космічні апарати.

Всі ІНС страждають від дрейфу інтегрування: невеликі похибки у вимірюванні прискорення і кутової швидкості інтегруються у дедалі більші похибки швидкості, які складаються у ще більші похибки положення [4].

Оскільки нове положення розраховується на основі попереднього розрахованого положення і виміряних прискорення і кутової швидкості, ці похибки накопичуються приблизно пропорційно до часу, що минув з моменту введення початкового положення. Навіть найкращі акселерометри зі стандартною похибкою 10 мкг накопичують похибку в 50 метрів протягом 17 хвилин, тому позиція повинна періодично коригуватися за допомогою даних, отриманих від іншого типу навігаційної системи.

### **2.1.3 Навігація за рельєфом місцевості**

Основною метою навігації за рельєфом місцевості (РМ), як і для інших навігаційних систем, є забезпечення точної та надійної оцінки, що складається з його положення та його похідних. Навігаційне рішення базується на датчиках, які не залежать від зовнішніх джерел, що робить стійкою до завад і перешкод. Принцип роботи навігації за РМ полягає в інтеграції інформації від ІНС та системи позиціонування на місцевості. Система навігації за РМ найчастіше базується на радіолокаційному висотомірі, що вимірює відстань до землі, і базі даних рельєфу зі збереженою висотою місцевості. Вимірювання РВ, може забезпечити вимірювання висоти місцевості. База даних висот зберігає висоту місцевості для вибраної позиції в горизонтальній площині в діапазоні від кількох метрів до кількох сотень залежно від якості бази даних. На рисунку 4 зображено принцип навігації за рельєфом місцевості.



Рисунку 4 – Навігація за рельєфом місцевості

#### 2.1.4 Зіставлення цифрових зображень поверхні землі

Технологія DSMAC (Digital Scene Matching Area Correlation) – це технологія оптичного відстеження та реєстрації зображень поверхні землі для точних вимірювань змін у зображеннях. Цей метод використовується як допоміжна система для позиціонування літального апарату у просторі. На рисунку 5 зображено приклад роботи DSMAC.

DSMAC безпосередньо залежить від якості зображення, чи то еталонне зображення, чи то дані про політ. Цей вплив зумовлений різними факторами, такими як рівень освітленості, пора року та особливості освітлення в різні години доби, включно з довжиною тіней.

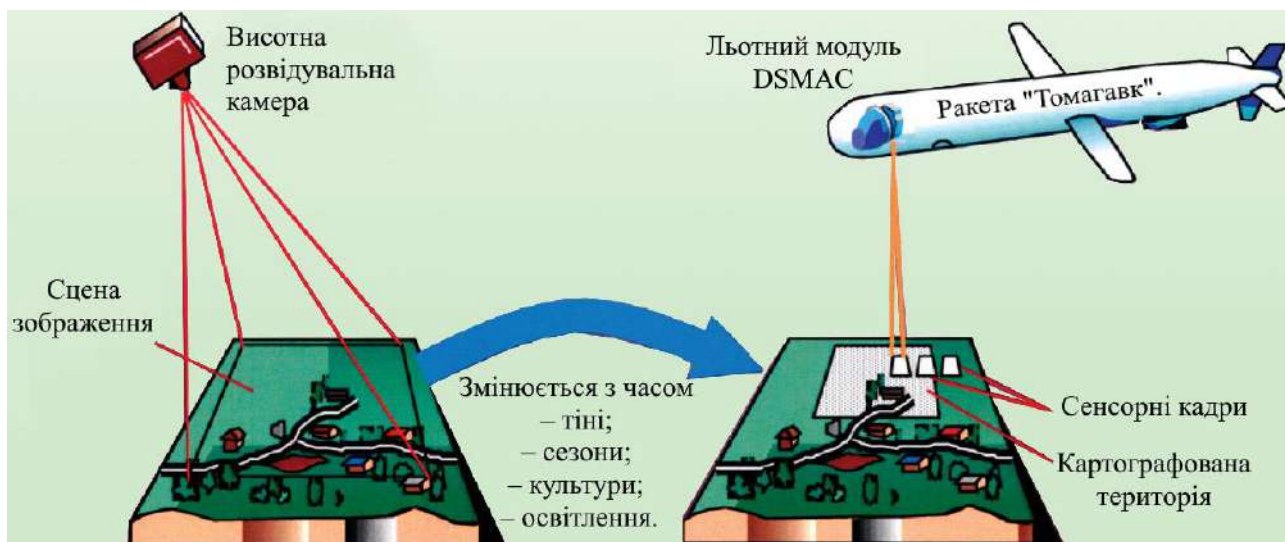


Рисунок 5 – Приклад роботи технології DSMAC

Також треба зазначити, що вночі функціонування DSMAC фактично знижується, що призводить до зменшення ефективності позиціонування літального апарату, обладнаного даною системою.

### 2.1.5 Зондування підповерхневого шару землі

У цьому методі підповерхневого зондування ґрунтів основна увага приділяється використанню попередньо створеної еталонної карти ґрунтів. Ця карта слугує основою для аналізу та інтерпретації результатів зондування, даючи змогу більш ефективно і точно визначити характеристики підземних шарів. Аналогічно до того, як під час орієнтування за рельєфом важливо враховувати місцеві особливості ландшафту, використання еталонної карти ґрунтів надає можливість врахувати унікальні особливості ґрунтового покриття в конкретному регіоні.

До переваг цього підходу можна віднести те, що порівняно з мінливим рельєфом поверхні, підповерхневий шар землі більш стійкий до змін. Тому використання такого методу на додаток до наявних приносить більше надійності та можливостей для орієнтації.

Підсумовуючи сказане, кожен описаний метод позиціонування на сьогодні має свою актуальність і власні переваги при використанні в умовах, де вони найбільш ефективні. Для орієнтування у космічному просторі застосування астрономічних об'єктів, для орієнтування на невеликих висотах – лазерно-оптичні датчики та радіовисотоміри, а інерційна навігація, взагалі, використовується в усіх випадках орієнтування, але має значні похибки, тому працює тільки у комбінації з іншими методами.

Для наших завдань позиціонування БПЛА була обрана така комбінація методів: використання інерційної навігаційної системи, методу навігації за РМ з використанням радіовисотоміра безперервної дії та навігації за допомогою зондування підповерхневого шару.

Треба також відзначити, що висотоміри з номінальною частотою 24 ГГц висотомір не охоплюють відповідний діапазон частот (від 1 МГц до 1000 МГц [5]), необхідний для проведення підповерхневого зондування. Однак, у даній роботі все одно було розглянуто метод підповерхневого зондування, який можна використовувати як допоміжний засіб системи навігації у доданок к методу позиціонування за рельєфом місцевості.

## **2.2 Методи радіолокаційного підповерхневого зондування**

### **2.2.1 Радіоімпульсний метод**

На рисунку 6 показано узагальнену структурну схему радіолокатора (РЛ), що включає передавач, який виробляє зондувальний сигнал і під'єднаний до передавальної антени, приймач, до якого під'єднано приймальну антену. Вихід приймача з'єднаний з осцилографічним індикатором і записуючим пристроєм. Ці пристрої управляються від синхронізатора, що входить до складу передавача.

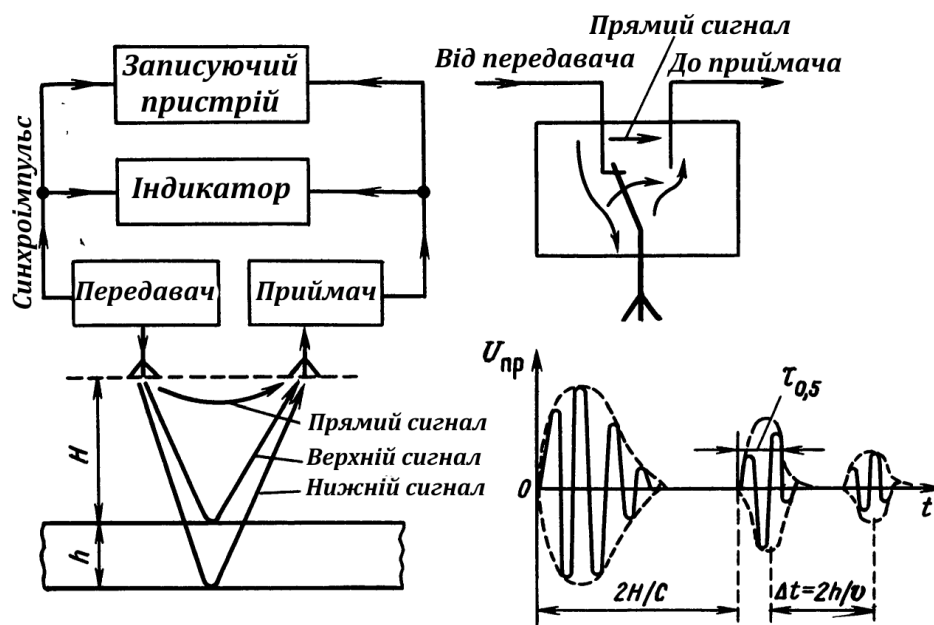


Рисунок 6 – Структурна схема імпульсного радіолокатора, схема дії антенного перемикача і часові діаграми сигналів на вході приймача

Під час радіолокаційного зондування шару завтовшки  $h$  на вхід приймальної антени потрапляють три сигнали: прямий (такий, що просочується), верхній сигнал, відбитий від верхнього краю шару, та нижній сигнал, відбитий від нижнього краю шару, а також сигнали від проміжних меж між верхнім і нижнім краями. Найбільш широко поширений імпульсний метод радіолокації, заснований на використанні періодичної послідовності зондувальних імпульсів, які формує передавач. Відбиті імпульси в межах періоду повторення (діапазон однозначного вимірювання дальності) запізнюються відносно випромінюваних, і цей час запізнювання дає змогу виміряти відстань до цілі. У разі імпульсного методу найчастіше використовується одна приймально-передавальна антена з антенним перемикачем, схематично показаним на рисунку 6. Під час формування імпульсу передавача приймач замикається (бланкується), проте в приймачі все ж є прямий сигнал, що просочується, зазвичай розтягнутий за рахунок перевантаження вхідних каскадів. Тому лише після закінчення імпульсу передавача стає можливим прийом відбитого імпульсу.

Для РЛ, розташованого на літальному апараті, що перебуває на висоті  $H$ , відбувається природна тимчасова розв'язка прямого і відбитого сигналів, якщо інтервал часу  $2H/c$  перевищує тривалість прямого імпульсу. Якщо шар має чіткі електромагнітні кордони (тобто помітну відмінність діелектричних проникностей відповідних середовищ), то відбиті від його кордонів сигнали зсунуті один відносно одного за часом. Під час подальшого опрацювання сигналів у приймачі використовуються або самі ці сигнали, або їхні обвідні, отримані в результаті детектування.

Радіолокаційне вимірювання товщини шару  $h$  ґрунтується на визначенні інтервалу часу  $\Delta t$  між сигналами, відбитими від його меж

$$\Delta t = \frac{2h}{v_\phi},$$

де  $v_\phi = c/Re\sqrt{\varepsilon}$  – фазова швидкість розповсюдження радіохвиль у шарі при  $\mu = 1$ .

Тоді

$$h = v \frac{\Delta t}{2},$$

де  $v$  – швидкість поширення радіосигналу в шарі.

Таким чином, мінімально вимірювана товщина шару визначається мінімально вимірюваним інтервалом  $\Delta t_{\min}$ . Згідно з критерієм Релея, для радіоімпульсів однакової амплітуди роздільна здатність за дальністю визначається тривалістю радіоімпульсів  $\tau_{0,5}$  на рівні 0,5 від максимальної амплітуди, тобто  $\Delta t_{\min} = \tau_{0,5}$ , звідки

$$h_{\min} = v \frac{\tau_{0,5}}{2}.$$

Наприклад, для вологого пісковику на частоті  $f = 100$  МГц, коли  $\varepsilon' \approx Re\sqrt{\varepsilon} \approx 6$  (додаток Б.1), за  $h_{\min} = 50$  см отримаємо, що необхідна тривалість імпульсу  $\tau_{0,5} \approx 8$  нс.

Інший важливий параметр під час радіолокаційного зондування – необхідний динамічний діапазон, тобто відношення максимальної і мінімальної амплітуд сигналів на виході приймача РЛ. Необхідний динамічний діапазон визначається максимально можливим відношенням амплітуд сигналів, відбитих від верхньої і нижньої меж шару:

$$D = q_{\max} = 20 \lg \left( \frac{E_B}{E_H} \right) \approx 2\Gamma_{\max} h_{\max},$$

де  $q = 2\Gamma h = 8,86 \cdot 2ah$ ;

$\Gamma$  – питома загасання, Дб/м;

Якщо  $\Delta t \gg \tau_{0,5}$ , то теоретично під час використання засобів боротьби з перервантями, наприклад, тимчасового автоматичного регулювання посилення (ТАРП), динамічний діапазон РЛ може наблизитися до величини  $D = 10 \lg (P_{\text{прос}}/P_{\text{пр мін}})$ , де  $P_{\text{прос}}$  – прямий сигнал що просочується з передавача, а  $P_{\text{пр мін}}$  - чутливість приймача. Введемо додатково поняття розв'язки між антенами (або між виходами передавача і входом приймача в одноантенному варіанті)  $l = P_{\text{п}}/P_{\text{прос}}$ . Тоді динамічний діапазон (у дБ)

$$D = P - l,$$

де  $P = 10 \lg (P_{\text{п}}/P_{\text{пр мін}})$  – так званий потенціал РЛ.

Для досить тонких шарів за  $\Delta t \approx \tau_{0,5}$  динамічний діапазон визначається відношенням амплітуд головної і першої бічної пелюсток сигналів. Як відомо,



імпульсна характеристика смугового фільтра з прямокутною амплітудно-частотною характеристикою має вигляд  $\sin x/x$ , тобто рівень першої бічної пелюстки нижчий за головну на 13 дБ. Практично шляхом заокруглення амплітудно-частотної характеристики, що пов'язано з розширенням головної пелюстки, можна забезпечити  $D = 15\text{--}20$  дБ. Припускаючи, наприклад, для  $h_{\min} = 0,5$  значення  $D = 15$  дБ, отримаємо максимально допустиме питоме загасання  $\Gamma_{\max} = 15$  дБ/м, що, як впливає з виконується для вологого пісковика лише за  $f \leq 100$  МГц. Слід зазначити, що практично збільшити  $D$  пропорційно товщині шару  $h$  не завжди можливо. Тому для  $h$  у кілька метрів може зберегтися той самий динамічний діапазон, близько 15 дБ, тобто допустиме значення  $\Gamma_{\max}$  буде значно меншим.

Зі сказаного вище впливає, що вимоги високої роздільної здатності з метою розділення сигналів від кордонів тонких шарів і проникаючої здатності радіохвиль у шар суперечливі. Наприклад, якщо для вологого пісковика за тривалості імпульсу  $\tau_{0,5} \approx 8$  нс (необхідної у разі  $\epsilon' = 6$  за умови  $h_{\min} = 0,5$  м) зменшити кількість періодів коливань до гранично можливого - одного періоду (одноперіодний імпульс), то відповідна частота  $f = 1/\tau_{0,5} = 125$  МГц не забезпечує необхідного динамічного діапазону  $D = 15$  дБ навіть для мінімальної товщини  $h_{\min} = 0,5$  м.

Наведений приклад, як і приклади з морським льодом та іншими середовищами [6], показує, що, на відміну від широко відомих застосувань радіолокації для спостереження за літаками, кораблями, земною поверхнею тощо, у підповерхневому радіолокаційному зондуванні осадових і гірських порід слід переходити від сантиметрового та дециметрового діапазонів хвиль до метрового й навіть декаметрового, використовуючи гранично короткі імпульси – одноперіодні або близькі до них.

### 2.2.2 Метод безперервного випромінювання радіохвиль із частотною модуляцією (частотний метод)

Цей метод вже давно успішно застосовується в радіовисотометрії для визначення справжньої висоти польоту літального апарата. Він заснований на використанні безперервного сигналу з частотною модуляцією за симетричним або несиметричним пилкоподібним законом. Частота биття між опорним (прямим) і відбитим сигналами є функцією відстані до цілі.

На рисунку 7 показано структурну схему РЛ із двома змішувачами [6, 7], роботу якого ілюструє рисунок 8. Частота передавача змінюється за симетричним пилкоподібним законом  $f_{\Pi}(t)$  (суцільна лінія рисунок 8); на вході приймальної антени утворюються коливання, відбиті від верхньої та нижньої меж шару з частотами  $f_{\text{В}}(t)$  та  $f_{\text{Н}}(t)$ , що відрізняються від  $f_{\Pi}(t)$  часовими зсувами  $t_{\text{В}}$  та  $f_{\text{Н}} = t_{\text{В}} + \Delta t$ .

Тут

$$t_{\text{В}} = \frac{l_{\Pi} l_{\text{пр}}}{v_{\text{к}}} + \frac{2H}{c},$$

де  $H$  – висота розташування РЛ;

$l_{\Pi}, l_{\text{пр}}$  – довжини відповідних кабелів;

$v_{\text{к}}$  – швидкість поширення радіохвиль у кабелі;

$\Delta t = 2h/v$  – запізнювання радіохвиль у шарі.

Сигнали, відбиті від меж шару, надходять на вхід змішувача 1, де вони змішуються з прямим сигналом передавача. У результаті утворюються биття, миттєві частоти яких  $F_{\text{обВ}}(t)$  і  $F_{\text{обН}}(t)$  протягом більшої частини, напівперіоду модуляції  $T_{\text{М}}/2$  (за винятком так званих "зон звернення") залишаються постійними, рівними

$$F_{\text{обВ}} = f_{\Pi}(t) - f_{\text{В}}(t) = 2\Delta f_{\text{М}} F_{\text{М}} t_{\text{В}};$$

$$F_{\text{обН}} = f_{\Pi}(t) - f_{\text{Н}}(t) = 2\Delta f_{\text{М}} F_{\text{М}} t_{\text{Н}},$$

де  $\Delta f_M / (T_M/2) = 2\Delta f_M F_M$  – швидкість зміни частоти;  
 $\Delta f_M$  – девіація частоти;  
 $F_M$  – частота модуляції.

Коливання з частотами  $F_{\text{бв}}$  і  $F_{\text{бн}}$  після змішувача 1 можна подати на аналізатор спектра, внаслідок чого на осі частот утворюються два імпульси  $S_1(f)$  (рисунок б), інтервал між якими  $F_6$  пропорційний товщині шару:

$$F_6 = F_{\text{бв}} - F_{\text{бн}} = 2\Delta f_M F_M \Delta t = \frac{4\Delta f_M F_M}{v} h.$$

Змішувані коливання з частотами  $F_{\text{бв}}(t)$  і  $F_{\text{бн}}(t)$  дають биття у вигляді часової функції  $U_{61}(t)$  (рисунок 8), що огинає їх, протягом більшої частини напівперіоду коливань має постійну частоту, яка дорівнює різницевій  $F_6$ . При цьому можливий і інший спосіб виділення інформації – за допомогою змішувача 2, на виході якого в результаті детектування виділяються коливання  $U_{62}(t)$ , протягом більшої частини напівперіоду  $T_M/2$  близькі до синусоїдальних із частотою  $F_6 \sim h$ . Для полегшення фільтрації після детектування бажано, щоб частота  $F_6$  обвідної  $U_{61}(t)$ , тобто  $U_{62}(t)$ , була значно меншою за частоту заповнення  $U_{61}(t)$ , яка близька до частоти сильнішого з двох змішуваних коливань. Ця умова виконується автоматично за великої висоти  $H$ . Якщо ж  $H \approx 0$ , то вводиться початкова висота за допомогою кабелів досить великої довжини  $l_{\text{п}} + l_{\text{пр}}$ .

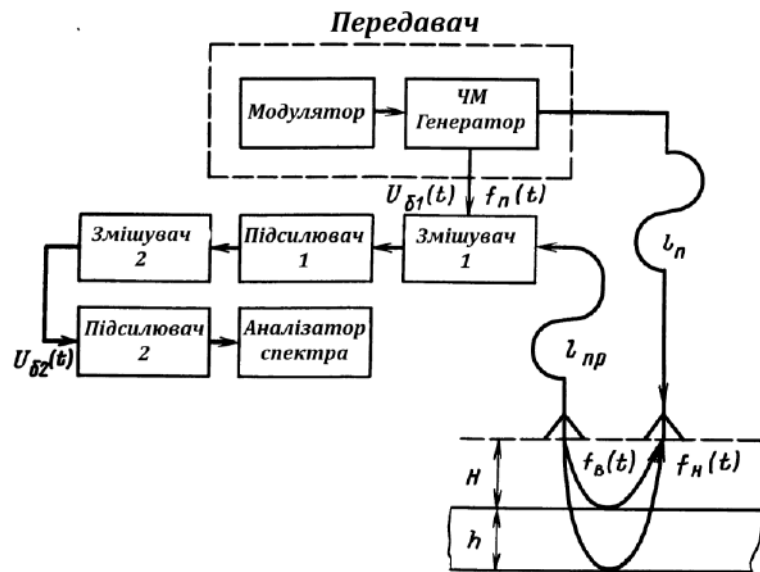


Рисунок 7 – Структурна схема РЛ із частотною модуляцією

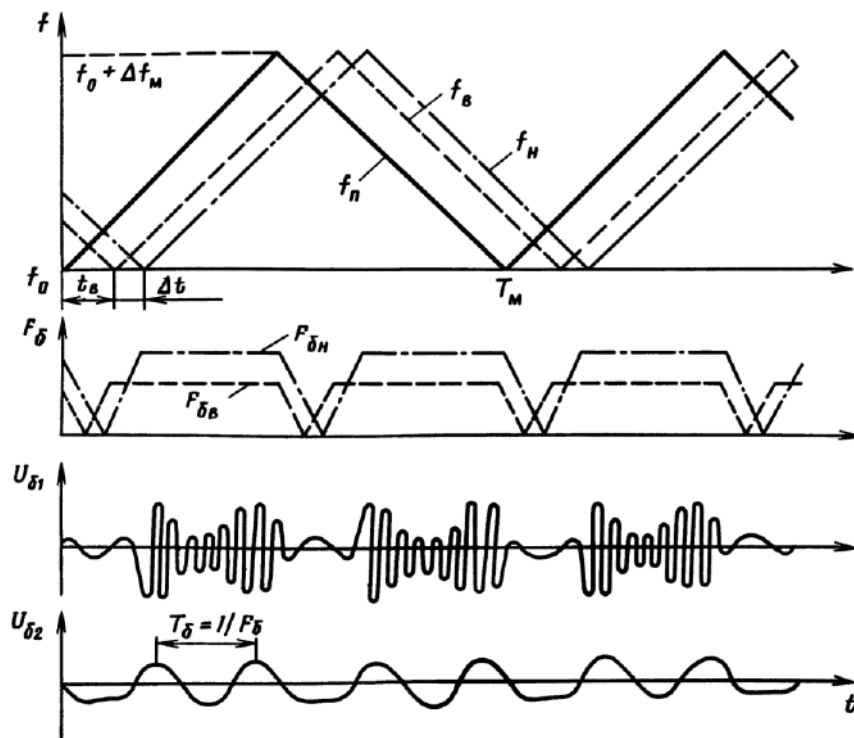


Рисунок 8 – Тимчасові діаграми процесів у РЛ за схемою рисунка 4

### 2.2.3 Особливості частотного методу

Спектр сигналу биття за досить великого часу вимірювання складається з дискретних спектральних ліній з періодом  $F_M$ , розташованих на частотах  $nF_M$ . Обвідна цих ліній близька до спектра прямокутного імпульсу тривалістю  $T_M/2$ . Максимум огинаючої дорівнює  $F_{60}$  і не обов'язково збігається з  $nF_M$ , оскільки частота биття може бути не кратна  $F_M$  [8, 9].

Якщо спектр перетвореного сигналу спостерігати, наприклад, на індикаторі паралельного спектроаналізатора, то можна визначити частоту  $F_{60}$ , а отже, дальність до цілі  $D$ . Ширина основної пелюстки спектра на рівні 0,5 дорівнює  $\Delta F_{60\ 0,5} = 2F_M$ . Звідси роздільна здатність за дальністю за критерієм Релея

$$\delta D = c \cdot \frac{\Delta F_{60\ 0,5}}{4\Delta f_M F_M} = \frac{c}{2\Delta f_M}.$$

Стосовно вимірювання товщини шару на осі частот утворюються два "імпульси", максимумами яких відповідають частотам

$$F_{601} = \frac{4\Delta f_M F_M H}{c};$$

$$F_{602} = \frac{4\Delta f_M F_M H}{c} + \frac{4\Delta f_M F_M h}{v},$$

де  $H$  – висота літального апарата під час вимірювання.

Для вимірювання товщини шару  $h$  необхідно виміряти інтервал між цими максимумами  $F_{60} = 4\Delta f_M F_M h/v$  [10]. Роздільна здатність за віссю частот забезпечується при  $F_{60} = 4\Delta f_M F_M h/v > 2F_M$  тобто при

$$h > \frac{v}{2\Delta f_M}. \quad (1)$$

Необхідна девіація частоти (а отже, за глибокої модуляції і ширина спектра)

$$\Delta f_m = \frac{v}{2h_{\text{мін}}},$$

дорівнює  $l/\tau_{0,5}$  для радіоімпульсного методу.

Під час оцінки можливостей методу вимірювання слід врахувати, що за малої товщини шару  $h$  менший із сигналів опиняється в області бічних пелюсток більшого сигналу. Так, наприклад, у розглянутому випадку обвідної вигляду  $\sin x/x$  амплітуда першої бічної пелюстки відповідає 0,22 від амплітуди головної пелюстки. Очевидно, що система обробки повинна мати якомога більший динамічний діапазон, а спектр перетвореного сигналу – малий рівень бічних пелюсток. Останнє досягається переходом від рівномірної обвідної перетвореного сигналу до згладженої (вагове оброблення), що, однак, пов'язано з відповідним розширенням головної пелюстки.

З принципової точки зору частотний та імпульсний методи рівноцінні. З погляду технічної реалізації слід зазначити, що те масштабне перетворення частоти, яке за імпульсного методу забезпечується стробоскопічним опрацюванням, у даному випадку відбувається завдяки використанню змішувача і подальшого спектрального аналізу. Зауважимо, що як в імпульсному методі положення максимумів імпульсів, відбитих від меж шару, на осі часу, так і в частотному методі положення максимумів спектра на осі частот залежать від висоти польоту  $H$ , і для зручності вимірювання необхідно вживати заходів щодо виключення цієї висоти.

У разі використання частотного методу є принципова можливість виключення висоти польоту вельми простими засобами, а саме шляхом виділення за допомогою другого змішувача биття між сигналами, відбитими від меж шару (рисунок 9) [11].

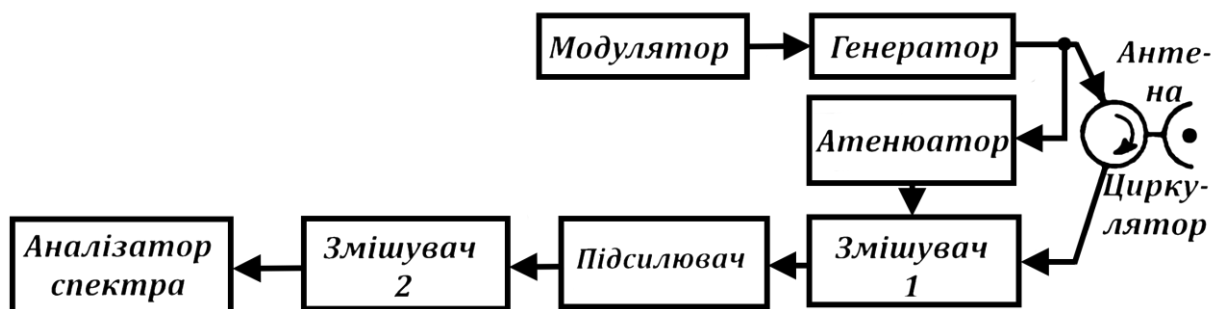


Рисунок 9 – Структурна схема ЧМ-радіолокатора з двома змішувачами [11].

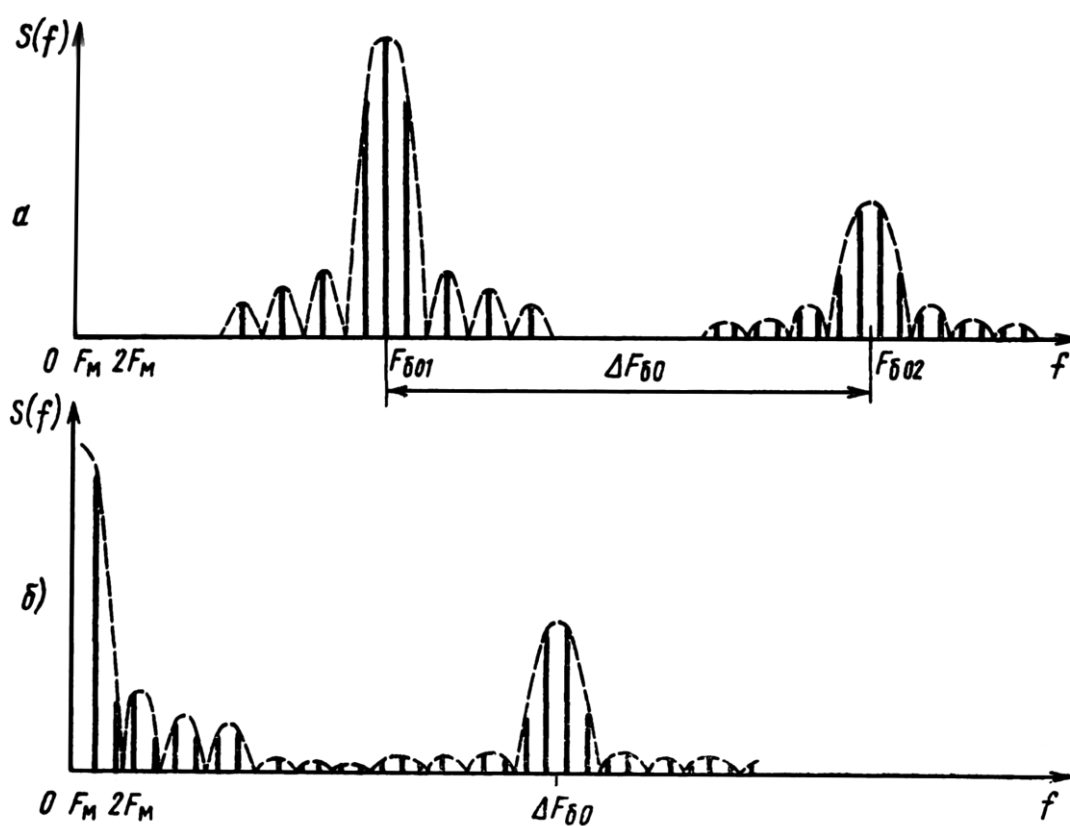


Рисунок 10 – Спектр сигналу на виході змішувачів (рисунок 9) 1 (а) і 2 (б)

Спектр на виході змішувача 1 (рисунок 10, а) перетворюється на виході змішувача 2 у результаті биття різних гармонійних складових спектру, показаний на рисунку 10, б. Він подібний за формою до спектра сигналу, відбитого від кожної з меж шару, а його максимум розташований на частоті  $\Delta F_{\delta 0} = F_{\delta 02} - F_{\delta 01} = (4\Delta f_M F_M / v)h$ , тобто дає безпосередньо інформацію про товщину шару.

Знімання цієї інформації може здійснюватися за допомогою спектроаналізатора паралельного типу.

Мінімальна товщина шару  $h_{\text{мін}} = v(h_{\text{мін}})/2\Delta f_{\text{м}}$  (1) відповідає частоті аналізу  $\Delta F_{\text{б0 мін}} = 2F_{\text{м}}$ . Максимальна частота аналізу, якщо для простоти вважати  $v(h_{\text{мін}})/v(h_{\text{макс}}) \approx 1$ , дорівнює

$$\Delta F_{\text{б0 макс}} = \frac{2F_{\text{м}} h_{\text{макс}}}{h_{\text{мін}}}.$$

Під час реалізації частотного методу з двома змішувачами особливо шкідлива паразитна амплітудна модуляція передавача з частотною модуляцією [12]. Ця паразитна модуляція призводить до того, що і за відсутності відбитого сигналу на виході змішувачів з'являються додаткові складові частоти модуляції  $F_{\text{м}}$  та її гармонік.

## 2.3 Похибки радіочастотних вимірювань

### 2.3.1 Врахування нерівностей відбивальної поверхні

Для необмеженої гладкої поверхні відбиття в дзеркальному напрямку ( $\Theta_1 = \Theta_2$ ) визначається коефіцієнтами Френеля. Відповідне відбиття називається когерентним, оскільки його амплітуда і фаза однозначно визначаються в будь-якій точці простору. При цьому для однопозиційного РЛ  $\Theta_1 = \Theta_2 = 0$ .

Якщо та сама поверхня робиться шорсткою, то когерентна складова в дзеркальному напрямку лише дещо зменшується за випадковим законом. Усереднений коефіцієнт відбиття Френеля

$$\overline{R(\Theta_1)} = R(\Theta_1) e^{-2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\sigma_h \cos\Theta_1\right)^2}, \quad (2)$$



де  $\sigma_h$  – середня квадратична висота нерівностей;

$R(\Theta_1)$  – модуль коефіцієнта відбиття Френеля для гладкої поверхні.

При цьому, однак, з'являються складові відбиття в незеркальному напрямку. Ці складові – некогерентні, тому що є випадковими для різних реалізацій нерівностей, і під час руху носія РЛ їхня амплітуда і фаза змінюються за випадковим законом. Величина  $\overline{R(\Theta_1)}$  зменшується за експоненціальним законом зі зростанням шорсткостей, поки не стане порівнянною з некогерентною складовою. За наявності шорсткого відбивача кінцевих розмірів, наприклад розглянутої вище пластини, у виразі для ефективної відбиваючої площі (ЕВП) з'являється такий самий експоненціальний множник, як у формулі (2).

Для великих нерівностей ( $\sigma_h \gg \lambda$ ) когерентна складова відсутня (поверхня, що дифузно відбиває). При цьому відбитий сигнал формується в результаті складання за потужністю окремих некогерентних складових, так що ЕВП

$$\sigma_{ц} = \sigma_{пит} S_0,$$

де  $\sigma_{пит}$  – питома ЕВП;

$S_0$  – площа ділянки, всі елементарні відбивачі якої одночасно формують відбитий сигнал (залежить від тривалості імпульсу і діаграми спрямованості антени).

Наприклад, при гаусовому розподілі висот нерівностей питома ЕВП

$$\sigma_{пит} = \frac{\sec^4 \Theta_1}{a^2} R^2(0) e^{\frac{-tg^2 \Theta_1}{a^2}},$$

де  $a^2 = \frac{4\sigma_h^2}{l_h^2}$ ;

$l_h$  – інтервал кореляції нерівностей, що залежить від ступеня пологості нерівностей.

### 2.3.2 Частотна залежність рівняння дальності

Розглянемо частотну залежність для потенціалу  $p_n(f)$ . Маємо

$$\rho_n(f) = 10 \lg \frac{64\pi^2 [H + h/Re\sqrt{\varepsilon(f)}]^2 f^2}{c^2 G_n(f) G_{np}(f)} + 2\Gamma_n - 20 \lg R_{ш-пс}(f) - 20 \lg |1 - R_{п-ш}^2(f)|.$$

Задамося тривалістю імпульсу  $\tau_i = n/f$ , де  $n$  – число періодів коливань в імпульсі. Крім того, приймемо, що роздільна здатність у шарі (мінімальна глибина зондування) становить, як це має місце на практиці, зазвичай певну приблизно постійну частку від товщини шару, тобто

$$v_\phi \frac{n}{2f} = \xi \tau_i,$$

де  $\xi \leq 1$ , тому

$$h = \frac{cn}{2\xi f Re\sqrt{\varepsilon(f)}}.$$

Граничним випадком підповерхневого зондування є  $n = 1$  (роздільна здатність дорівнює одній довжині хвилі в середовищі) і  $\xi = 1$ , коли роздільна здатність за дальністю дорівнює глибині шару. З урахуванням сказаного ми отримаємо

$$\rho_n(f) = 10 \lg \frac{64\pi^2}{c^2 G_n(f) G_{np}(f)} + 20 \lg \left\{ Hf + \frac{cn}{2\xi [Re\sqrt{\dot{\epsilon}(f)}]^2} \right\} + 2\pi \cdot 8,68 \frac{n}{\xi} \cdot \frac{Im\sqrt{\dot{\epsilon}_m(f)}}{Re\sqrt{\dot{\epsilon}_m(f)}} - 20 \lg \left| \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_m(f)} - \sqrt{\dot{\epsilon}_{nc}(f)}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_m(f)} + \sqrt{\dot{\epsilon}_{nc}(f)}} \right| - 20 \lg \left| \frac{4\sqrt{\dot{\epsilon}_m(f)}}{[1 + \sqrt{\dot{\epsilon}_m(f)}]^2} \right| \quad (3)$$

Аналіз співвідношення (3) показує, що характер вимірювання  $\rho_n(f)$  значною мірою залежить від вибору  $H$  і від того, чи зберігаються спрямовані властивості антен під час зміни частоти ( $G_n(f) = \text{const}$  і  $G_{np}(f) = \text{const}$ ), чи незмінні геометричні розміри антен, які визначають сталість їхніх ефективних площ ( $A_n(f) \approx \text{const}$ ,  $A_{np}(f) \approx \text{const}$ ). Нагадаємо, що  $G_{n,np} = (4\pi/\lambda^2)A_{n,np}$ . Розрахунок потенціалу РЛ  $\rho_n(f)$  за формулою (3) доцільно здійснити для чотирьох модельних середовищ, що лежать на лінзі прісних вод, за фіксованих значень  $\xi$  і  $n$ . Коефіцієнт посилення антен і їхню ефективну площу вибрано для двох зазначених випадків такими, що дорівнюють  $G_n = G_{np} = 1$  і  $A_n = A_{np} = 1 \text{ м}^2$ . Як приклад на рисунку 11 подано результати розрахунку для модельного середовища 2 над шаром прісної води за  $\xi = 0,2$ ,  $n = 1$  і різних висот літального апарата  $H$ .

Для варіанта  $A_n = A_{np} = 1 \text{ м}^2$  (рисунк 11, а) за всіх  $H$  потрібний потенціал  $\rho_n(f)$  монотонно зменшується з частотою, що зумовлено зменшенням усіх доданків формули (3). Для варіанта  $G_n = G_{np} = 1$  (рисунк 11, б) за  $H = 0$  залежність  $\rho_n(f)$  такого самого характеру, як для  $A_n = A_{np} = 1 \text{ м}^2$ , а для  $H \neq 0$  за  $f = 3 \cdot 10^8$  Гц спостерігається мінімум потенціалу РЛ, що має місце для всіх значень  $n$ .

Це зумовлено тим, що другий доданок у формулі (3) збільшується, а наступні убивають зі зростанням  $f$ . Для модельного середовища 1 залежність аналогічна, а для модельних середовищ 3, 4 значення  $\Gamma$  і  $\epsilon'$  мало змінюються з частотою, тому  $\rho_n(f)$  зі зростанням частоти убиває за  $H \neq 0$  і практично не змінюється за  $H = 0$ .

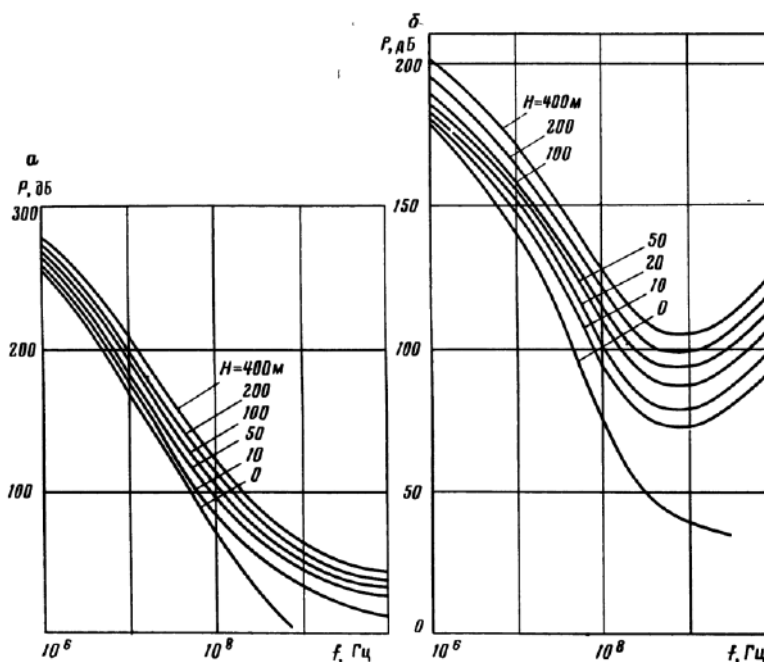


Рисунок 11 – Частотна залежність потенціалу РЛ:

а – за фіксованих розмірів антен; б – за фіксованої спрямованості антен

При  $f = \text{const}$  і зміні  $H$  від 10 до 400 м потенціал змінюється на 10–50 дБ. Зміна числа періодів в імпульсі  $n$  на один змінює потенціал приблизно на 150 дБ при  $f = 10^6$  Гц, на 100 дБ при  $f = 10^7$ , на 20 дБ при  $f = 10^9$  і на 10 дБ при  $f \approx 10^{10}$  Гц. Крім того, розрахунки показують, що за  $f < 10^8$  Гц криві  $\rho_n(f)$  практично не залежать від підшарового середовища, а за  $f = 10^9 \div 10^{10}$  Гц значення  $\rho(f)$  на 10–16 дБ вищі для випадку, коли підшарове середовище відповідає модельному середовищу 4, порівняно з прісною водою.

За допомогою формули (3) можна також побудувати криві  $h(f)$  за  $p = \text{const}$ . Для обмеження допустимої області зондування слід накласти на побудовані криві умову граничної роздільної здатності  $h = \frac{c}{2fRe\sqrt{\epsilon(f)}}$ , (при  $\xi = 1$ ,  $n = 1$ ).

## 2.4 Радіолокаційна апаратура для зондування з поверхні землі

Під час розв'язання завдань, пов'язаних із детальними дослідженнями обмежених і важкопрохідних районів, виникає необхідність застосування

радіолокаційної апаратури, призначеної для використання як із наземного транспорту, так і в ручному варіанті. В обох випадках приймальна й передавальна антени перебувають у безпосередній близькості від поверхні зондованого середовища, що суттєво впливає на їхні властивості. Характер зміни поля поблизу межі розділу залежить як від діелектричної проникності зондованого середовища, так і від висоти розташування антен. Наближення антен до поверхні зондованого середовища призводить до зменшення амплітуди поля у верхньому півпросторі за одночасного зростання її в зондованому середовищі. Унаслідок цього найдоцільнішим є розміщення антен безпосередньо на поверхні, що забезпечує зниження інтенсивності прямого сигналу та збільшення рівня підповерхневих відображень. Водночас таке розміщення антен пов'язане з необхідністю забезпечення високої механічної міцності під час їх транспортування в безпосередньому контакті із земною поверхнею.

Під час використання радіолокаційної апаратури в ручному варіанті особливого значення набувають її габарит і маса. Тому доцільне використання під час зондування магнітного запису сигналів із подальшим обробленням результатів зондування в стаціонарних умовах. Необхідне узгодження за смугою частот може бути забезпечене застосуванням стробоскопічного перетворення сигналів у приймальному тракті.

Зазначені особливості визначили напрямок розвитку експериментальної апаратури, яку ми використовували для проведення робіт із зондування різних середовищ із поверхні землі. На рисунку 12 наведено структурну схему базового макета.

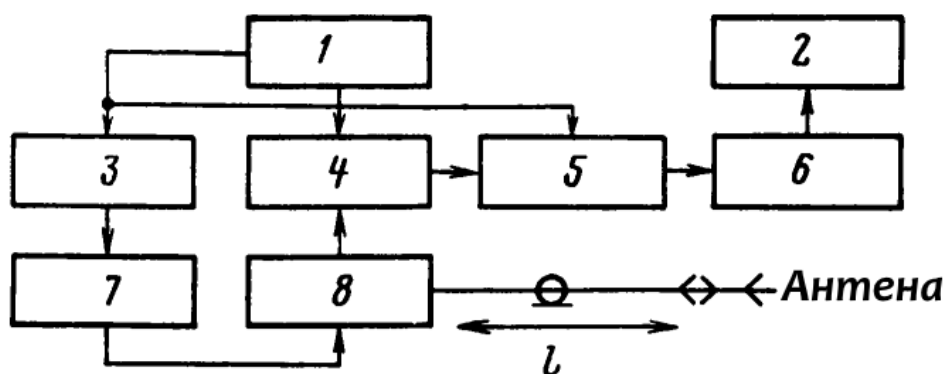


Рисунок 12 – Структурна схема радіолокатора для зондування з поверхні землі

Структурна схема включає синхронізатор 3, що забезпечує синхронний запуск усіх функціональних вузлів апаратури, генератор відеоімпульсів 7 для ударного збудження антени, антену з антенним перемикачем 8, генератор калібраційних імпульсів 1 для точного калібрування шкал індикаторного пристрою, стробоскопічний перетворювач 5, вхід якого за допомогою електронного комутатора 4 по черзі під'єднують до виходів антенного перемикача та генератора калібраційних імпульсів, індикаторний пристрій 6 з амплітудною та яскравістю відмітками та блок фотореєстрації 2.

Генератор відеоімпульсів, що запускається синхронізатором із частотою 30 КГц, виробляє імпульси тривалістю 7 нс амплітудою 360 В. Відеоімпульси через антенний перемикач збуджують широкосмугову приймально-передавальну приймально-передавальну антену із симетризувальним пристроєм, що є модифікацією біконічного вібратора. Приймальним пристроєм є стробоскопічний перетворювач із коефіцієнтом перетворення часового масштабу порядку  $10^4$ . За допомогою електронного комутатора забезпечується можливість почергового підключення до входу приймального пристрою відбитих сигналів і калібраційних імпульсів. Індикаторний пристрій містить індикатори з лінійною розгорткою, що мають амплітудну (типу А) і яскравісну позначки. Спеціальний блок фотореєстрації дає змогу здійснити безперервну реєстрацію сигналів індикатора

з яскравостною позначкою на фотоплівку з метою отримання радіолокаційного профілю середовища по трасі зондування ( $Z$ -індикація).

Антенна з'єднувалася з антенним перемикачем за допомогою коаксіального кабелю, довжину якого  $l$  було обрано так, щоб до приходу першого відбитого від антени сигналу (на який накладається також сигнал, відбитий від поверхні середовища, що зондується) встигало відбутися відновлення приймального пристрою після перевантаження, викликаного збуджувальним імпульсом. Форма зондувального сигналу може бути охарактеризована осцилограмою (рисунок 13), отриманою на індикаторі типу А цієї установки під час використання для випромінювання і приймання двох роздільних антен, рознесених на відстань близько 15 м.

Надалі макет радіолокатора було вдосконалено з метою розділення процесів зондування і подання інформації.

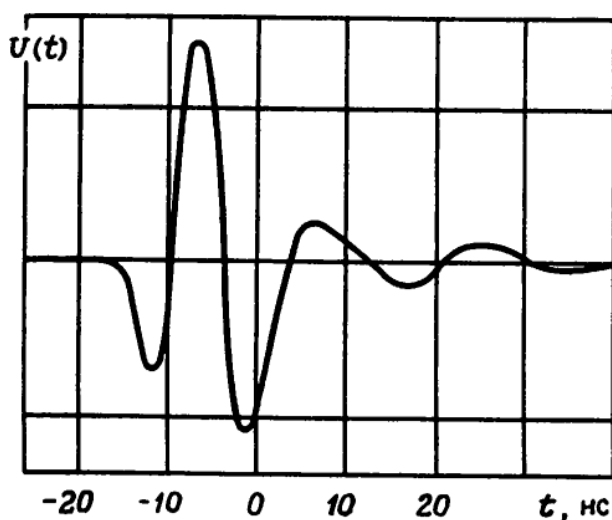


Рисунок 13 – Осцилограма зондованого сигналу

Під час зондування на трасі розвідки сигнали з виходу стробоскопічного перетворювача записували на магнітну стрічку касетного магнітофона, а потім у стаціонарних умовах відтворювали й подавали на  $Z$ -індикації у вигляді профілю підповерхневої структури середовища по трасі зондування. Введення магнітної реєстрації сигналів значно підвищило мобільність установки, а також дало

можливість зберігання інформації з метою її подальшого опрацювання як на аналогових пристроях, так і на цифрових.

Удосконалення макета наземної радіолокаційної апаратури велося в напрямку скорочення маси й енергоспоживання з метою підвищення глибинності зондування середовищ. Було розроблено і виготовлено макет радіолокатора, до складу якого входить приймально-індикаторний блок масою близько 3 кг і портативний касетний магнітофон, а передавач масою близько 0,2 кг розміщується на передавальній антені. Формування зондувальних сигналів у цьому варіанті здійснювалося шляхом попереднього заряду ємності антени довгим імпульсом синхронізатора і подальшого її розряду через швидкодіючий розрядник, як такий використовували напівпровідниковий діод з S-подібною вольтамперною характеристикою.

Приймальний тракт містив окрему приймальну антену, ідентичну передавальній, ширококутовий підсилювач із тимчасовим автоматичним регулюванням посилення (ТАРП) і стробоскопічний перетворювач тимчасового масштабу. Наявність ТАРП забезпечувала стиснення динамічного діапазону вхідних сигналів до рівня, необхідного для нормальної роботи стробоскопічного перетворювача і реєструвальних пристроїв. Ступінь стиснення динамічного діапазону могла оперативнo змінюватися, що забезпечувало можливість вибору оптимального рівня відбитих сигналів під час їхнього спостереження на екрані контрольного осцилографічного індикатора, виконаного на економічній електронно-променевої трубці 11ЛОЗВ. Живлення апаратури здійснювалося від бортмережі автомобіля (всюдихода) або від автономного малогабаритного акумулятора. Споживаний струм по ланцюгу (напруга 12 В) становив 1,5 А.



### **3 ОСОБЛИВОСТІ ПОГЛИНАННЯ РАДІОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ РІЗНИМИ ТИПАМИ ПОВЕРХОНЬ**

#### **3.1 Радіолокаційні профілі зондованих середовищ**

##### **3.1.1 Способи отримання радіолокаційних профілів**

Радіолокаційним профілем називатимемо залежність часу запізнювання відбитих сигналів  $t_3(l)$ , де  $l = Wt$  – шлях, пройдений носієм, що рухається зі швидкістю  $W$  над поверхнею зондованого середовища, за час  $t$ .

В основу вимірювача в РВ покладено формування сигналу биття, який отримують на виході змішувача приймача, на входи якого подають прийнятий антеною і посилений у приймачі сигнал, відбитий від земної поверхні, та ослаблений до необхідного рівня випромінюваний сигнал. Середня частота сигналу биття незалежно від закону частотної модуляції випромінюваного сигналу прямо пропорційна висоті польоту. Коефіцієнт пропорційності – постійна, яка залежить від швидкості зміни частоти випромінюваного сигналу.

Для вимірювання висоти в РВ може здійснюватися оцінка середньої частоти сигналу биття. Ця оцінка може бути реалізована різними способами. У найпростіших РВ відбувається простий підрахунок числа перетинів сигналом биття нульового рівня [13, 14, 15] за період модуляції. У досконаліших приладах така оцінка виконується методами спектрального аналізу. Так само існують РВ слідкувального типу, в яких вимірювання висоти реалізується шляхом зміни періоду частотної модуляції або девіації частоти випромінюваного сигналу. Ці зміни здійснюють таким чином, щоб частота сигналу биття залишалася приблизно постійною [13, 14, 16, 17]. Сталість частоти сигналу биття підтримується спеціальним контуром автоматичного стеження, керуючий сигнал на виході якого пропорційний вимірюваній висоті.

Використання аналого-цифрового перетворення (АЦП). У цьому випадку нас цікавить лише різниця частот. Ми можемо виокремити різницю і усунути суму, застосувавши фільтр низьких частот, який пропускає лише низькі частоти. Ця операція змішування і фільтрації зазвичай виконується апаратним забезпеченням, тому в багатьох випадках вам не доведеться турбуватися про цю операцію.

Отримавши сигнал, який містить різницю частот між переданим і прийнятим сигналами, ви можете використати швидке перетворення Фур'є (ШПФ) для визначення цих частот. Для визначення частот, а згодом і діапазонів, буде достатньо розташування піків на амплітуді ШПФ. На рисунку 14 наведено графіки амплітуд для одного і трьох цілей. Вихід ШПФ є комплексним, що означає, що кожна точка на виході має амплітуду і фазу.

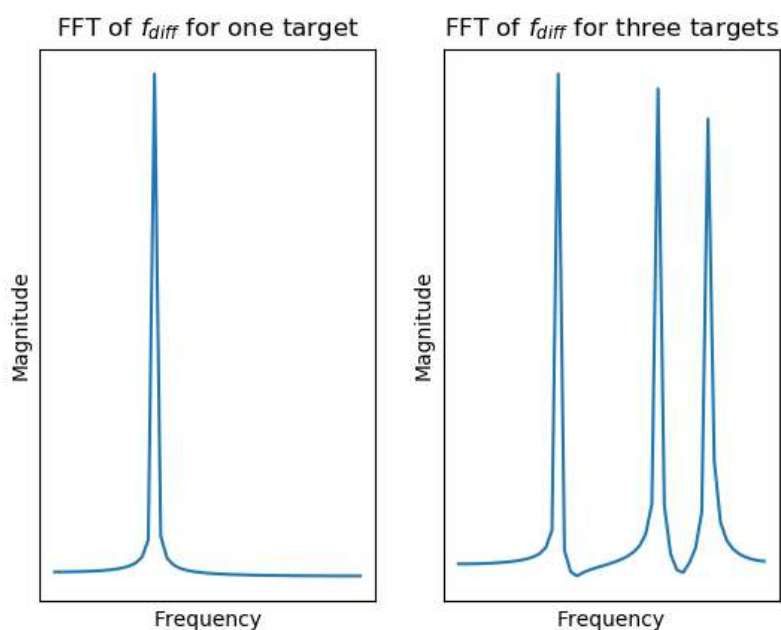


Рисунок 14 – Графіки амплітуд за ШПФ

РВБД має забезпечувати обробку в усьому діапазоні випромінюваних частот. У такому разі в прийнятому сигналі очікуються частоти до 250 МГц. Це посилює вимоги до ширини смуги пропускання подальшого підсилувача і до частоти дискретизації аналого-цифрового перетворювача. Таким чином, плата

обробки сигналів для РВБД виявляється значно дорожчою, ніж для простого радіолокатора безперервного випромінювання.

#### Аналого-інформаційний перетворювач

У статті представлено результати виявлення цілей, отримані шляхом застосування компресійного зондування до наземної частотно-модульованої РЛС безперервної дії Х-діапазону для розріджених сцен (тобто, з обмеженою кількістю цілей). [18] Замість класичної дискретизації і частотного аналізу, сигнал, що містить частоти биття, обробляється за допомогою аналого-цифрового перетворювача на основі випадкової демодуляції. Цей тип обробки дозволяє отримати частоту дискретизації, нижчу за межу Найквіста.

Штучний інтелект. Нещодавно були запропоновані підходи глибокого навчання для обробки даних РВБД, які перевершують традиційні методи виявлення на картах дальності-доплера або дальності-азимута. Однак ці методи мають свою ціну; для кожної нової задачі архітектура глибокої нейронної мережі має бути навчена на вхідних даних високої розмірності, що дає навантаження як на пропускну здатність даних, так і на бюджет обробки. Були досліджені методи неконтрольованого навчання, які генерують низьковимірні представлення з радіолокаційних даних РВБД, і оцінюють, до якої міри ці представлення можуть бути повторно використані для багатьох наступних задач. З цією метою було представлено новий набір необроблених АЦП даних радіовисотоміра, записаних з радара, встановленого на платформі безпілота, що літає в приміщенні, разом з наземними цілями виявлення. Було показано, що на реальних радіолокаційних даних, що, використовуючи наші вивчені уявлення, ми досягаємо відповідної продуктивності традиційним методам обробки радіолокаційних даних і що нашу модель можна навчати на різних вхідних даних, таких як наприклад, необроблених даних АЦП лише двох послідовно переданих ЛЧМ сигналів [19].

### 3.1.2 Радіолокаційний профіль підповерхневої точкової цілі

Розглянемо радіолокаційне підповерхнєве зондування одиничної точкової цілі, що перебуває на глибині  $h$  відносно поверхні зондованого середовища, яке характеризується відносною комплексною діелектричною проникністю  $\varepsilon = \varepsilon'(1 - j \cdot tg\delta)$ . Припустимо, що поверхня середовища збігається з площиною  $хоу$  (рисунок 15), ціль знаходиться в точці  $D(x_0, y_0, -h)$ , а зондування проводять із борту літального апарата, який рухається на висоті  $H$  із постійною швидкістю  $W$  у напрямку координатної осі  $ох$ .

Тоді для будь-якого довільно взятого значення шляху  $l = Wt$ , пройденого літальним апаратом, сигнали, що приймаються, відповідатимуть відбиттю від поверхні зондованого середовища і від підповерхневої цілі. У наближенні геометричної оптики для сигналів, відбитих від поверхні, час запізнювання  $t_3 = 2H/c$  буде постійним уздовж усієї траси зондування, тоді як характер зміни часу запізнювання сигналів, відбитих від цілі  $t_3 = 2D(\Theta)/c$ , визначатиметься оптичною довжиною променя спрямованої діаграми, що дорівнює

$$D(\Theta) = \frac{H}{\cos \Theta_1} + \frac{h \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon}}{\cos \Theta_{2 \text{ іст}}}, \quad (4)$$

і який залежить від кутів падіння  $\Theta_1$  і заломлення  $\Theta_{2 \text{ іст}}$  хвилі для конкретного значення  $l$ . Зв'язок між  $\Theta_1$ ,  $\Theta_{2 \text{ іст}}$  і  $l$  визначається співвідношенням

$$(Htg\Theta_1 + htg\Theta_{2 \text{ іст}})^2 = (x_0 - l)^2 + y_0^2, \quad (5)$$

сенс якого очевидний із геометричних побудов, наведених на рисунку 15.

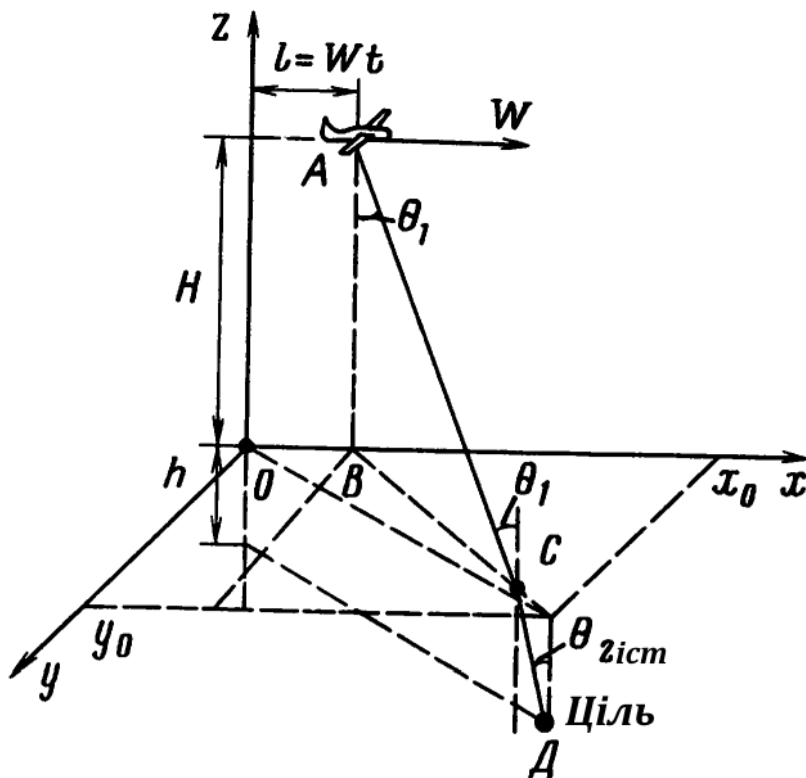


Рисунок 15 – Визначення радіолокаційного профілю під поверхневої точкової цілі

З урахуванням того, що

$$\operatorname{tg} \theta_{2 \text{ іст}} = \frac{\sin \theta_1}{\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_1}}, \quad (6)$$

маємо

$$\cos \theta_{2 \text{ іст}} = \frac{\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_1}}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 + \left( \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_1} \right)^2}} \quad (7)$$

Підставляючи формулу (7) у (4), а (6) у (5) та виражаючи  $t_3$  і  $l$  за допомогою наведених вище залежностей, отримуємо рівняння радіолокаційного профілю під поверхневої точкової цілі в параметричній формі:

$$t_3(\Theta_1) = \frac{2H}{C} \left[ \frac{1}{\cos \Theta_1} + \frac{h}{H} \cdot \frac{Re \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\sin^2 \Theta_1 + (Re \sqrt{\varepsilon} - \sin^2 \Theta_1)^2}}{Re \sqrt{\varepsilon} - \sin^2 \Theta_1} \right]; \quad (8)$$

$$l(\Theta_1) = x_0 - H \operatorname{tg} \Theta_1 \sqrt{\left(1 + \frac{h}{H} \cdot \frac{\cos \Theta_1}{Re \sqrt{\varepsilon} - \sin^2 \Theta_1}\right)^2 - \left(\frac{y_0}{H} \operatorname{ctg} \Theta_1\right)^2}.$$

У разі невеликих втрат у середовищі ( $\operatorname{tg} \delta \ll 1$ )  $Re \sqrt{\varepsilon} \approx \sqrt{\varepsilon'}$ , а  $Re \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Theta_1} \approx Re \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \Theta_1}$ . При цьому рівняння (8) спрощується:

$$t_3(\Theta_1) = \frac{2H}{C} \left[ \frac{1}{\cos \Theta_1} + \frac{h}{H} \cdot \frac{\varepsilon'}{Re \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \Theta_1}} \right];$$

$$l(\Theta_1) = x_0 - \sqrt{\left(H \operatorname{tg} \Theta_1 + h \cdot \frac{\sin \Theta_1}{\sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \Theta_1}}\right)^2}.$$

Екстремум цієї залежності, що визначає положення вершини радіолокаційного профілю, відповідає  $l = x_0$ , або часу запізнювання

$$t_{30} = \frac{2H}{C} \left[ \frac{y_0}{H} \operatorname{ctg} \Theta_1 + \frac{(\varepsilon' - 1)h}{Re \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \Theta_1}} \right];$$

де кут падіння  $\Theta_1$  визначається з умови

$$y_0 = H \operatorname{tg} \Theta_1 + \frac{h \sin \Theta_1}{\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Theta_1}}. \quad (9)$$

Вигляд радіолокаційних профілів для підповерхневих цілей залежить як від величини відносної комплексної діелектричної проникності  $\varepsilon$  середовища,

так і від глибини розташування цілі  $h$ . Припускаючи  $h \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} = \operatorname{const}$  і розглядаючи крайні значення можливих змін  $\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon}$  в діапазоні  $1 \leq \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} < \infty$ , отримаємо рівняння радіолокаційних профілів, які обмежують область їхнього можливого розташування за довільних значень  $\varepsilon$  та  $h$ .

Для  $\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} \approx \sqrt{\varepsilon'} = 1$  з формули (9) одержуємо

$$\sin \theta_1 = \frac{y_0}{\sqrt{(H+h)^2 + y_0^2}}$$

при цьому рівняння (8) перетворюється на вигляд

$$\frac{c^2 t_3^2}{(H+h)^2 + y_0^2} - \frac{(l-x_0)^2}{(H+h)^2 + y_0^2} = 1,$$

що відповідає рівнянню гіперболи з координатами вершини  $l = x_0$  і

$$t_{30} = \frac{2}{c} \sqrt{(H+h) + y_0^2}. \quad (10)$$

У разі  $\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} \rightarrow \infty$  рівняння (8) після граничного переходу і перетворень також набуває вигляду рівняння гіперболи

$$\frac{c^2 \left( t_3 - 2h \operatorname{Re} \frac{\sqrt{\varepsilon}}{c} \right)^2}{H^2 + y_0^2} - \frac{(l-x_0)^2}{H^2 + y_0^2} = 1$$

координати вершини якої  $l = x_0$  і

$$t_{30} = \frac{2}{c} \left( \sqrt{H^2 + y_0^2} + h \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} \right). \quad (11)$$

Для  $y_0 = 0$  співвідношення (10) і (11) дають однаковий результат

$$t_{30} = \frac{2}{c}(H + h \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon}), \quad (12)$$

що свідчить про те, що незалежно від величини відносної комплексної діелектричної проникності середовища вершини радіолокаційних профілів підповерхневих цілей, що перебувають у площині зондування, будуть завжди збігатися (за умови  $h \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} = \text{const}$ ). Для цілей, розташованих на поверхні середовища ( $h = 0$ ), рівняння радіолокаційного профілю має вигляд

$$\frac{\frac{c^2 t_3^2}{4}}{H^2 + y_0^2} - \frac{(l - x_0)^2}{H^2 + y_0^2} = 1, \quad (13)$$

що відповідає рівнянню гіперболи з координатами вершини  $l = x_0$  і

$$t_{30} = \left(\frac{2}{c}\right) \sqrt{H^2 + y_0^2}.$$

Із зіставлення цієї формули з (12) видно, що одне й те саме значення  $t_{30}$  може бути як у разі розташування цілі на поверхні зондованого середовища, так і в разі її розміщення на глибині  $h$ . Радіолокаційні профілі, відповідні підповерхневій меті (13) і меті, яка розміщена на поверхні (12), різняться лише крутизною своїх гілок, що ілюструється рисунком 16.



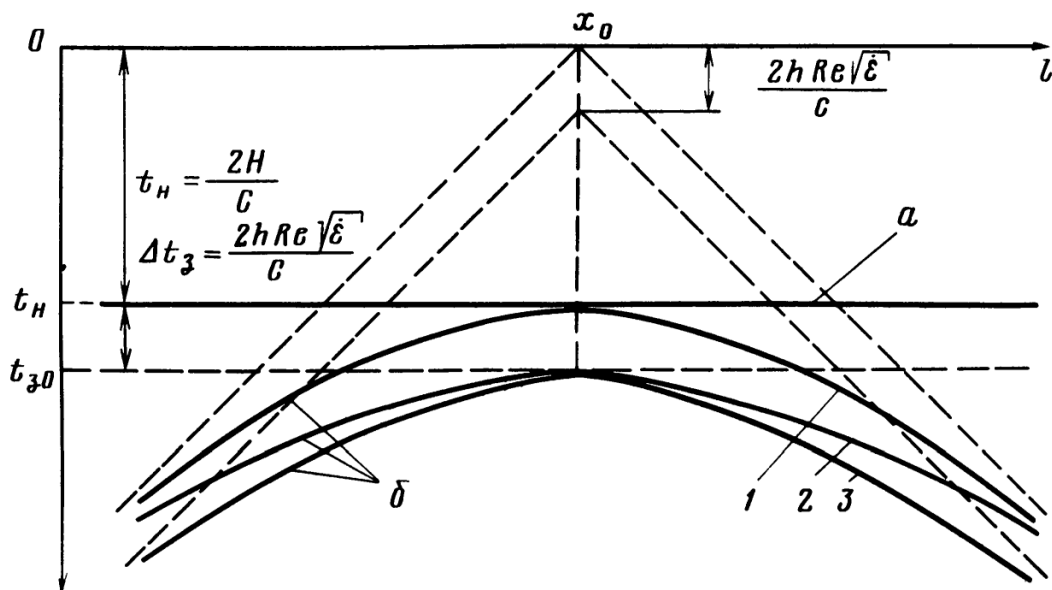


Рисунок 16 – Радіолокаційні профілі межі повітря – середовище (а) і точкового відбивача (б) за різних значень  $h$ ,  $y_0$  і  $Re \sqrt{\epsilon}$ :

$$1 - h = 0, y_0 = 0; \quad 2 - h = 0, y_0 \neq 0; \quad 3 - h Re \frac{\sqrt{\epsilon}}{H} = 0,25, y_0 = 0$$

Тому під час інтерпретації результатів зондування виникає необхідність виявлення відповідності приналежності зареєстрованих сигналів поверхневим або підповерхневим відбиттям. Така відповідність може бути встановлена за результатами зондування з різних висот шляхом зіставлення характеру зміни часового інтервалу  $\Delta t_3 = t_{30} - 2H/c$  між вершиною радіолокаційного профілю цілі та радіолокаційним профілем поверхні зондованого середовища. Для підповерхневих цілей, що перебувають у площині зондування, при зміні висоти польоту  $\Delta t_3 = 2h Re \frac{\sqrt{\epsilon}}{c} = const$ , тоді як для цілей, що перебувають на поверхні середовища

$$\Delta t_3 = \frac{2}{c} l \sqrt{H^2 + y^2} - H \approx \frac{2}{c} \left[ \left( H + \frac{y^2}{2H} \right) - H \right] = \frac{y^2}{2H},$$

тобто зміна різниці ординат відповідних радіолокаційних профілів обернено пропорційна висоті польоту літального апарата  $H$ .

### 3.1.3 Вплив великомасштабних неоднорідностей рельєфу поверхні на результати радіолокаційного підповерхневого зондування

Наявність великомасштабних неоднорідностей рельєфу поверхні зондованих середовищ призводить до появи додаткових сигналів, що відповідають відбиттю від елементів рельєфу. Для ілюстрації характеру зміни радіолокаційного профілю розглянемо зондування шару товщиною  $h$  з нерівною, але в середньому плоскою верхньою межею (рисунок 17).

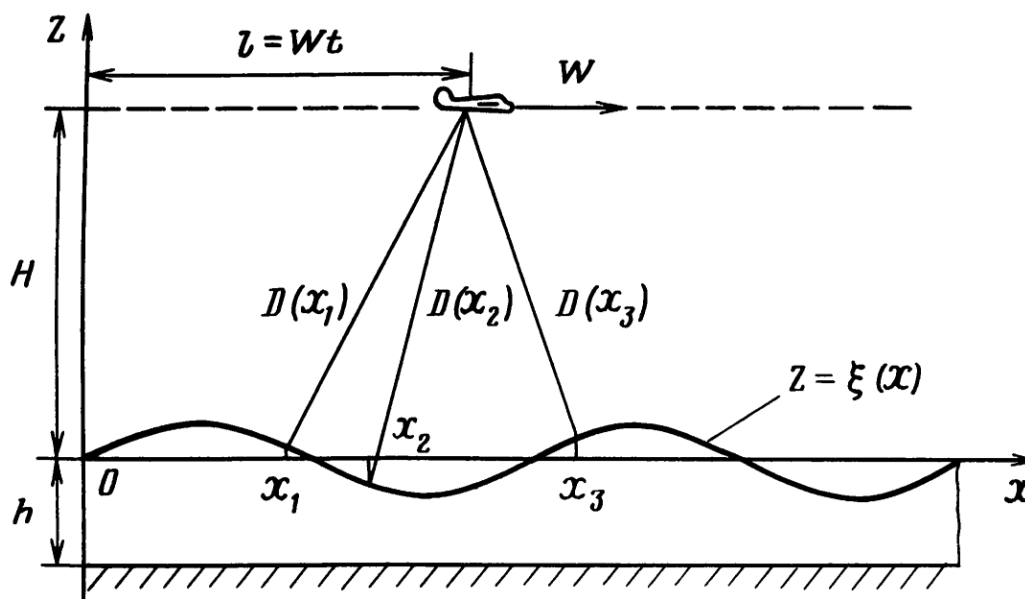


Рисунок 17 – Оцінка впливу великомасштабних неоднорідностей рельєфу поверхні на результати зондування

Рельєф поверхні будемо описувати одновимірною функцією  $z = \xi(x)$ , вважаючи, що  $|d\xi/dx| \leq 1$ . Під час зондування такого середовища з борту літака поряд із сигналами, відбитими від нижньої межі шару, прийматимуться сигнали, відповідні відбиттю від ділянок поверхні, орієнтованих перпендикулярно до

напрямку опромінення. Час запізнювання цих сигналів  $t_3 = 2D(l)/c$  визначається похилою дальністю

$$D(l) = \sqrt{[H - \xi(x)]^2 + (l - x)^2} \quad (14)$$

до відповідних елементів поверхні. З урахуванням формули (14) маємо

$$t_3(l) = \frac{2}{c} \sqrt{[H - \xi(x)]^2 + (l - x)^2}. \quad (15)$$

При цьому координата  $x$  точки віддзеркалення повинна задовольняти рівнянню нормалі до поверхні

$$z - \xi(x) = -\frac{l - x}{\frac{d\xi}{dx}}. \quad (16)$$

Оскільки для траєкторії руху літального апарата  $z = H$ , то з формул (15) і (16) можна одержати рівняння радіолокаційного профілю поверхні середовища, що зондується, у параметричній формі

$$l(x) = x - \frac{d\xi}{dx} [H - \xi(x)];$$

$$t_3(x) = \frac{2[H - \xi(x)]}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{d\xi}{dx}\right)^2}. \quad (17)$$

Що стосується радіолокаційного профілю нижньої межі, то він може бути отриманий з урахуванням того, що сигнали, відбиті від неї, прийматимуться тільки під час польоту над ділянками поверхні, де  $d\xi/dx = 0$ . При цьому, як випливає з формули (17),  $l(x) = x$ , а  $t_3 = 2(H + \xi)/c$ .

На рисунку 18 показано радіолокаційні профілі зондованого середовища, верхня межа якого описується функцією  $\xi(x) = a \sin x$  для випадків  $a/H = 0$  (рисунок 18, а) і  $a/H = 0,2$  (рисунок 18, б).

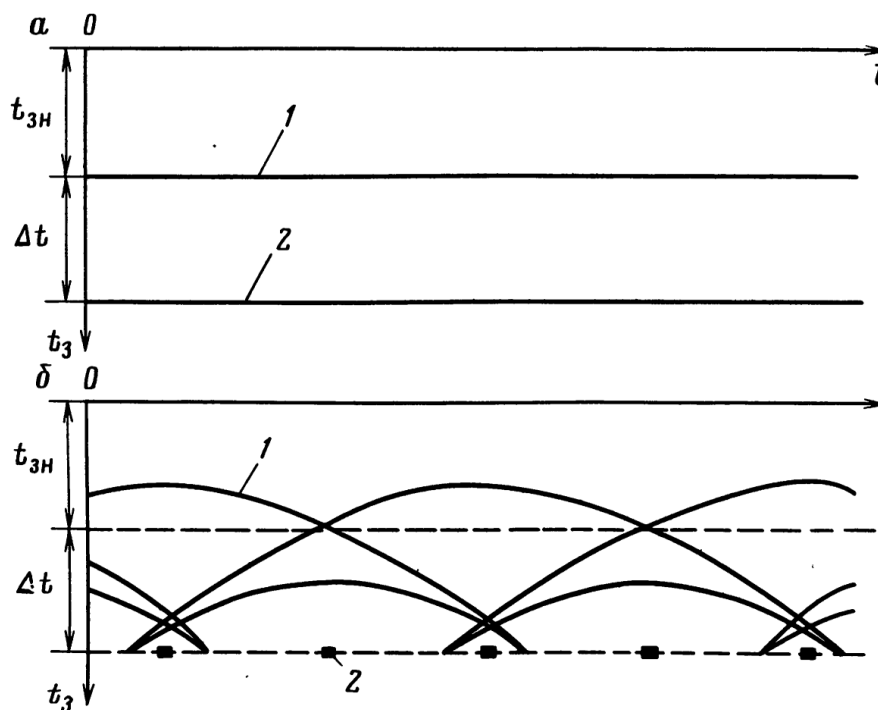


Рисунок 18 – Радіолокаційні профілі верхньої (1) і нижньої (2) меж шару

Як видно з представлених даних, якщо поверхня зондованого середовища абсолютно гладка ( $a = 0$ ), радіолокаційний профіль однозначно відображає товщину шару  $h$  і не залежить від висоти зондування  $H$ . У разі наявності неоднорідностей рельєфу поверхні ( $a \neq 0$ ) радіолокаційний профіль верхньої межі має складну залежність від висоти зондування  $H$ , а радіолокаційний профіль нижньої межі вироджується у послідовність дискретних відміток, що відповідають прольоту носієм ділянок екстремальних значень функції  $\xi(x)$ .

У реальних умовах радіолокаційні профілі, що відповідають відбиттю сигналів від елементів поверхні, можуть накладатися на відбиття від підповерхневих цілей, маскуючи останні. При цьому можливі випадки, коли положення і форма радіолокаційних профілів, що відповідають поверхневим і підповерхневим відбивачам, практично повністю збігаються, що істотно ускладнює

інтерпретацію результатів зондування. Кардинальним шляхом зменшення впливу на результати зондування відбиттів від елементів рельєфу поверхні є підвищення спрямованих властивостей використовуваних антен.

## **3.2 Радиолокаційне зондування піску, вапнякових порід і мерзлого ґрунту**

### **3.2.1 Радиолокаційне зондування ґрунтових вод під шаром піску**

Можливість практичної реалізації радіотехнічних методів у гідрологічних дослідженнях експериментально підтверджено в 1956 р. Ель-Саїдом, який застосував для визначення рівня залягання ґрунтових вод у пустелі під шаром піску завтовшки 660 м інтерференційний метод (використовувалися сигнали місцевих ширококомовних станцій) [20]. У 1972 р. група співробітників Арктичного й Антарктичного НДІ здійснила спробу наземного радіолокаційного зондування піщаного ґрунту у двох пунктах Валдайської бази з глибинами залягання ґрунтових вод близько 7 і 13 м [21]. Застосовували імпульсний радіолокатор із несучою частотою 60 МГц і потенціалом 150 дБ. Зазначимо, що використовувана тривалість зондувальних імпульсів  $\tau_{0,5} = 0,1$  мкс і відсутність розв'язки антен не забезпечували достатньої роздільної здатності для зазначених глибин.

У 1973 р. було проведено експерименти з борту літака [24] для визначення можливості радіолокаційного виявлення і вимірювання глибини залягання водонесних горизонтів у пустельних районах Середньої Азії. Як експериментальну базу використовували Ясханську лінзу прісних вод, розташовану в північно-східній частині Туркменії. У геологічному відношенні район являв собою піщану пустелю з інтенсивно розвиненим рельєфом у формі закріплених рослинністю гряд, бугрів і перевірених барханів висотою від 6 до 15 м. Мінералогічний склад зондованого середовища представлений в основному пісками дрібнозернистої фракції з переважанням кварцу і польового шпату. Окремі прошарки щільних глин і суглинків включали, як правило, гідрослюди.

На ділянці закріплених пісків можна виокремити три зони вологості [22]: верхня зона (потужністю близько 5 м) з вологістю менш як 1–3%; середня зона (потужністю до 10 м) з вологістю 0,4–1,5%; нижня зона (зона капілярної облямівки) характеризується повним вологонасиченням.

Польоти проводилися із середньою швидкістю 160 км/год на висотах 200–400 м. Для формування зондувальних імпульсів тривалістю 40–60 нс із частотою заповнення 60–70 МГц застосовували метод ударного збудження антен поодинокими відеоімпульсами тривалістю близько 6–7 нс. Антени мали смугу пропускання близько 25–30 МГц. Осцилограму зондувального радіоімпульсу подано на рисунку 19. Потенціал радіолокатора 120 дБ.

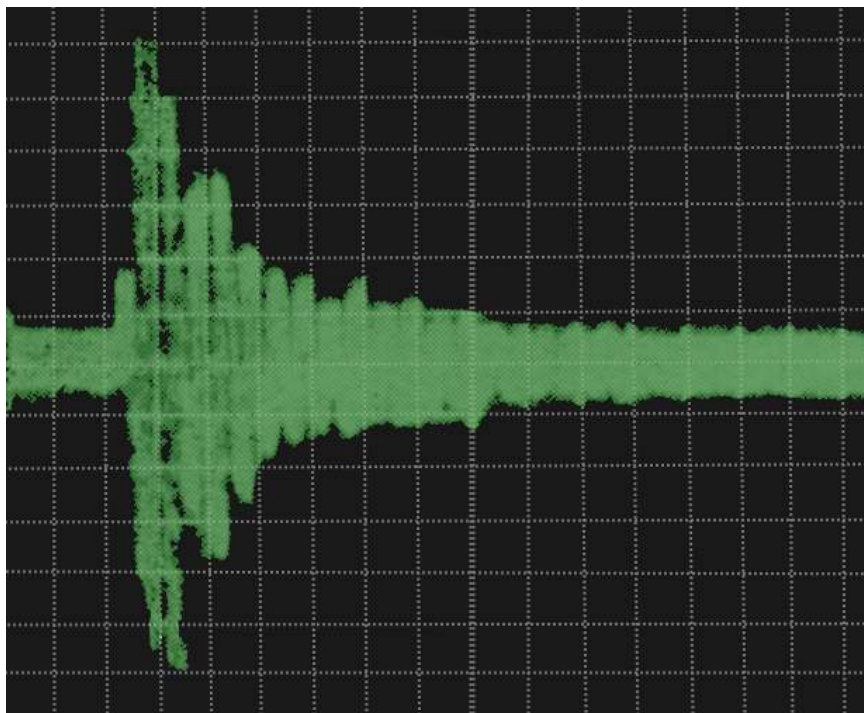
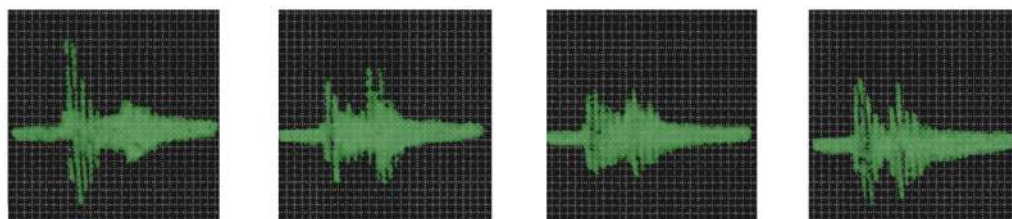


Рисунок 19 – Осцилограма зондувального сигналу, що використовувався під час зондування піщаних ґрунтів. Масштаб 30 нс/діл.

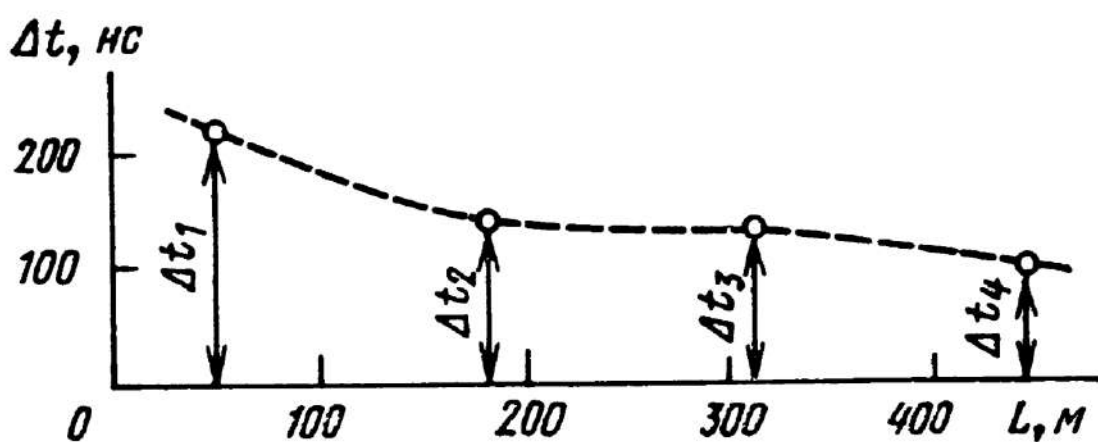
На рисунку 20, а представлено фрагмент результатів зондування, характерних для польотів над порівняно рівною однорідною поверхнею.

На наведених осцилограмах чітко видно два сигнали, що відповідають відбиттю від границь повітря – пісок і пісок – ґрунтові води. Значення часового

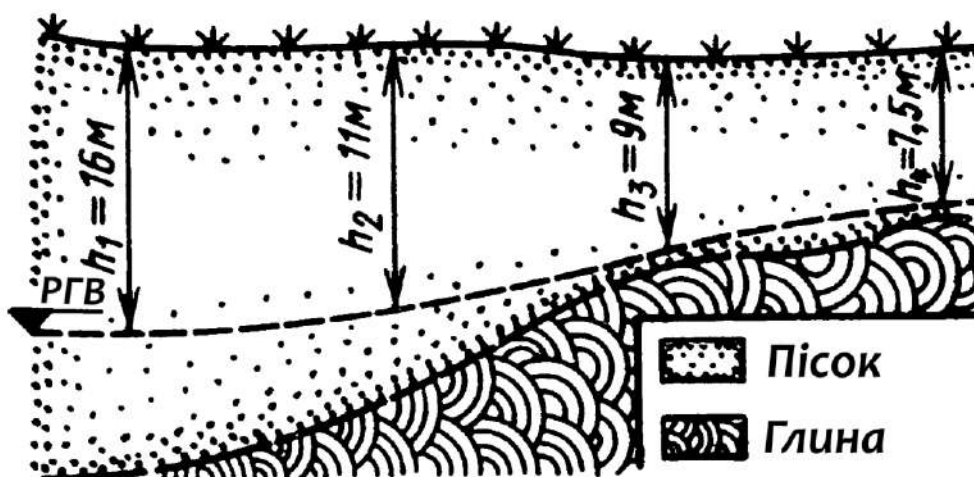
інтервалу  $\Delta t$  між максимумами відбитих сигналів (рисунок 20, б) дають змогу зробити оцінку глибини залягання рівня ґрунтових вод.



а)



б)



в)

Рисунок 20 – Приклад геологічної інтерпретації результатів радіолокаційного зондування ґрунтових вод під шаром піску:

а – осцилограми відбитих сигналів; б – значення часового інтервалу  $\Delta t$ ; в – геологічний розріз профілю, що зондується; РГВ – рівень ґрунтових вод

Якщо прийняти, що швидкість поширення радіохвиль на частоті зондувального сигналу має порядок 150 м/мкс [23], то представлені на рисунку 20,б значення  $\Delta t$  відповідають зміні рівня залягання ґрунтових вод від 16 до 7,5 м, що добре узгоджується з геологічними даними. Геологічний розріз, побудований за результатами зондування, показано на рисунку 20, в [24].

Під час польотів над нерівною поверхнею відбиті сигнали помітно флюктуують, а на окремих ділянках відзначають наявність перешкод у вигляді відбитків від нерівностей рельєфу. Для виявлення таких сигналів польоти над досліджуваними трасами виконували, як правило, на кількох висотах, а під час інтерпретації результатів зондування враховували тільки ті сигнали, часовий інтервал між якими залишався незмінним.

Неоднорідність структури зондованого середовища за глибиною призводить до появи додаткових сигналів, що відповідають локальним включенням глинистих прошарків. Збільшення потужності цих включень може призводити до помітного ослаблення і навіть повного зникнення сигналів, що відповідають відбиттю від водоносного горизонту. Сказане ілюструється рисунком 21, на якому показано геологічний розріз однієї з трас, що досліджувалися, за даними буріння та позначено рівні відбиття, отримані шляхом перерахунку часового інтервалу  $\Delta t$  у товщину шару для  $\sqrt{\epsilon_c} = 2$  [23]. Інтерпретація отриманих даних [24] дає змогу зробити висновок про те, що першим горизонтом, що добре відбиває, є прошарки глини, які залягають у дуже дрібнозернистих пісках. Так, результати зондування між свердловинами 22-р і 23-р досить добре корелюються з лініями глини, що залягають на глибині 15–20 м. У районі свердловини К-3 сигнали від верхнього відбивального горизонту збігаються із глинистою лінзою, розташованою на глибині 10–12 м. Сигнали з глибиною 10–15 м між свердловинами К-2 і К-13 виражені недостатньо чітко. Це пов'язано, мабуть, із відсутністю явно вираженої межі між дрібнозернистими і тонкозернистими пісками.



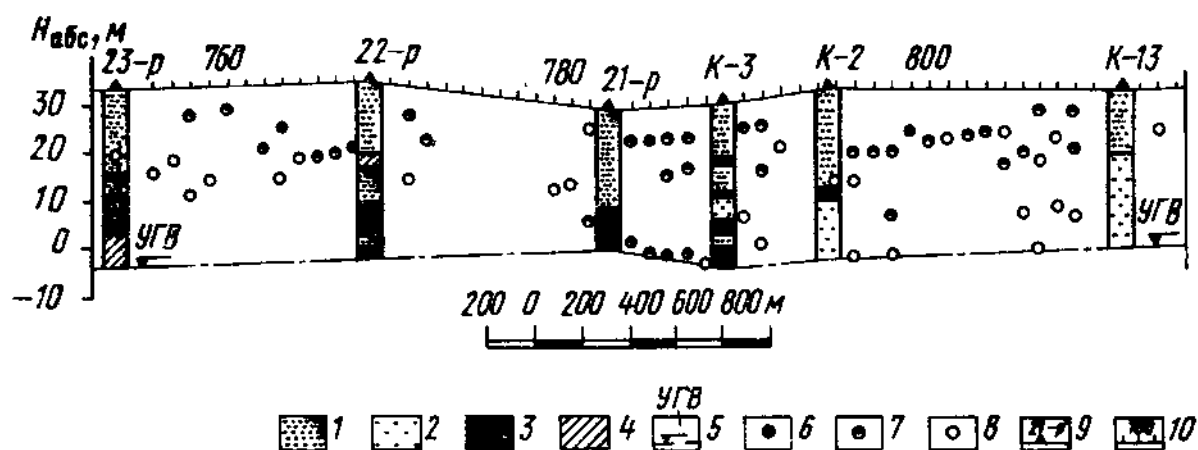


Рисунок 21 – Геологічний розріз за даними буріння з результатами інтерпретації:

1 – дуже дрібнозерністі піски; 2 – тонкозерністі піски; 3 – глина; 4 – суглинки; 5 – рівень ґрунтових вод; 6 – чітко виражені відбиті сигнали; 7 – недостатньо чітко виражені відбиті сигнали; 8 – слабкі відбиті сигнали; 9 – номери свердловин; 10 – номери кадрів фотозапису, висота  $H$  відлічується від рівня моря

Отримані експериментальні результати дають змогу зробити орієнтовну оцінку питомого загасання радіохвиль  $\Gamma$  у піщаному ґрунті за відомими товщиною шару, що зондується, та відношенням амплітуд відбитих сигналів  $r$ . За умови використання найпростішої електродинамічної моделі у вигляді однорідного плоского шару, який має  $\text{Re} \sqrt{\varepsilon_c} = 2$ , і статистичного усереднення інтервалів  $\Delta t$  для отриманих осцилограм було знайдено значення  $\Gamma = 0,57$  дБ/м. Це свідчить про те, що під час використання цього радіолокатора можливе, в принципі, зондування сухого піщаного ґрунту на глибину до 50–100 м.

### 3.2.2 Радіолокаційне зондування вапняків

У вересні 1974 р. у північному Прибалхашші було проводилися Експерименти з радіолокаційного зондування вапнякових порід у з борту гелікоптера за допомогою апаратури, що використовувалася раніше в експериментах із зондування піщаного ґрунту. Як об'єкти дослідження було обрано два типи поверхонь,

що відрізняються структурою меж розділу. Основні роботи проводили над родовищем поліметалевих руд, локалізованих у сірому щільному вапняку у вигляді окремих включень потужністю близько 0,5 м за протяжності, яка не перевищує кілька десятків метрів. Глибина залягання родовища руд, вкраплених у вміщувальну породу, змінювалася від 0 до 40 м, причому окремі включення розподілялися на досліджуваній ділянці плямами, що збігаються, як правило, з дрібними зниженнями рельєфу.

Для зіставлення та інтерпретації відбитих сигналів проводили зондування вапнякової товщі в районі водосховища, де розлив води навколо свердловини, що виливається, зумовлює дренаж мінералізованих вод водосховища у вапняк, а також на окремих ділянках на глибині 5–7 м є добре виражена межа розділу вапняк-вода. Для виключення "хибних" відбитих сигналів, пов'язаних із нерівністю рельєфу, польоти виконувалися на висотах 200–500 м.

На рисунку 22 подано осцилограми відбитих сигналів.

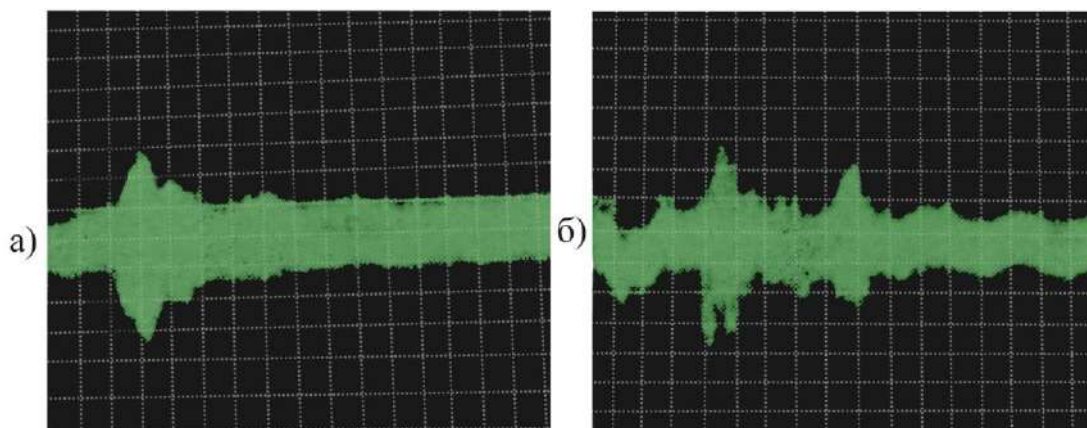


Рисунок 22 – Осцилограми відбитих сигналів, отриманих під час зондування рудного тіла (а) і води під шаром вапняку (б). Масштаб 40 нс/діл

Під час прольотів над рудними тілами (рисунок 22, а) амплітуда сигналів різко зменшується, а їхня форма зазвичай не дає змоги виокремити явно виражені межі розділу руда – вміщувальна порода. Проте аналіз отриманих результатів показує, що для більшості прольотів над рудними тілами є явний зв'язок між

величиною розширення відбитого сигналу і потужністю зондованого рудного тіла. Наявність явно вираженої межі вапняк – вода призводить до появи чітких відбитих сигналів (рисунок 22, б). Під час експериментів було зафіксовано глибини знаходження відбивального горизонту від 2,7 до 11,2 м (під час розрахунків величину діелектричної проникності еквівалентного однорідного шару вапняку брали такою ж, що дорівнює  $\epsilon_c = 8$ ). Деяке збільшення розрахункових глибин до відбивальної межі відповідає плавному підвищенню рельєфу, що й було підтверджено під час виконання наземних робіт.

### 3.2.3 Радіолокаційне зондування мерзлих порід

Зондування мерзлих порід проводилося нами в березні 1974 р. [25] з борту вертольота в зоні сезонно промерзаючих ґрунтів північних річок. Зондуванню піддавався мерзлий піщаний ґрунт на річковій косі та болото, що промерзло на глибину близько 2 м. Експериментальна установка, що використовувалася в цих роботах, забезпечувала формування зондувальних радіоімпульсів тривалістю то,  $\tau_{0,5} = 5\text{--}6$  нс методом ударного збудження антен на частоті 440 МГц. Реєстрація відбитих сигналів здійснювалася за допомогою стробоскопічного осцилографа після попереднього детектування їх у приймальному тракті. Енергетичний потенціал цього радіолокатора дорівнює приблизно 40 дБ, що забезпечувало можливість зондування до висот польоту близько 30 м.

Зондування мерзлого ґрунту на річковій косі проводили в режимі "висіння" вертольота на висоті близько 20 м над заздалегідь розміченими досить рівними майданчиками з однорідним за товщиною сніговим покривом. Температура повітря дорівнювала  $-10\text{...}-19^\circ\text{C}$  середня товщина снігового покриву 52 см. Для роботи над промерзлим болотом вибирали ділянки, вкриті лише шаром моху, позбавлені дерев і чагарників. Зондування проводилося в режимі горизонтального польоту зі швидкістю 50 км/год із висоти 20 м. Нерівності верхньої межі зондованої поверхні і зміна товщини снігового покриву (від 50 до 150 см) призводили

до помітних флуктуацій відбитих сигналів, хоча загальний характер відбиття залишався, як правило, незмінним.

На рисунку 23 показано осцилограми відбитих сигналів (після детектування і стробоскопічної обробки), що дають наочне уявлення про відношення амплітуд г. На рисунку 23, б, в лівий імпульс відповідає відбиттю від верхньої межі зони промерзання, правий – відбиттю від нижньої межі. Для більшості отриманих у цьому експерименті фотокадрів характерною є наявність доволі чітких сигналів, що відповідають відображенню від меж зони промерзання [25]. Середньостатистичне значення часового інтервалу між відбитими сигналами становить  $\Delta t = 23,7$  нс.

Наступні експерименти у квітні 1975 р. на півночі Західного Сибіру з борту літака пов'язані з радіолокаційним зондуванням багаторічномерзлих порід. Для експериментів було обрано три маршрути, що перетинають досить рожеві заболочені ділянки долини річки, вкриті щільним сніговим покривом завтовшки 1–1,5 м. Структура зондованого середовища включала мерзлий торф, супіски та суглинки. На ділянках таликів зондоване середовище було представлене дрібнозернистими пісками, покритими мохово-дерновим шаром товщиною близько 0,2 м. Температура мерзлих порід змінювалася за товщиною від  $-0,2$  до  $-1,6^{\circ}\text{C}$ . Зондування здійснювалося радіоімпульсами тривалістю  $\tau_{0,5} \approx 35$  нс, формованими методом ударного збудження антен на частоті 70 МГц. Польоти виконувалися зі швидкістю 150 км/год на висотах 250–500 м.

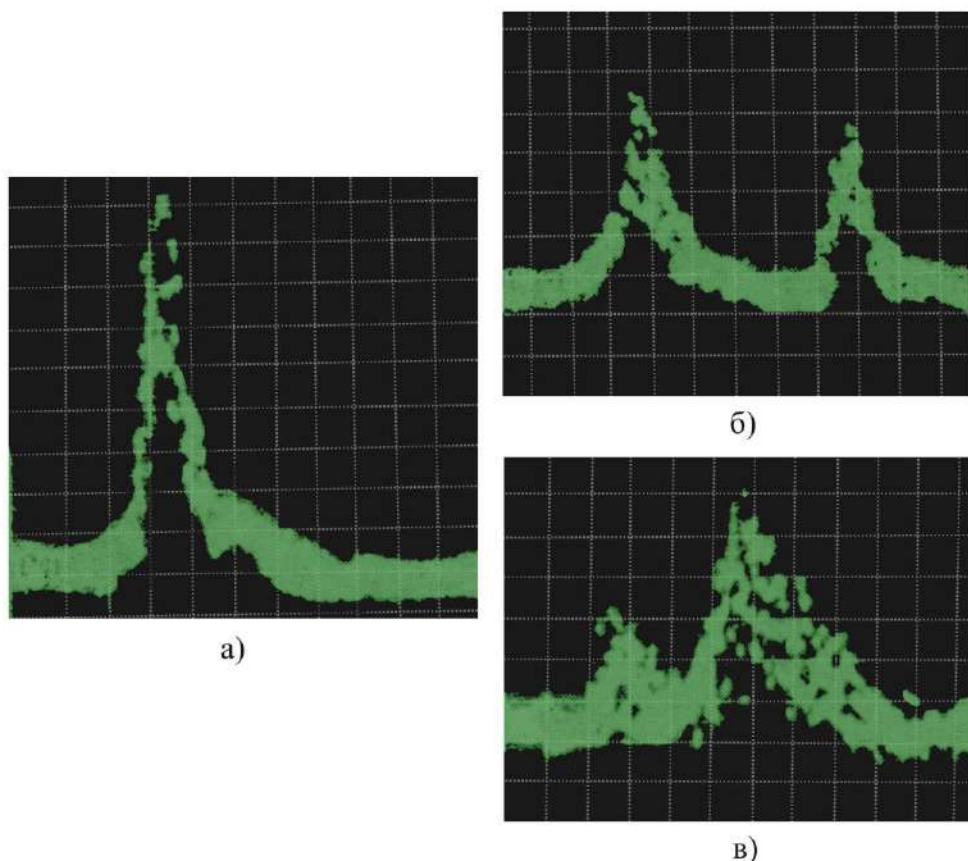
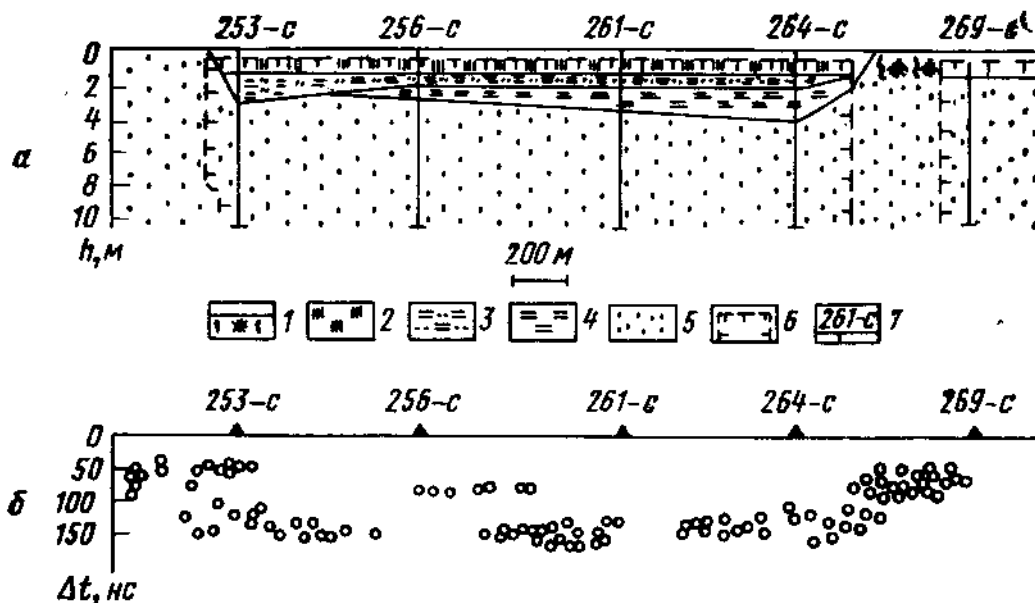


Рисунок 23 – Осцилограми відбитих сигналів, отриманих під час зондування мерзлих порід на частоті  $f = 440$  МГц:

а – зондувальний сигнал (відбиття від поверхні відкритої води); б – сигнали, відбиті від меж промерзлого піщаного ґрунту; в – сигнали, отримані під час зондування промерзлого торф'яного болота, масштаб 5 нс/діл

Для всіх досліджених маршрутів польоту було отримано досить чіткі відбиті сигнали. Зіставлення часового інтервалу  $\Delta t$  між ними з геологічним розрізом зондованих поверхонь показує, що відбиття відбувається від меж розділу середовищ, що входять до складу. Характер зміни "часового розрізу", побудованого за результатами вимірювання інтервалу  $\Delta t$  між відбитими сигналами, як правило, збігається з характером зміни геологічного розрізу. Це ілюструється рисунку 24, на якому подано геологічний розріз досліджуваної поверхні вздовж першого маршруту та побудований за результатами зондування відповідний часовий розріз.

Під час побудови останнього враховувалися тільки збіги серій відбитих сигналів, отриманих під час зондування з різних висот.



а – геологічний розріз ділянки зондування; 1 – мохово-дерновий покрив; 2 – торф; 3 – супісок; 4 – суглинок; 5 – пісок; 6 – межі багаторічномерзлих порід; 7 – номери свердловин; б – "часовий розріз", побудований за результатами зондування.

Рисунок 24 – Результати радіолокаційного зондування багаторічномерзлих порід

Як видно із зіставлення наведених даних, першим горизонтом, що добре відбиває сигнали, є пласт суглинку, що залягає на глибині 2 м. Сигнали, отримані в районі свердловин 253-с і 256-с, часовий інтервал  $\Delta t$  між якими дорівнює 50–75 нс, відповідають відбиттю від верхньої межі суглинку. Серія сигналів із часом затримки  $\Delta t = 130\text{--}150$  нс відповідає відбиттю від межі мерзлих пісків і суглинків. На ділянках таликів (свердловини 253-с, 264-с – 269-с) відбиті сигнали в більшості випадків мають  $\Delta t = 40\text{--}75$  нс. Тут відбивною межею є, мабуть, межа розділу мерзлих і талих пісків.

Розрахунок електричних характеристик зондованого середовища для двошарової моделі з двох однорідних шарів дає можливість оцінити діелектричну проникність мерзлих порід. Для верхнього шару (торф і супісок)  $\epsilon_c \approx 6\text{--}14$ , для

суглинку  $\varepsilon_c \approx 16$ . Ці дані добре збігаються як із результатами лабораторних вимірювань [26], так і з результатами наземних експериментів із радіолокаційного зондування мерзлоти на частоті 50 МГц [21]. Оцінка величини загасання радіохвиль за результатами зондування дає для верхнього шару  $\Gamma = 0,14$  дБ/м, для суглинку  $\Gamma = 0,9$  дБ/м.

### 3.3 Алгоритм узгодження висот з використанням РВБД

#### 3.3.1 Огляд радіовисотоміру безперервної дії NARA24

Залежно від реалізації радіовисотоміра, дані, отримані в результаті відбивання сигналу від поверхні, що зондується, і після обробки, які можна отримати на RX каналі різних РВ, можуть відрізнятися.

На рисунку 25 представлено зображення РВБД у корпусі від компанії Nanoradar NRA24. При подальшому розгляді умовимося, що ми будемо отримувати дані про вимірювання висоти у вигляді пакетів даних.



Рисунок 25 –Радіовисотомір у корпусі NRA24

Радіовисотомір NRA24 використовує інтерфейс UART-TTL зі швидкістю передавання даних за замовчуванням 115200 бод, 8 біт даних, 1 стоповий біт, без біта парності, без керування потоком. Кожне повідомлення даних починається з послідовності запуску і закінчується послідовністю завершення. У кожному циклі даних NRA24 (20 мс) буде видаватися повідомлення про стан системи NRA24 і стан виходу цілі. Якщо поле номера виявленої цілі в повідомленні про статус виходу виявленої цілі дорівнює 1, за повідомленням про статус виходу цілі слідує повідомлення про вихід цілі, що містить параметр висоти цілі. Отримані дані можна сформувати у вигляді масиву даних для подальшого опрацювання [27]. Позначення виводів інтерфейсу PB NRA24 наведено в таблиці 4 [27].

Таблиця 4 – Позначення PB NRA24

Номер контакту	Назва	Значення
1	POWER IN (червоний)	5~20 В DC
2	GND (чорний)	–
3	TTL USART_RX (білий)	0~3.3V DC
4	TTL USART_TX (жов- тий)	0~3.3V DC

Повне повідомлення даних UART-TTL-зв'язку складається з 14 байт. Кожен байт даних є «unsigned8bit». Діапазон даних 0 – 255 (0 – 0xFF). А формат показано на рисунку 26. Кожне повідомлення даних містить ідентифікатор повідомлення для розрізнення різних типів повідомлень [27].



Byte \ Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
0	Start Sequence (2 x Uint8)							
1								
2	Message ID (2 x Uint8)							
3								
4	Data Payload (7 x Uint8 )							
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11	Check Sum (1 x Uint8 )							
12	End Sequence (2 x Uint8)							
13								

Рисунок 26 – Формат повідомлення даних

### 3.3.2 Алгоритми узгодження висот рельєфу

Основна мета алгоритму узгодження висот рельєфу – об'єднати інформацію з РВ, бази даних рельєфу, INS та вимірювань барометричного висотоміра. Об'єднання даних на виході повинно представляти оцінку положення ЛА разом з похибкою оцінки. [28] Загалом, існує два способи вирішення цієї проблеми об'єднання даних. Один підхід полягає в тому, щоб зібрати заздалегідь визначену кількість вимірювань, на основі яких будується профіль місцевості і де інформація про курс і швидкість отримується від ИНС. Потім профіль співвідноситься з картою рельєфу місцевості, де найкраще рішення використовується для оцінки положення літака. Другий підхід полягає в тому, щоб розглядати проблему як задачу оцінювання і рекурсивно знаходити і оцінювати положення літака для кожного нового вимірювання. Перший підхід називатимемо пакетним, а другий – рекурсивним. [28]

Пакетний підхід досить простий і фактично являє собою проблему обробки зображень через двовимірність карти. Можна використовувати кілька схем кореляції, які узгоджують профіль рельєфу місцевості з базою даних рельєфу місцевості (рисунок 27), наприклад, алгоритм найменших квадратів. Недоліком методу ванн є те, що якщо рельєф повторюється або є дуже плоским, то в базі даних рельєфу може бути декілька позицій, які добре відповідають отриманим вимірам. По суті, немає способу дізнатися заздалегідь необхідну кількість вимірювань, необхідних для пошуку єдиного унікального шляху відповідно до бази даних рельєфу. Крім того, пакетний метод не генерує невизначеність оцінки рішення, придатну для використання з фільтрацією Калмана [28].

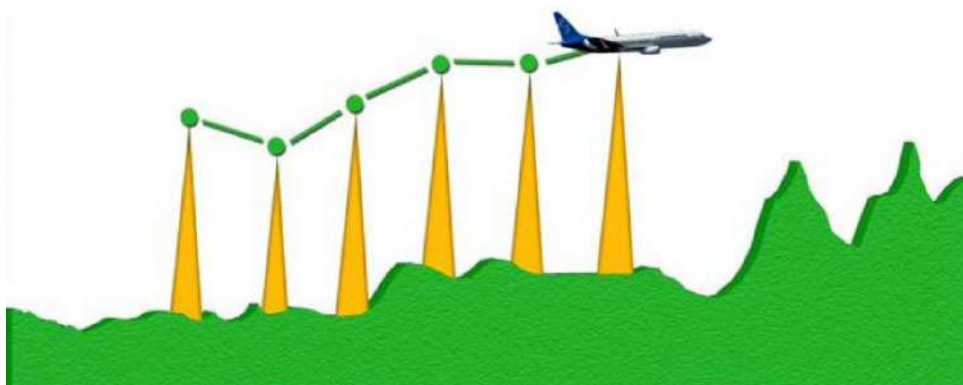


Рисунок 27 – Пакетний підхід оцінки положення ЛА

Таким чином, рекурсивний підхід є більш привабливим, оскільки немає необхідності заздалегідь знати кількість вимірювань, необхідних для знаходження єдиного рішення для оцінки положення. Ідея полягає в тому, щоб продовжувати обробку вимірювань до тих пір, поки не залишиться тільки одна можлива оцінка. Характеристики рельєфу накладають додаткові вимоги на рекурсивний алгоритм, оскільки для кожного нового виміру буде декілька позицій, що відповідають виміряній, в результаті чого утворюється декілька розрізнених областей, в яких може перебувати літак. Таким чином, рекурсивний розв'язок повинен мати справу з декількома оцінками положення паралельно після обробки нового виміру. Це є причиною того, що не так легко отримати хороший алгоритм, який

вирішує проблему рекурсивно, як для пакетного методу. Йому має передувати моделювання задачі, тоді як пакетний розв'язок може бути розроблений без моделі. [28].

### 3.3.3 Кореляційно-екстремальні системи навігації

Кореляційно-екстремальні системи навігації (КЕСН) вже не малий час широко застосовуються у системах позиціонування і нині не втрачають актуальності. Кількість розроблених типів КЕСН, що відрізняються як за принципом дії, так і за способами технічної реалізації, постійно зростає.

З технічної точки зору КЕСН належать до найбільш досконалих бортових радіоелектронних систем.

В узагальненому вигляді принцип дії КЕСН можна представити так. Наявна на борту, попередньо отримана (еталонна) інформація про характеристики певного фізичного поля Землі заданої ділянки місцевості порівнюється з поточною інформацією, що надходить від бортового датчика. У результаті порівняння визначають справжнє місце розташування об'єкта і видають сигнал корекції в "грубу" навігаційну систему (зазвичай інерціальну – ІНС). У зв'язку з тим, що в пристрої порівняння зазвичай реалізуються різні способи кореляційного оброблення, такі системи навігації дістали назву кореляційно-екстремальних систем.

Визначальний вплив на характеристики системи має тип фізичного поля Землі, за яким працює КЕСН.

Найбільшого поширення набули системи, що працюють за поверхневими фізичними полями. Просторово-часові сигнали в таких системах є функціями двох просторових координат і часу і називаються зображеннями. Подальший виклад присвячено головним чином кореляційній обробці двовимірних сигналів-зображень. Кореляційне опрацювання в цьому випадку має прозорий фізичний сенс – поєднання зображень.

Параметри фізичних полів Землі не є абсолютно стабільними. Це ускладнює проблему суміщення зображень, оскільки сигнали, одержувані за

допомогою поточних датчиків (РЛС, ГЧ, лазерних тощо), важко передбачувани. Наприклад, зображення комплексу будівель, отримане за допомогою скануючого ГЧ-датчика з високою роздільною здатністю, залежить не тільки від зовнішніх розмірів будівель і будівельних матеріалів (які можна вважати відомими під час підготовки еталонних зображень), а й від таких невідомих чинників, як внутрішня структура будівель, температурний режим і кондиціонування повітря усередині будівель протягом 12 годин до отримання зображення, сонячна активність, метеорологічні умови (хмарність, туман, дощ) тощо. Тому передбачити зображення з точністю до найдрібніших подробиць зазвичай не можна. Однак у будь-якому разі існують елементи зображень, які можуть бути передбачені з великим ступенем достовірності. Отже, одна з найважливіших проблем під час розроблення КЕСН і вибору кореляційно-екстремального алгоритму полягає в ідентифікації цих елементів для заданих типів полів, зображень і датчиків.

Під класичним алгоритмом кореляційного оброблення зображень розуміють обчислення функції взаємної кореляції або інтеграла типу згортки з подальшим пошуком максимуму цієї функції.

До недоліків класичного алгоритму слід віднести великий обсяг обчислень, тому що обчислення функції взаємної кореляції проводять за всіх можливих відносних зсувів оброблюваних зображень. При цьому якщо розміри зображень дорівнюють  $M \times M$  і  $N \times N$ , то кількість точок, для яких обчислюють функцію кореляції, дорівнює  $(N - M + 1)^2$ . Зазвичай це число є значним.

Часто класичний алгоритм використовують для обробки зображень не в сигнальному просторі, а в просторі перетворень Фур'є. У цьому випадку

$$R(x, y) = F^{-1}\{G(f_x, f_y) \cdot T^*(f_x, f_y)\},$$

де  $F^{-1}$  – символ зворотного перетворення Фур'є;

$G(f_x, f_y)$  і  $T(f_x, f_y)$  – перетворення Фур'є зображень  $g(x, y)$  і  $t(x, y)$ ;

\* – символ комплексної спряженості.

Функціонування класичного кореляційного алгоритму за наявності спотворень у зображеннях розглянуто в роботі [29].

Різницевий кореляційний алгоритм. Різницеві кореляційні алгоритми засновані на поелементному обчисленні різниць інтенсивності зображення. З погляду обчислювальних витрат різницеві алгоритми мають перевагу перед класичним алгоритмом, оскільки в них відсутня операція множення. Загальний вираз для різницевих алгоритмів має вигляд.

Існують безліч різних алгоритмів, таких як: різницеві кореляційні алгоритми, кореляційно-екстремальне опрацювання за допомогою парних функцій, кореляційно-екстремальне опрацювання з використанням інваріантних моментів, кореляційне опрацювання з використанням сум градієнтних векторів, дворівневі кореляційні алгоритми, алгоритм зсуву лінійних ознак, алгоритм фазової кореляції, всі вони описані у роботі [30].

До класу різницевих кореляційних алгоритмів належить алгоритм послідовного визначення схожості зображень (ПВСЗ) [34]. Цей дозволяє скоротити обсяг обчислень. У звичайних різницевих алгоритмах міра подібності зображень обчислюється за всіх можливих положень поточного зображення щодо еталона. Однак очевидно, що точні обчислення має сенс проводити тільки для невеликого числа точок поблизу максимуму кореляційної функції. Алгоритм. ПВСЗ має вигляд.

$$I(m, n) = \min_{n, m} \left\{ \sum_i \sum_d |g(i, j) - t(i - m, j - n)| \right\}.$$

Таким чином, як положення суміщення вибирають положення з найменшою сумарною помилкою. При цьому задається порогове значення сумарної помилки  $T$ , у разі перевищення якого обчислення припиняються і встановлюється нове відносне положення зображень. Очевидно, що вибір величини порога має велике значення для ефективності алгоритму. У роботі ПН показано, що

найкращі результати отримують, якщо поріг має вигляд монотонно зростаючої кривої.

Алгоритм ПВСЗ значно скорочує обсяг обчислень. Результати порівняння обсягу обчислень при класичному кореляційному методі, обчисленні кореляційної функції за допомогою швидкого перетворення Фур'є та алгоритму ПВСЗ наведено в таблиці 5. Обсяг обчислень для кожного алгоритму перераховано в еквівалентне число операцій додавання. З таблиці видно, що алгоритм ПВСЗ знижує обсяг обчислень у 10–50 разів [34].

Таблиця 5 – Порівняння обсягу обчислень під час використання різних алгоритмів.

Кількість елементів розкладання		Класичний кореляційний алгоритм	ШПФ	ПВСЗ
L	M	$4,5 \cdot M^2(L - M + 1)^2$	$20L^2 \log_2 L$	$4 \left[ 1 + 10 \left( \frac{M}{32} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot (L - M + 1)^2$
128	32	$4,4 \cdot 10^7$	$2,25 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^5$
256	32	$2,57 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^6$
512	32	$1,1 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^8$	$1,05 \cdot 10^7$
1024	32	$4,5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$4,35 \cdot 10^7$
2048	32	$1,85 \cdot 10^{10}$	$8,8 \cdot 10^9$	$1,75 \cdot 10^8$
128	64	$8,15 \cdot 10^7$	$2,25 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^5$
256	64	$6,9 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^6$
512	64	$3,7 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^7$
1024	64	$1,7 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^7$
2048	64	$7,4 \cdot 10^{10}$	$8,8 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^8$
256	128	$1,15 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^8$	$1,37 \cdot 10^6$
512	128	$1,1 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^8$	$1,25 \cdot 10^7$
1024	128	$5,8 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^9$	$6,7 \cdot 10^7$
2048	128	$2,5 \cdot 10^{11}$	$8,8 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^8$
512	256	$2 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^8$	$7,5 \cdot 10^6$
1024	256	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^7$
2048	256	$1 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^8$
1024	512	$2,7 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	$4,1 \cdot 10^7$
2048	512	$2,6 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^8$
2048	1024	$4,5 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^9$	$5,7 \cdot 10^8$

## 4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТУВАННЯ НА ОСНОВІ КАРТ ВИСОТ

### 4.1 Огляд загальнодоступних баз даних висот

Для отримання даних висот певної місцевості існує чимало сервісів, наприклад, компанія Google надає можливість за допомогою інтерфейсу програмування додатка «Elevation API» запитувати дані про висоту. Це служба, яка повертає дані про висоту для місця розташування на Землі або вибірккові дані про висоту вздовж шляхів [31].

Даний варіант нам не дуже підходить, бо, по перше, для створення карти висот навіть певної області, потрібно зробити дуже багато запитів, а по друге, цей сервіс є платним, хоча і дає можливість за допомогою пробних коштів зробити декілька десятків тисяч запитів. Порівняння сервісів за їх можливостями наведено в таблиці 5.

Таблиця 6 – порівняння можливостей, які надають сервіси

	Доступ	Прив'язка до координат	Формат даних	Роздільна здатність, м
Google Elevation API	Платний	Існує	Запит у кодї до по точкам	30
DEM.Net Elevation API!	Безкоштовний	Не існує	Різноманітні варіанти карт висот	1–30
Архівна база з STMR	Безкоштовний	Існує	.hgt-файл	30
Maptoolkit	Платний	Існує	Запит у кодї до по точкам	30
Viewfinder panoramas	Безкоштовний	Існує	.hgt-файл	30 (не повне покриття)

Були і ще варіанти сервісів, які надають дані про висоти, але найбільш відповідним до наших вимог була офіційна архівна база геологічної служби США і наукового центру спостереження та вивчення ресурсів Землі, яка зберігається на архівних комп'ютерах. Ця база має різноманітні знімки поверхні нашої землі, але нас цікавить саме дані, які були зібрані радіолокаційною топографічною місією шатла (SRTM) [32].

SRTM – міжнародний дослідницький проєкт зі створення цифрової моделі висот Землі за допомогою радарної топографічної зйомки її поверхні. Отримана цифрова модель охопила 80% земної суші (від 56° пд. ш. до 60° пн. ш.) [33].

Щоб отримати дозвіл на завантаження файлів даного серверу, треба зареєструватися на сайті «Earthdata» від НАСА. У даному архіві можна знайти різні файли з назвою SRTM, але нас цікавить саме SRTM з позначкою 1, тому що ця директорія має мапи висот, з роздільною здатністю 1 дугова секунда, це дорівнює 30,87 м.

Для того щоб зрозуміти, який саме файл з певною областю нам потрібен, треба звернутися до географічної системи координат, а саме спосіб запису з градусами, хвилинами і секундами.

Наприклад, у нас є файл під назвою «N50E028.hgt», це значить, що початок координат цієї області починається з 50° за північною широтою та 58° за східною довготою. У даному випадку, відлік масиву даних висот починається знизу зліва, і читається зліва направо. Знаючи ці дані можна розрахувати координати будь-якої точки у цій області.

## **4.2 Використання бібліотеки GDAL для формування бази даних для орієнтування**

GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) – це бібліотека-транслятор для растрових і векторних форматів геопросторових даних, яка випускається під ліцензією з відкритим вихідним кодом у стилі MIT від Open Source Geospatial



Foundation. Як бібліотека, вона представляє єдину растрову абстрактну модель даних і єдину векторну абстрактну модель даних для всіх підтримуваних форматів. Вона також постачається з різноманітними корисними утилітами командного рядка для перекладу та обробки даних.

Ця бібліотека, чудово нам підходить, бо дозволяє опрацювати ті самі файли, у форматі .hgt, створювати растрове відображення карт та робити різноманітні розрахунки с масивами висот.

У додатку Б наведено код, написаний на мові Python, який за допомогою бібліотеки GDAL відкриває файл висот під назвою «N50E028.hgt», данні з цього файлу зчитуються и записуються у масив, який потім виводиться у вигляді растрового зображення. Виконання програми наведена на рисунку 28.

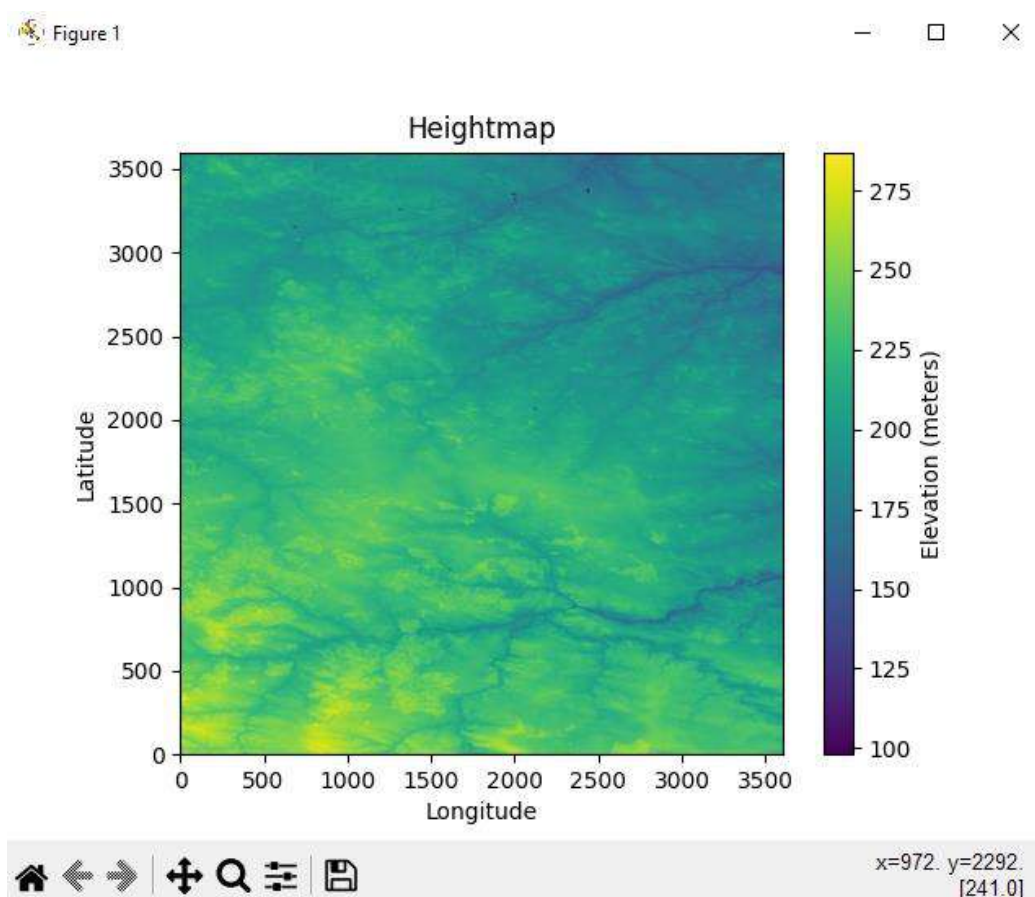


Рисунок 28 – Виведення растрового зображення карт висот

Знизу справа на панелі інструментів можна побачити 3 значення даних,  $x$  та  $y$  – це положення миші на координатній площині, шаг координатної сітки відповідає 1-му пікселю, а цей піксель дорівнює одній дуговій секунді, тобто на екваторі приблизно дорівнює 30,87 метрам.

До речі, у кодї, у параметрах відображенні графіка, є такий параметр як «`map='viridis'`»: Цей параметр визначає карту кольорів, яку буде використано для відображення скалярних даних у кольори. У цьому випадку використовується карта кольорів «`viridis`». Карти кольорів визначають відображення значень даних у кольори. `Viridis` – це перцептивно однорідна карта кольорів, тобто зміна кольору відповідає аналогічній зміні сприйнятої яскравості або інтенсивності. Вона часто використовується для представлення безперервних даних, таких як висота.

### **4.3 Реалізація програми позиціонування БПЛА**

Для написання програми було використано декілька основних бібліотеки у мові програмування Python, одна з яких вже була зазначена – GDAL, друга бібліотека – tkinter та інші додаткові бібліотеки. Tkinter (від англ. Tk interface) – це крос-платформна подієво-орієнтована графічна бібліотека, заснована на Tk і широко використовується в середовищах GNU/Linux та інших UNIX-подібних системах, а також портована на Microsoft Windows.

За допомогою цієї бібліотеки було створено візуалізацію програми для зручності налагодження коду та візуального відображення результатів. Деталі щодо цього коду можна знайти у додатку В, але тут ми зосередимо увагу на основних моментах та результаті.

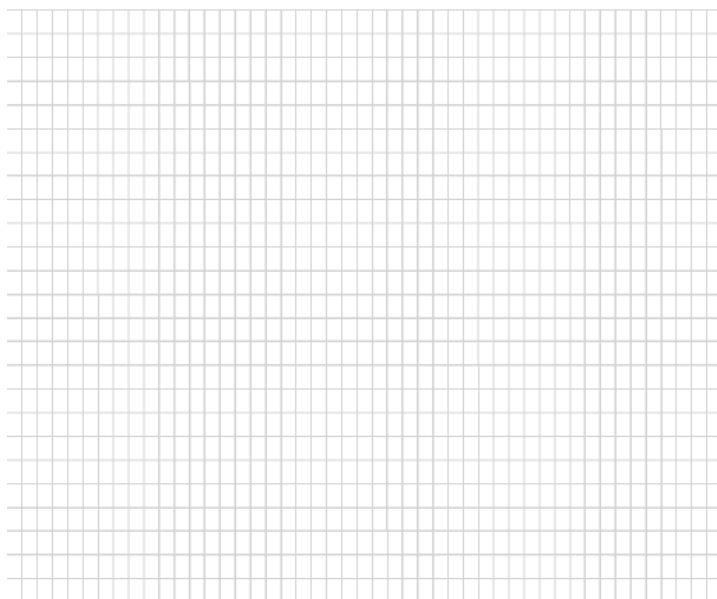


Рисунок 29 – Координатна сітка з роздільною здатністю у 1 кутову секунду

По-перше, у бібліотеці tkinter існує власна система координат полотна, яка працює зверху вниз, тоді як дані з карти висот ідуть віднизу вгору. Оскільки дані у карті висот виражені у кутових секундах, відстані між комірками в залежності від довготи суттєво відрізняються. Для вирішення цього питання у коді була використана сітка, розміри комірок якої дорівнюють розмірам комірок завантаженої карти. Кожна одиниця значення координат на полотні tkinter відповідає 1 метру, що дозволяє встановити реальну швидкість БПЛА. Створену сітку наведено на рисунку 29.

Ще однією проблемою було створення пристрою, подібного до радіовисотоміру. Для спрощення коду було зроблено припущення, що зона опромінення поверхні землі має форму квадрата, а БПЛА розташований у центрі цього квадрата у вигляді трикутника. Дані при скануванні поверхні отримувалися за координатами квадрата, а для імітації роботи радіовисотоміра обчислювалось середнє значення висот на основі цих даних.

Для створення істинної траєкторії руху була використана копія БПЛА, яку називаємо привидом. Цей привид не має погрешностей і рухається з заданою швидкістю без будь-яких відхилень. Це дозволяє відстежувати істинну

траєкторію руху. На рисунку 30 зображено два БПЛА у вигляді трикутників із визначеними площинами опромінення РВБД. Трикутник червоного кольору представляє собою БПЛА, позначений позицією з відхиленням внаслідок похибок ІНС, у той час як трикутник синього кольору представляє собою вигляд БПЛА-привида, який ілюструє задану траєкторію руху без похибок. Рух БПЛА направлено у напрямку сходу.

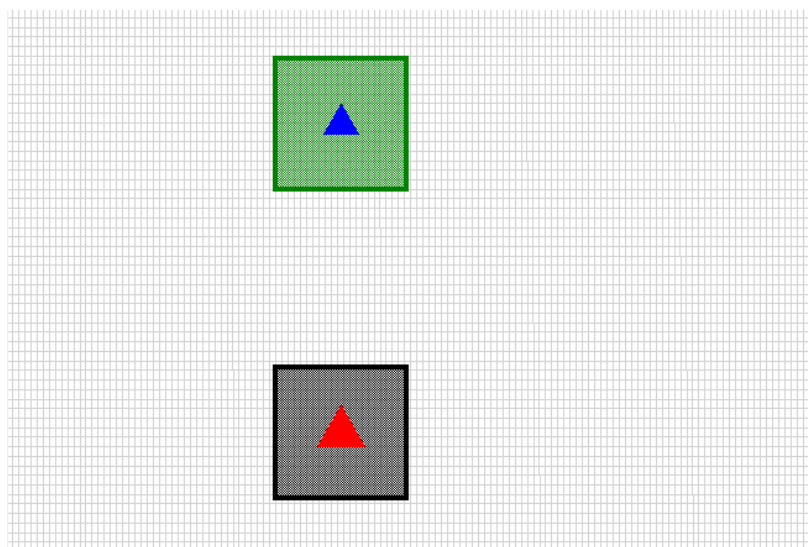


Рисунок 30 – Візуалізація БПЛА з визначеною зоною опромінення РВБД

Тепер можна розробити алгоритм позиціонування БПЛА. Для спрощення коду припускаємо, що при запуску БПЛА вже має певний зсув по координаті  $y$  і летить вправо по координаті  $x$  без зсувів. За основу алгоритму було взято пакетний підхід, який використовує кілька схем кореляції для порівняння профілю рельєфу місцевості з базою даних рельєфу.

Суть полягає в тому, що здійснюється сканування п'ятьох зон з певним інтервалом, щоб один замір не перекривав інший. На рисунку 31 наведено приблизно ту зону, яка буде скануватися за допомогою РВ. На основі цих замірів робимо заміри також і на еталонній карті висот, використовуючи істинну траєкторію руху БПЛА. Зона вимірів розширюється до максимального можливого відхилення БПЛА. Потім для кожного рядка по осі  $y$  збираються дані з таким самим охопленням, як і за допомогою РВ. За допомогою коефіцієнта кореляції за

Пірсомом отримуємо значення коефіцієнта кореляції, записуючи його, якщо воно є максимальним. Після повторення цього процесу для інших рядків отримуємо координати того рядка, який має максимальний коефіцієнт кореляції з вимірами РВ.

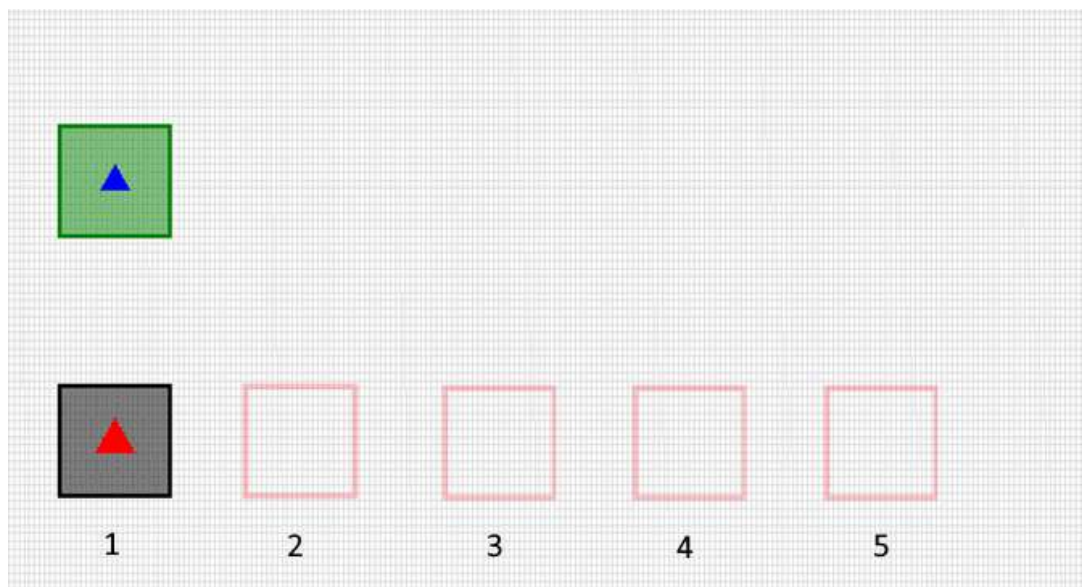


Рисунок 31 – Ілюстрація роботи збору даних п'яти точок

Отримавши максимальне значення коефіцієнту кореляції, ми вже можемо визначити зсув БПЛА відносно заданої траєкторії. Залишається лише перемістити БПЛА згідно з цим зсувом, і наше коригування позиції можна вважати завершеним. Результат корекції позиції БПЛА після п'яти вимірів, пошуку і кореляції можна побачити на рисунку 32.

Як видно, в результаті застосування розробленого алгоритму та пересування БПЛА і збору даних від п'яти точок висот, ми отримали правильне значення зсуву БПЛА і скорегували його позицію до заданої траєкторії руху.

Такий же результат було отримано при різних значеннях початкової у-координати БПЛА.

Також, до вимірів РВ було додано випадковий шум із фактором 5 метрів. Іншими словами, висота сканованої поверхні у кожній точці коливалася від -5 до

+5 метрів і навіть при таких похибках результат залишався незмінним. Тільки при факторі шуму 10 метрів корекція позиції давала трохи інше значення зсуву.

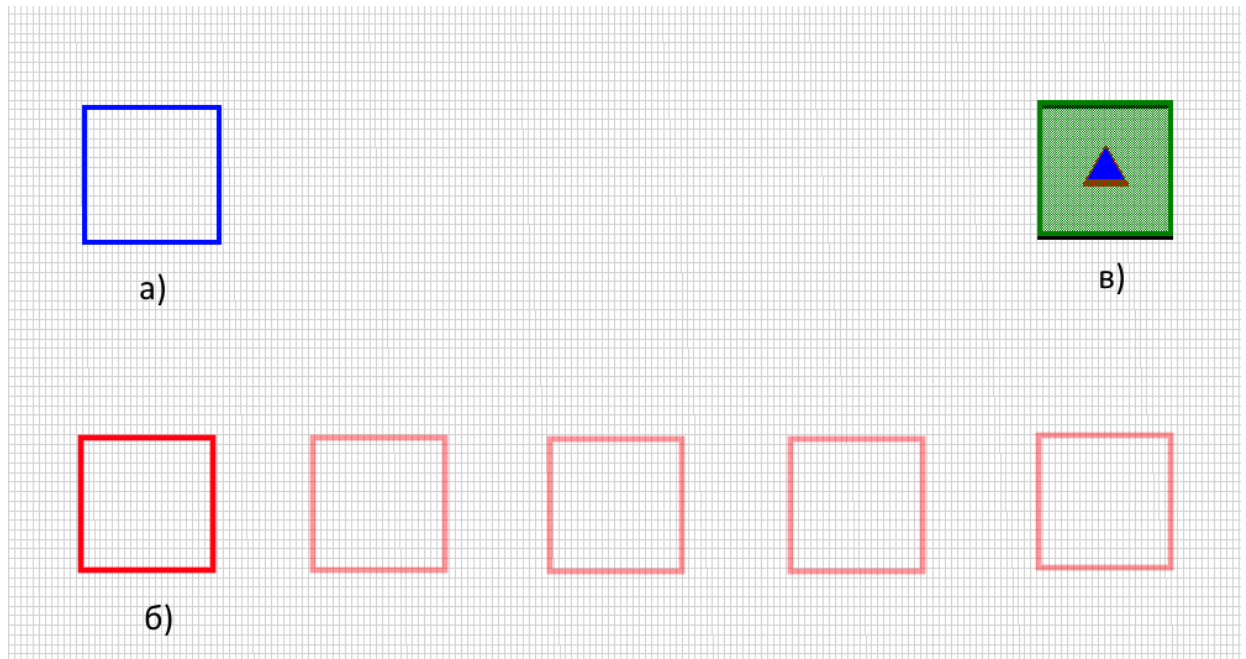


Рисунок 32 – Виконання алгоритму корекції позиції БПЛА:

а) позиція БПЛА-привида (задана траєкторія); б) позиція БПЛА до проведення сканування поверхні і корегування; в) скорегована позиція БПЛА.

## ВИСНОВКИ

Після проведення роботи був виконаний аналіз наявних конструктивних рішень виконання висотомірів. Для БПЛА різних типів було запропоновано низку РВБД. У якості прикладу був обраний радіовисотомір NRA24, представлений компанією Nanoradar.

Розглянуті методи без супутникового орієнтування, і визначено їх оптимальну комбінацію у вигляді інерціальної навігаційної системи (ІНС), позиціонування за допомогою рельєфу місцевості та навігації за допомогою підповерхневого зондування. Детально описано особливості поглиблення радіочастотних сигналів різними типами поверхонь.

Розглянуто загальнодоступні бази даних висот і обрано найбільш відповідну для подальших досліджень. На основі карт висот був розроблений простий програмний алгоритм із візуалізацією. Цей алгоритм дозволив точно коригувати рух БПЛА за 5 точок сканування підстильної поверхні.

Хоча алгоритм, представлений у цій роботі, має обмеження, він виявився досить ефективним. Розвиток цього алгоритму, навіть із деякими похибками, дозволить коригувати рух БПЛА при будь-яких відхиленнях у орієнтації. Для вирішення більших похибок просто потрібно збільшити кількість вимірювань, або використовувати рекурсивний підхід. Єдиним обмеженням може бути занадто рівна поверхня, що може призвести до проблеми знаходження істинної максимально корельованої зони. У такому випадку, додаткові системи корекції за допомогою підповерхневого зондування допоможуть доповнити картину місцезнаходження БПЛА.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Seth F. Radar altimeters overview of operation, design, and performance. / Seth F. – Honeywell International Inc., 2021. – 45 p.
2. Смирнов Н.В. Исследование работы радиовысотомера с линейной частотной модуляцией над лесной поверхностью: магистерская диссертация / Н. В. Смирнов. – Е. : 2015. – 146 с.
3. Basic Principles of Inertial Navigation / Seminar on inertial navigation systems – Tampere : Tampere University of Technology – 22 p.
4. Britting K. R. Inertial navigation systems analysis / Britting K. R. — Wiley-Interscience, 1971. — 249 p.
5. Radartutorial – Радіолокатори підповерхневого зондування [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp16.uk.html>
6. Финкельштейн М.И. Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейна, Мендельсон В.Л., Кутев В.А. – М. : Сов. радио, 1977. – 176 с.
7. Jakhula P. Measurement of Ice and Frost Thickness with an FM–CW Radar / Jakhula P., Ylinen P., Tiuri M. – Warszawa : 10th Eur. Microwave Conf., 1980. – P. 584–599.
8. Волковский С. А. Радиоустройства систем управления летательными аппаратами. / Волковский С. А., Оноприенко Е. И., Савинов В. А. – М. : «Машиностроение», 1972. – 407 с.
9. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации. / Финкельштейн М. И. – М. : «Сов. радио», 1973. – с. 496.
10. Page D. F., Venier G. O., Cross F. R. Snow and ice depth measurements by high range resolution radar. – «Can. Aer. Space J.», 1973, v. 19, № 10, p. 531–533.
11. Christoffersen P. D. Experiments with electromagnetic probing of sea ice. / Christoffersen P. D., Gudmandsen P. – Lyngby : Technical University Denmark, 1970. – 24 p.



12. Коган И. М. Ближняя радиолокация. / Коган И. М. – М. : «Сов. радио», 1973. – с. 272.
13. Sosnovskii A. A. Radioelektronnoe oborudovanie letatel'nykh apparatov: sprav. [Aircraft Radio Equipment Handbook] / Sosnovskii A. A., Khaimovich I. A. – Moscow : Transport, 1987 – 255 p.
14. Sosnovskii A. A. Aviatsionnaya radionavigatsiya: sprav. [Air Navigation Aids. Handbook] / Sosnovskii A. A., Khaimovich A. I., Lutin E. A. et al. : Moscow, Transport, 1990. – 264 p.
15. Ostrovityanov R. V. Teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei [Theory of Radar of Extended Targets] / Ostrovityanov R. V., Basalov F. A. – Moscow : Radio i svyaz', 1992. – 232 p.
16. Teoreticheskie osnovy radiovysotometrii [Theory of Radio Altimetry] / Zhukovskii A. P. Onoprienko E. I., Chizhov V. I. – Moscow : Sov. Radio, 1979. – 320 p.
17. Tarasenkov A. A. The FM-Radio Range Sensor with Digital Tracking Loop. Sensors and Systems. – 2019. – № 2, P. 40–44.
18. Stefan-Adrian Toma, Tudose M. L. Demonstration of analog to information conversion for fmcw radar signals. – MTA REVIEW, 2015. – V. XXV, № 3. – P. 231–242.
19. FMCW Radar Sensing for Indoor Drones Using Learned Representations / Ali Safa, Tim Verbelen, Ozan Catal, et al. – Leuven, Belgium : ESAT, KU Leuven, 2IDLab, Ghent University, 3imec, 2023. – 6 p.
20. El-Said M. A. H. Geophysical prospection of underground water in the desert by means of electromagnetic interference fringes. – «Proc. IRE», 1956. – V. 44, № 1. – P. 24–30.
21. Богородский В. В. Радиозондирование льда. – Л. : Гидрометеиздат., 1975. – 64 с.
22. Чубаров В. Н. Питание грунтовых вод песчаной пустыни через зону аэрации. – М. : «Недра», 1972. – 135 с.
23. Лещанский Ю. И., Лебедева Г. Н., Шумилин В. Д. Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых,

дециметровых и метровых волн. – «Изв. Вузов СССР. Сер. Радиофизика», 1971. – Т. 14, № 4 – С. 562–569.

24. Finkelstein M. I. Method of deep radar sounding in geological research. / Finkelstein M. I., Vlasov O. P., Gorny V. I. et al.; URSI «Microwave Scattering and Emission from Earth». – Berne (Zwitzerland), 1974. – P. 215–224.

25. Глушнев в. Г. Об измерении некоторых электрофизических характеристик при радиолокационном зондировании мерзлых почв. / Глушнев в. Г., Слуцкер. Б. Д., Финкельштейн М. И.; Изв. вузов СССР. – Сер. Радиофизика, 1976. – Т. 19, № 1. – С. 59–63.

26. Богородский В. В. Электрические свойства многолетнемерзлых пород и поглощение радиоволн в них / Богородский В. В., Трепов Г. В., Федоров Б. А.; «Изв. АН СССР. Сер. Физика земли». – 1971, № 6, – 359, С. 86–88.

27. NRA24 millimeter wave radar User manual [Electronic resource]. – Hunan : Hunan Nanoradar Science and Technology Co., Ltd., 2017. – ver. 2.1 – Access mode : <http://en.nanoradar.cn/File/view/id/436.html>

28. Niclas Bergman. Bayesian Interference in Terrain Navigation: Division of Automatic Control / Department of Electrical Engineering – Linkoping : Linkoping University, 1997. – 20 p.

29. Mostafavi H. Image correlation with geometric distortion / Mostafavi H., Smith F. W. [IEEE Trans]. – 1978. – v. AES-14, № 3. – P. 487–493

30. Бочкарев А.М. Корреляционно-экстремальные системы навигации / За-  
рубежная радиоэлектроника. – 1981. – № 9. – С. 28–53.

31. Google Maps Platform – Elevation API overview [Electronic resource]. – Access mode : <https://developers.google.com/maps/documentation/elevation/overview?hl>

32. Index of /MEASURES: U.S. GOVERNMENT COMPUTE [Electronic resource]. – Access mode : <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MEASURES/>

33. Nikolakopoulos K. G. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece / Nikolakopoulos K. G. Kamaratakis E. K.; Chrysoulakis.

– N. International Journal of Remote Sensing : journal. — London : Taylor & Francis, 2006. – V. 27, № 21. – ISSN 0143-1161.

34. Barnea, D. I., (1972). A class of algorithms for fast digital Registration / Barnea D. I., Silverman H. F. [IEEE Trans], 1972. – V. C-21, № 2. – P. 179–186.

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Електричні характеристики піщаних ґрунтів

f, МГц	Вологість, %		$\epsilon'$	tg $\delta$	$\Gamma$ , дБ/м	Джерело 1	
$10^{-3}$	12		69,0	8,4	$2,9 \cdot 10^{-3}$	[А.1]	
	0,4		38,0	3,6	$1,3 \cdot 10^{-3}$		
$10^{-2}$	12		30,0	5,8	$1,6 \cdot 10^{-2}$		
	0,4		10,0	2,3	$5,0 \cdot 10^{-3}$		
0,1	12		7,0	1,6	$3,2 \cdot 10^{-2}$		
	0,4		0,6	0,6	$1,3 \cdot 10^{-2}$		
0,5	$\gamma$	0	4,0	0,01	$9 \cdot 10^{-4}$		[21] <sup>2</sup>
		0,1	6,5	0,3	0,04		
		0,2	15,0	1,0	0,16		
		0,3	14,0	1,3	0,30		
1	$\gamma$	0	4,0	0,01	$2 \cdot 10^3$		
		0,1	6,0	0,17	0,04		
		0,2	11,5	0,76	0,23		
		0,3	250	0,88	0,4		
	12		6,0	0,6	$1,3 \cdot 10^{-1}$	[А.1]	
	0,4		6,0	0,3	$6,7 \cdot 10^{-2}$		
3	$\gamma$	0	4,0	0,01	$5 \cdot 10^{-3}$	[21] <sup>2</sup>	
		0,1	6,0	0,1	0,06		
		0,2	11,0	0,51	0,46		
		0,3	21,0	0,51	0,66		
10	$\gamma$	0	4,0	0,01	0,02		
		0,1	5,0	0,1	0,2		
		0,2	11,0	0,23	0,7		
		0,3	21,0	0,30	1,2		
	12		5,5	0,2	0,42	[А.1]	
	0,4		5,5	0,2	0,42		
30	$\gamma$	0	4,0	0,01	0,05	[21] <sup>2</sup>	
		0,1	5,0	0,07	0,42		
		0,2	10,0	0,13	1,1		
		0,3	19,0	0,17	2,0		
50	Сухий		4–9	–	1,0		
	Вологий		4–9	–	2,0		
	Вологонасичений		15,6	–	2,5		
60	Сухий		4–9	–	1,5		
	Вологий		4–9	–	2,5		
	Вологонасичений		15,6	–	2,5		

Продовження таблиці А.1

				1–1,8	[21] <sup>3</sup>
60–70			–	0,57	[24] <sup>4</sup>
133	4	4,9	–	1,8	[A.3]
	8	6,9	–	3,5	
	12	10,9	–	5,3	
	16	14,6	–	6,5	
150	Сухий	–	–	2,5	[21] <sup>2</sup>
	Вологий	–	–	2,5	
	Вологонасичений	–	–	4,0	
200	Сухий	–	–	3,5	
	Вологий	–	–	2,5	
	Вологонасичений	–	–	4,0	
333	4	4,9	–	1,4	[A.3]
	8	6,9	–	5,7	
	12	10,9	–	7,1	
	16	14,9	–	10,0	
	Сухий	2,0	0,015	0,6	[A.1]
	Вологий	24,0	0,025	1,1	
10 <sup>3</sup>	4	5,1	–	5,7	[A.3]
	8	7,1	–	11,4	
	12	10,6	–	17,2	
	16	14,0	–	22,0	
10 <sup>4</sup>	4	4,0	–	200	
	8	6,0	–	470	
	10	10,0	–	730	
	12	13,0	–	930	
	Кварцовий пісок	2,3	0,0012	1,7	[A.4]

Примітка 1. Усюди (крім [21, А.5]) лабораторні вимірювання за допомогою коаксіальних ліній і вимірювальних мостів (у [А.2] на природних зразках).

Примітка 2. У [21] за  $f = 0,5\text{--}30$  МГц лабораторні вимірювання за допомогою моста та вимірювального конденсатора на зразках, попередньо оброблених у лабораторії ( $\gamma$  – об'ємна концентрація води;  $\gamma = 0,4$  відповідає піску, повністю залитому водою); за  $f = 30\text{--}350$  МГц – лабораторні вимірювання на природних зразках за допомогою коаксіальних ліній.

Примітка 3. Натурні вимірювання методом зондування з поверхні радіоімпульсом  $\tau \approx 0,1$  мкс.

Примітка 4. Натурні вимірювання методом зондування з літака радіоімпульсом  $\tau_{0,5} \approx 40\text{--}60$  нс.

Таблиця А.2 – Електричні характеристики глинистих ґрунтів<sup>1</sup>

f, МГц	Вологість, %	$\epsilon'$	$\operatorname{tg} \delta$	$\Gamma$ , дБ/м
$10^{-4}$	12,0	37,0	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
	0,4	6,6	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-7}$
$10^{-3}$	12,0	37,0	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
	0,4	6,2	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-6}$
$10^{-2}$	12,0	27,0	0,20	$9,4 \cdot 10^{-4}$
	0,4	5,3	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
0,1	12,0	10,0	0,30	$0,86 \cdot 10^{-2}$
	0,4	4,7	0,10	$2,5 \cdot 10^{-3}$
1	12,0	8,6	0,16	0,04
	0,4	4,0	0,16	0,03
3	12,0	8,0	0,16	0,12
	0,4	3,6	0,16	0,08
133	4	5,4	–	123
	8	8,0	–	27
	12	12,0	–	40
	16	18,6	–	53
333	4	–	–	20
	8	8,0	–	40
	12	12,6	–	60
	16	18,0	–	80
$10^3$	4	5,1	–	40
	8	7,1	–	80
	12	12,0	–	120
	16	18,0	–	150
$10^4$	4	4,0	–	200
	8	6,0	–	470
	12	10,0	–	800
	16	13,0	–	1070

Примітка 1. Лабораторні вимірювання за допомогою коаксіальних ліній і вимірювальних мостів. Для  $f = 10^{-4} - 3$  МГц – дані [А.1], для  $f = 133 - 10^4$  МГц – дані [А.3].

Таблиця А.3 – Електричні характеристики суглинків (за [98])<sup>1</sup>

f, МГц	Вологість, %	$\varepsilon'$	Г, дБ/м	tg $\delta$	Г, дБ/м
		Суглинок сірий		Суглинок каштанової	
30	5	6,0	4,8	4,5	2,1
	10	10,0	9,1	6,5	2,8
	20	20,0	15,6	11,0	6,6
60	5	5,6	6,5	4,0	2,7
	10	8,0	10,2	6,0	3,5
	20	17,0	18,3	10,5	8,1
120	5	4,8	9,9	4,0	3,2
	10	7,0	15,5	6,5	4,6
	20	14,7	2,6	10,0	10,8
240	5	4,5	12,6	4,0	4,7
	10	6,2	21,4	5,3	6,3
	20	13,4	35,8	9,5	15,2
480	5	4,1	20,0	4,0	7,7
	10	5,9	31,4	5,2	10,8
	20	12,3	52,5	9,5	22,6
960	5	4,0	29,4	4,0	13,7
	10	5,5	50,0	5,0	18,3
	20	11,3	78,0	9,5	35,2
1920	5	4,0	46,5	4,0	29,0
	10	5,1	81,5	5,0	40,2
	20	10,6	120,0	9,5	60,0
3840	5	4,0	71,0	4,0	64,5
	10	5,0	119,0	5,0	92,0
	20	10,0	198,0	9,5	102,0

Примітка 1. Лабораторні вимірювання на природних зразках за допомогою коаксіальних ліній. Еквівалентна густина сухого зразка 1,2 г/см<sup>3</sup>. Значення Г перераховані за наведеними автором значеннями в См/м.

Таблиця А.4 – Електричні характеристики вапнякових порід

f, МГц	Вологість, %	$\epsilon'$	$\text{tg } \delta$	$\Gamma$ , дБ/м	Джерело <sup>1</sup>	
0,1	0	8,3	–	–	[А.6]	
	0,1	9,8	0,020	$5,7 \cdot 10^{-4}$		
	0	10,0	0,14	$4 \cdot 10^{-3}$	[А.5]	
	0,4	60,0	–	–		
	0,6	100,0	–	–		
1	0	8,0	0,020	$5,1 \cdot 10^{-3}$	[А.6]	
	0,1	9,0	0,053	$1,4 \cdot 10^{-2}$	[А.5]	
	0	10,0	0,15	0,04		
	0,4	17,0	–	–		
	0,6	28,0	–	–		
10	0	8,0	0,017	0,04	[А.6]	
	0,1	8,7	0,032	0,08	[А.5]	
	0	10,0	0,075	0,22		
	0,4	11,0	–	–		
	0,6	12,0	–	–		
	–	9,0	–	0,74		
30	0	10,0	0,078	0,68	[А.5]	
	0,4	10,0	0,09	0,78		
	0,6	10,0	0,10	0,86		
	–	9,0	–	1,10	[А.7]	
	60	0	8,0	0,019	0,15	[А.6]
		0,1	8,5	0,026	0,20	
100	0	8,0	0,021	0,32		
	0,1	8,5	–	–		
100	0	8,0	0,02	0,51	[А.6]	
	0,1	8,4	–	–		
	–	9,0	–	2,00	[А.7]	
10 <sup>3</sup>	0	8,0	0,02	5, 10	[А.6]	
	0,1	8,4	–	–		

Примітка 1. У [А.5, А.6] – лабораторні вимірювання на природних зразках; у [А.7] – натурні вимірювання в шахтах методом радіопросвічування.



Таблиця А.5 – Електричні характеристики доломіту (лабораторні вимірювання)

f, МГц	$\epsilon'$	$\text{tg } \delta$	$\Gamma$ , дБ/м	Джерело
$10^{-4}$	15,0	0,10	$3,5 \cdot 10^{-6}$	[A.8]
.	.	.	.	
.	.	.	.	
.	.	.	.	
10	10,0	0,03	$8,6 \cdot 10^{-2}$	[A.9]
1	7,0	0,15	$3,6 \cdot 10^{-2}$	
10	6,5	$3 \cdot 10^{-2}$	0,07	
20	6,5	$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,1	
50	7,5	$2 \cdot 10^{-2}$	0,2	
100	6,7	$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,6	

Таблиця А.6 – Електричні параметри снігу

Характер снігу	f, Гц	$\epsilon'$	$\text{tg } \delta$	$\Gamma$ , дБ/м
Свіжовипавший сніг				
t= -20°C	$10^3$	3,33	0,4920	$7,9 \cdot 10^{-5}$
	$10^4$	1,82	0,3420	$4,1 \cdot 10^{-4}$
	$10^5$	1,24	0,1400	$1,4 \cdot 10^{-3}$
	$10^6$	1,20	0,0215	$2,4 \cdot 10^{-3}$
	$10^7$	1,20	0,0040	$3,9 \cdot 10^{-2}$
	$3,9 \cdot 10^{-2}$	1,20	0,0012	$3,6 \cdot 10^{-2}$
t= -6°C	$3,9 \cdot 10^{-2}$	1,20	0,00029	$8,7 \cdot 10^{-2}$
	$10^{10}$	1,26	0,00042	$4,3 \cdot 10^{-1}$
Щільний сніг				
t= -6°C	$10^5$	1,90	1,53	$1,6 \cdot 10^{-2}$
	$3 \cdot 10^5$	1,80	0,8000	$2,7 \cdot 10^{-2}$
	$10^8$	1,55	0,2900	$3,2 \cdot 10^{-2}$
	$3 \cdot 10^8$	1,55	0,1200	$4,0 \cdot 10^{-2}$
	$3 \cdot 10^9$	1,50	0,0009	$3,0 \cdot 10^{-1}$

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

А.1 Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород / Пархоменко Э. И. – М. : «Наука», 1965. – 164 с.

А.2. Ford L. «Proc. Phys. Soc.» / Ford L. Oliver R. – 1946. – v. 3, № 327.

А.3. Лещанский Ю. И. Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн / Лещанский Ю. И., Лебедева Г. Н., Шумилин В. Д. – «Изв. Вузов СССР. Сер. Радиофизика», 1971. – т. 14, № 4. – С. 562–569.

А.4 Кротиков В. Д. Некоторые характеристики земных пород и их сравнение с характеристиками поверхностного слоя Луны / Кротиков В. Д. – «Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика», 1962. – т. 5, № 6. – С. 1057–1061.

А.5. Гаргацев И. О. О частотной зависимости диэлектрических характеристик осадочных пород Дагестана / Гаргацев И. О., Батырмурзаев А. С. Ш., Исаяев И. Д. О и др. – «Изв. АН СССР. Сер. Физика земли», 1975, № 5. – С. 86—89.

А.6. Чистяков С. И. Экспериментальное исследование диэлектрических свойств продуктивных пластов в переменных высокочастотных электромагнитных полях / Чистяков С. И., Саяхов Ф. Л., Бабалян Г. А. и др. – «Изв. вузов СССР. Сер. Геология и разведка», 1971. – № 12, С. 153—156.

А.7. Петровский А. Д. О коэффициентах поглощения и эффективных электрических сопротивлениях блоков горных пород на рудных месторождениях / Петровский А. Д., Борисов Б. Ф., Клейменов М. А. – «Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 1970. – № 10. – С. 48—58.

А.8. Collett L. S. Electrical parameters of rocks indeveloping geophysical techniques / Collett L. S., Katsube T. I. – «Geophys», 1973. – V. 38, № 1. – P. 76–81.

А.9. Lambert T. An underground electromagnetic sounder experiment / Lambert T., Dolphin J. R., Bollen R. L. et al. – «Geophys.», 1974. – V. 39, № 1. – P. 49–55.

## ДОДАТОК Б

### Текст програми

```

from osgeo import gdal
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def read_hgt_file(file_path):
    dataset = gdal.Open(file_path)
    if dataset is None:
        print("Failed to open the file.")
        return None

    # Читаємо дані з растра
    band = dataset.GetRasterBand(1)
    elevations = band.ReadAsArray()

    # Закриваємо датасет
    dataset = None

    return elevations

def plot_heightmap(elevations):
    plt.imshow(elevations, cmap='viridis', extent=(0, elevations.shape[1], 0,
elevations.shape[0]))
    plt.colorbar(label='Elevation (meters)')
    plt.xlabel('Longitude')
    plt.ylabel('Latitude')
    plt.title('Heightmap')
    plt.show()

def onclick(event, elevations):
    if event.xdata is not None and event.ydata is not None:
        x, y = int(event.xdata + 0.5), int(event.ydata + 0.5)
        if 0 <= x < elevations.shape[1] and 0 <= y < elevations.shape[0]:
            elevation = elevations[y, x]
            print(f'Clicked at ({x}, {y}). Elevation: {elevation} meters')

# Замініть 'шлях_до_вашого_файлу.hgt' на фактичний шлях до вашого файлу .hgt
file_path = 'шлях_до_вашого_файлу.hgt'
elevations = read_hgt_file(file_path)

if elevations is not None:
    plot_heightmap(elevations)
    plt.connect('button_press_event', lambda event: onclick(event, elevations))
    plt.show()

```



## ДОДАТОК В

### Текст програми

```
import random
import math

import numpy as np
import tkinter as tk
import matplotlib.pyplot as plt

from scipy.stats import pearsonr
from osgeo import gdal

def open_hgt_file(file_path):
    """
    Функція відкриває .hgt-файл і записує
    дані висот у масив
    """

    dataset = gdal.Open(file_path)
    if dataset is None:
        raise Exception("Failed to open the HGT file.")

    band = dataset.GetRasterBand(1)
    elevation_data_ref = band.ReadAsArray()
    dataset = None

    return elevation_data_ref

class UAV:
    def __init__(self, canvas, x, y, speed, RA_size, UAV_size, UAV_color, RA_color,
drift_rate, grid_coordinates, noise_level):
        self.drift_rate = drift_rate
        self.noise_level = noise_level
        self.canvas = canvas
        self.speed = speed
        self.RA_size = RA_size
        self.UAV_size = UAV_size
        self.UAV_color = UAV_color
        self.RA_color = RA_color
        self.x = x
        self.y = y
        self.triangle = None
        self.square = None
        self.grid_coordinates = grid_coordinates
        self.create_uav()
```

```

def create_uav(self):
    # Створюємо квадрат (зону опромінення радіовисотоміром) навколо трикутника
    square_size = self.RA_size * math.sqrt(2)
    square_x1 = self.x - square_size / 2
    square_y1 = self.y - square_size / 2
    square_x2 = self.x + square_size / 2
    square_y2 = self.y + square_size / 2
    self.square = self.canvas.create_rectangle(square_x1, square_y1, square_x2, square_y2,
outline = self.RA_color)
    # Створюємо трикутник у центрі квадрата
    self.triangle_x1 = self.x - self.UAV_size / 2
    self.triangle_y1 = self.y + self.UAV_size / (2 * math.sqrt(3))
    self.triangle_x2 = self.x + self.UAV_size / 2
    self.triangle_y2 = self.y + self.UAV_size / (2 * math.sqrt(3))
    self.triangle_x3 = self.x
    self.triangle_y3 = self.y - self.UAV_size / math.sqrt(3)
    self.triangle = self.canvas.create_polygon(self.triangle_x1, self.triangle_y1,
self.triangle_x2, self.triangle_y2,
self.triangle_x3, self.triangle_y3, fill=self.UAV_color)

def get_current_index(self):
    """
    Функція використовується для отримання індексів координат
    карти висот перетворені з системи координат полотна
    """

    # Отримуємо координати опромінення РВ
    x1, y1, x2, y2 = self.canvas.coords(self.square)

    # Шукаємо і-ий індекс
    Y1 = min(round((800 - y1) / (30.866666667 / 4)), len(self.grid_coordinates) - 1)
    Y2 = min(round((800 - y2) / (30.866666667 / 4)), len(self.grid_coordinates) - 1)

    row_valuesY1 = self.grid_coordinates[Y1]
    row_valuesY2 = self.grid_coordinates[Y2]

    # Шукаємо максимально близьке значення за координатою x (j-ий індекс)
    closest_valueX1 = float('inf')
    closest_valueX2 = float('inf')
    closest_value_Xpath = float('inf')
    closest_indexX1 = -1
    closest_indexX2 = -1
    closest_index_Xpath = -1

    for index, (xt1, yt1, xt2, yt2) in enumerate(row_valuesY1):
        row_x = xt1
        distance = abs(row_x - x1)

        if distance < closest_valueX1:
            closest_valueX1 = distance
            closest_indexX1 = index

```

```

for index, (xt1, yt1, xt2, yt2) in enumerate(row_valuesY2):
    row_x = xt2
    distance = abs(row_x - x2)

    if distance < closest_valueX2:
        closest_valueX2 = distance
        closest_indexX2 = index

# Міняємо місцями Y1, Y2, оскільки система координат
# полотна йде зверху вниз, а карт висот навпаки
print ('X1:', closest_indexX1, 'Y1:', Y2)
print ('X2:', closest_indexX2, 'Y2:', Y1)

return closest_indexX1, Y2, closest_indexX2, Y1

def select_region (self, elevation_data_ref):
    """
    Функція служить для отримання координат
    опромінюваної зони БПЛА і симуляції отримання
    висот підстилаючої поверхні
    """

    x1,y1,x2,y2 = self.get_current_index()
    resolution = 1.0

    # Обчислюємо індекси відповідних областей висотних даних
    row_start = y1
    row_end = y2
    col_start = x1
    col_end = x2

    # Вибираємо область значень висот
    selected_region = elevation_data_ref[row_start:row_end, col_start:col_end]

    return x1,y1,x2,y2, selected_region

def relocate (self, max_correl_coords_y, y1_ref):
    """
    Функція коригує позицію БПЛА,
    знаючи зміщення за у-координатою
    """

    self.canvas.move(self.triangle, 0, (max_correl_coords_y - y1_ref) * 30.866666667/4)
    self.canvas.move(self.square, 0, (max_correl_coords_y - y1_ref) * 30.866666667/4)

# Пересування БПЛА
def move(self, time):
    noise = random.uniform(-self.noise_level, self.noise_level)
    self.canvas.move(self.triangle, self.speed, noise + self.drift_rate)
    self.canvas.move(self.square, self.speed, noise + self.drift_rate)

```

```

def create_grid(canvas, grid_scale):
    """
    Створюємо сітку поверх полотна, кожна комірка якої
    дорівнює 1 кутовій секунді, що відповідає еталонній карті висот
    """

    cols = 100*grid_scale
    rows = 25*grid_scale
    cell_sizeY = 30.866666667/grid_scale
    grid_coordinates = []

    for i in range(rows):
        column_coordinates = []
        latitude = 50 + i / 3600
        for j in range(cols):
            cell_sizeX = (math.cos(math.radians(latitude)) * 30.866666667)/grid_scale
            x1 = j * cell_sizeX
            y1 = 800 - (i * cell_sizeY)
            x2 = (j + 1) * cell_sizeX
            y2 = 800 - ((i + 1) * cell_sizeY)
            canvas.create_rectangle(x1, y1, x2, y2, outline='lightgray')

            column_coordinates.append((x1, y1, x2, y2))

            index = i
            text_x = (x1 + x2) / 2
            text_y = (y1 + y2) / 2
            #canvas.create_text(text_x, text_y, text=str(index), fill='black', font=('Helvetica', 5))

        grid_coordinates.append(column_coordinates)

    return grid_coordinates

def select_region_defined (elevation_data_ref, x1, y1, x2 , y2):
    """
    Функція отримання висот підстильної поверхні
    за відомих координат
    """

    # Обчислюємо індекси відповідних областей висотних даних
    row_start = y1
    row_end = y2
    col_start = x1
    col_end = x2

    # Вибираємо область значень висот
    selected_region = elevation_data_ref[row_start:row_end, col_start:col_end]

    return selected_region

```



```

def array_to_mean (elevation_array, mean_RA_elevation_data):
    """
    Функція, що перетворює масив висот, отриманих з РВ
    у середнє значення висот для імітації роботи реального РВ
    """

    noise_factor = 0
    noisy_elevation_data = add_random_noise(elevation_array, noise_factor)
    mean_elevation_data = np.mean(noisy_elevation_data)
    mean_RA_elevation_data.append(mean_elevation_data)

    return mean_RA_elevation_data

def add_random_noise(array, noise_factor):
    noise = np.random.normal(0, noise_factor, array.shape)
    noisy_array = array + noise
    return noisy_array

def calculate_square_coordinates(x_start, y_start, width, height, row_index, col_index, gap,
step):

    x = x_start + (width + gap) * col_index
    y = y_start + step * row_index
    return x, y

def recursive_correlation_search(x_start_search_area, y_start_search_area,
x_end_search_area, y_end_search_area,
width, height, gap, elevation_data_ref, mean_RA_elevation_data, step):
    """
    Рекурсивна функція для пошуку найближчої області,
    яка максимально корелює з даними, отриманими з РВ
    """

    row_count = int((y_end_search_area - y_start_search_area) / step)
    col_count = 5

    max_correl_value = -1
    max_correl_coords = None

    for row in range(row_count):
        search_mean_value_array = []
        for col in range(col_count):
            x, y = calculate_square_coordinates(x_start_search_area, y_start_search_area, width,
height, row, col, gap, step)

            selected_region = select_region_defined(elevation_data_ref, x, y, x + width, y + height)
            search_mean_value_array = array_to_mean(selected_region, search_mean_value_ar-
ray)

            correl_value = calculate_correlation(search_mean_value_array, mean_RA_eleva-
tion_data)

```

```

    if correl_value > max_correl_value:
        max_correl_value = correl_value
        max_correl_coords = (x, y)

print('Search mean:', max_correl_value)
if step == 1:
    print ('Max coords', max_correl_coords[1])
    return max_correl_coords[1] # Base case: stop recursion when step size is 1

return recursive_correlation_search(x_start_search_area, max_correl_coords[1],
                                    x_end_search_area + width, max_correl_coords[1] + height,
                                    width, height, gap, elevation_data_ref, mean_RA_elevation_data,
step // 2)

def calculate_correlation(array1, array2):
    """
    Функція розрахунку кореляції двох масивів висот
    """

    correlation_matrix = np.corrcoef(array1, array2)
    correlation_value = correlation_matrix[0, 1]
    return abs(correlation_value)

def plot_elevations(selected_region_RA, selected_region_Ref):
    """
    Функція, яка виводить карту висоти поточного
    вимірювання РВ і таких самих розмірів еталонну карту
    """

    fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(10, 4))

    im1 = ax1.imshow(selected_region_RA, cmap='terrain', origin='lower')
    ax1.set_title('Карта висот 1')

    im2 = ax2.imshow(selected_region_Ref, cmap='terrain', origin='lower')
    ax2.set_title('Карта висот 2')

    fig.colorbar(im1, ax=[ax1, ax2], label='Висота (метри)')

    plt.xlabel('Довгота')
    plt.ylabel('Широта')
    plt.show()

def main():

    hgt_file_path = r"C:\Users\Professional\Desktop\jtomir\N50E028.hgt"
    global time
    global scan_time_period

```

```

global mean_RA_elevation_data
global batch_RA_scan_area
global batch_Ref_scan_area
time = 0
scan_time_period = 3
grid_scale = 4
mean_RA_elevation_data = []
batch_RA_scan_area = []
batch_Ref_scan_area = []

uav_Speed = 19.84*13/10/grid_scale
elevation_data_ref = open_hgt_file (hgt_file_path)

root = tk.Tk()
root.title("UAV Simulator")

canvas = tk.Canvas(root, width=1850, height=800, bg='white')
canvas.pack()

grid_coordinates = create_grid(canvas, grid_scale = grid_scale)

# Створюємо об'єкт БПЛА, який літає з похибкою
uav = UAV(canvas, x=200, y=150, speed = uav_Speed, RA_size=75, UAV_size=40,
UAV_color = 'red', RA_color = 'black', drift_rate = 0, grid_coordinates=grid_coordinates,
noise_level = 0)
# Створюємо об'єкт БПЛА, який летить за істинною (заданою) траєкторією польоту
uavGOST = UAV(canvas, x=200, y=400, speed=19.84*13/10/grid_scale, RA_size=75,
UAV_size=30, UAV_color = 'blue', RA_color = 'green', drift_rate = 0, grid_coordinates=grid_coor-
dinates, noise_level = 0)

def update():
    global time
    global scan_time_period
    global mean_RA_elevation_data
    global batch_RA_scan_area
    global batch_Ref_scan_area

    uav.move(time)
    uavGOST.move(time)
    Sdistance = uav_Speed * time

    # Кожні 3 секунди здійснюватиметься сканування підстильної поверхні
    if time/10 == scan_time_period :
        print (Sdistance)
        x1, y1, x2, y2, selected_region_RA = uav.select_region(elevation_data_ref)
        batch_RA_scan_area.append((x1, y1, x2, y2))

        x1, y1, x2, y2, selected_region_Ref = uavGOST.select_region(elevation_data_ref)
        batch_Ref_scan_area.append((x1, y1, x2, y2))

        mean_RA_elevation_data = array_to_mean (selected_region_RA, mean_RA_eleva-
tion_data)

```

```

# Після 5-го сканування проводиться пошук за допомогою кореляції для кори-
гування польоту
if (scan_time_period == 15):
    print ('RA_mean:', mean_RA_elevation_data)
    #Розміри скану та відступи між ними
    width = batch_RA_scan_area[0][2] - batch_RA_scan_area[0][0]
    height = batch_RA_scan_area[0][3] - batch_RA_scan_area[0][1]
    gap = batch_RA_scan_area[1][0] - batch_RA_scan_area[0][2]
    step = 1

    #Задаємо загальну область пошуку
    x1,y1,x2,y2 = batch_Ref_scan_area[0]
    x_start_search_area = x1
    y_start_search_area = max(0, y1 - 3*height)
    x1,y1,x2,y2 = batch_Ref_scan_area[4]
    x_end_search_area = x2
    y_end_search_area = y2 + 3*height

    max_correl_coords_y = recursive_correlation_search (x_start_search_area,
y_start_search_area,
                                                    x_end_search_area, y_end_search_area,
                                                    width, height, gap, elevation_data_ref,
                                                    mean_RA_elevation_data, step)

    print ('max_correl_coords_y:', max_correl_coords_y)
    x1,y1_ref,x2,y2 = uavGOST.get_current_index()
    uav.relocate (max_correl_coords_y, y1_ref)

    #plot_elevations(selected_region_RA, selected_region_Ref)

    scan_time_period += 3

    time += 1
    root.after(100, update)

    update()
    root.mainloop()

if __name__ == "__main__":
    main()

```

## ДОДАТОК Г

## Слайди презентації



Рисунок Г.1 – Титульний слайд

## Цілі дипломної роботи

- Об'єкт дослідження – безспутникове орієнтування безпілотного літального апарату у просторі.
- Предмет роботи – методика позиціонування безпілотного літального апарату за допомогою радіовисотоміру безперервної дії.
- Мета роботи – провести аналіз існуючих конструктивних рішень радіовисотомірів, розглянути методи безспутникової орієнтації, розробити програму з алгоритмом позиціонування БПЛА.




2

Рисунок Г.2 – Цілі дипломної роботи

## Методи безспутникового орієнтування

Характеристика	Позиціонування	Похибки	Вартість методу
Метод			
Застосування астрономічних об'єктів.	Навігаційно-корекційне	Потреба в точних вимірах потребує врахування багатьох похибок.	Дуже дорогий
Інерційна навігаційна система (ІНС).	Навігаційне	Дрейф. Випадкові похибки.	Дешевий
Навігація за рельєфом місцевості (РМ).	Корекційне	При мінливостях і монотонність рельєфу.	Відносно дешевий (за наявності карти рельєфу)
Зіставлення цифрових зображень поверхні землі.	Корекційне	При мінливостях поверхні і об'єктів.	Відносно дешевий (потребує знімків контрольних точок)
Зондування підповерхневого шару землі.	Корекційне	При зростанні шорсткості поверхні.	Середня вартість (за наявності карти ґрунтів)




3

Рисунок Г.3 – Методи безспутникового орієнтування



Рисунок Г.4 – Типи висотомірів. Радарний висотомір



Рисунок Г.5 – Принцип роботи радіовисотоміру з лінійно-частотною модуляцією

## Способи отримання радіолокаційних профілів

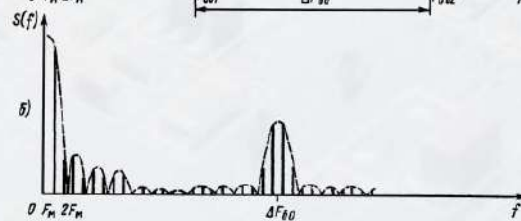
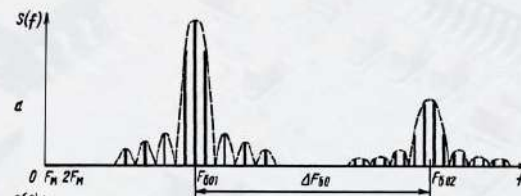
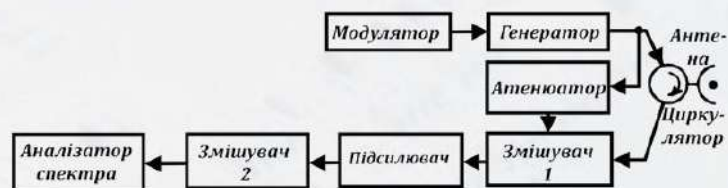
- Для вимірювання висоти в РВ може здійснюватися оцінка середньої частоти сигналу биття, за допомогою частотоміру.
- У досконаліших приладах може виконуватися оцінка висоти методами спектрального аналізу.
- Також може використовуватися аналого-цифрове перетворення з використанням швидкого перетворення Фур'є.
- Нещодавно були запропоновані підходи глибокого навчання для обробки даних з радіовисотомірів.



6

Рисунок Г.6 – Способи отримання радіолокаційних профілів

## Структурна схема. Спектр відбитого сигналу



7

Рисунок Г.7 – Структурна схема. Спектр відбитого сигналу



## Розрахунок товщини шару ґрунту

- Після змішувача, на осі частот утворюються два "імпульси", максимума яких відповідають частотам

$$F_{601} = \frac{4\Delta f_M F_M H}{c}; \quad (1)$$

$$F_{602} = \frac{4\Delta f_M F_M H}{c} + \frac{4\Delta f_M F_M h}{v}. \quad (2)$$

- Для вимірювання товщини шару  $h$  необхідно виміряти інтервал між цими максимумами

$$F_{60} = \frac{4\Delta f_M F_M h}{v}; \quad (3)$$

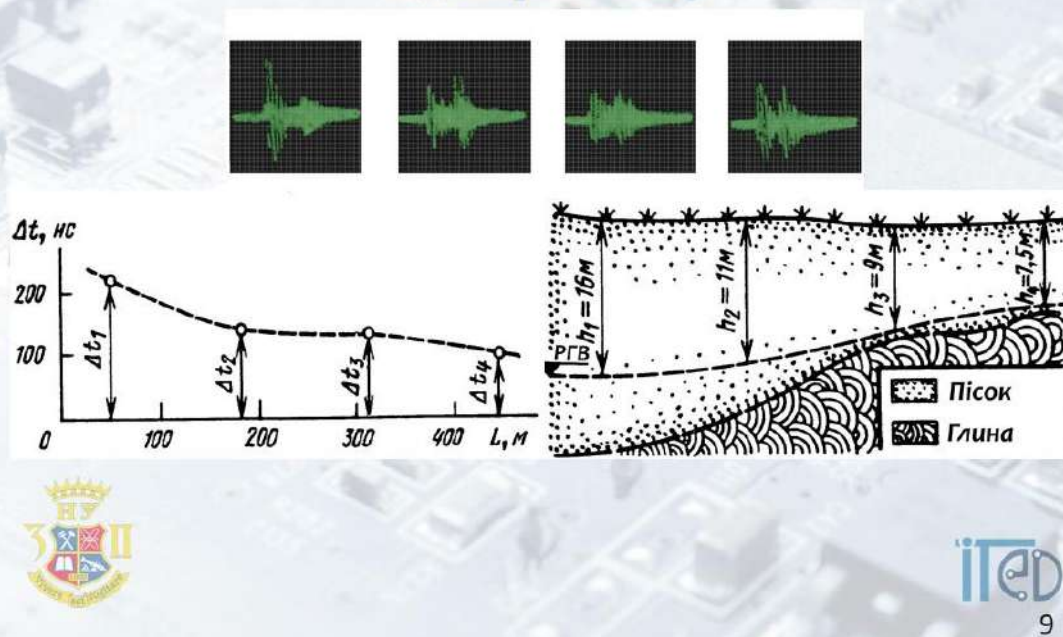
$$\Delta F_{60} = F_{602} - F_{601} = (4\Delta f_M F_M / v)h. \quad (4)$$



8

Рисунок Г.8 – Розрахунок товщини шару ґрунту

## Приклад геологічної інтерпретації результатів радіолокаційного зондування ґрунтових вод під шаром піску



9

Рисунок Г.9 – Приклад геологічної інтерпретації результатів радіолокаційного зондування ґрунтових вод під шаром піску

## Врахування нерівностей відбивальної поверхні

– Для необмеженої гладкої поверхні відбиття в дзеркальному напрямку ( $\Theta_1 = \Theta_2$ ) визначається коефіцієнтами Френеля.

– Якщо та сама поверхня робиться шорсткою, то когерентна складова в дзеркальному напрямку лише дещо зменшується за випадковим законом. Усереднений коефіцієнт відбиття Френеля

$$\overline{R(\Theta_1)} = R(\Theta_1) e^{-2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sigma_h \cos \Theta_1\right)^2}. \quad (5)$$



10

Рисунок Г.10 – Врахування нерівностей відбивальної поверхні

## Врахування нерівностей відбивальної поверхні

• Для великих нерівностей ( $\sigma_h \gg \lambda$ ) когерентна складова відсутня

При цьому відбитий сигнал формується в результаті складання за потужністю окремих некогерентних складових, так що ефективна відбиваюча площа (ЕВП)

$$\sigma_{\text{ц}} = \sigma_{\text{пит}} S_0, \quad (6)$$

• Наприклад, при гаусовому розподілі висот нерівностей питома ЕВП

$$\sigma_{\text{пит}} = \frac{\sec^4 \Theta_1}{a^2} R^2(0) e^{-\frac{\text{tg}^2 \Theta_1}{a^2}}, \quad (7)$$

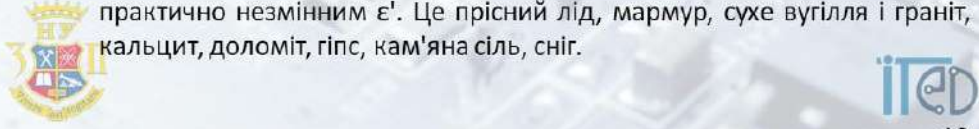


11

Рисунок Г.11 – Врахування нерівностей відбивальної поверхні

## Модельні середовища на основі електричних властивостей гірських порід

- Модель 1 характеризує середовища зі значним загасанням  $\Gamma$ , що сильно збільшується, і діелектричною проникністю  $\epsilon'$ , яка помітно зменшується з частотою. Це відповідає суглинкам і глинам досить великої вологості ( $W > 5\%$ ).
- Модель 2 визначає середовища з помітним, але меншим, ніж для моделі 1, значенням  $\Gamma$ , у яких  $\epsilon'$  значно зменшується з частотою при  $f < 10^8$  Гц і мало змінюється при  $f > 10^8$  Гц. Це відповідає суглинкам і глинам за  $W < 5\%$ , морським льодам, піскам і пісковикам з великою вологістю ( $W > 15\%$ ).
- Модель 3 характеризує середовища, у яких  $\Gamma < 1$  дБ/м за  $f < 10^8$  Гц, а  $\epsilon'$  мало змінюється за  $f < 10^8$  Гц і практично не змінюється за  $f > 10^8$  Гц. До таких середовищ належать сухі та зволожені піски, вапняки, сланці, вологе вугілля і граніти, асфальт, бетон, цегла.
- Модель 4 відповідає середовищам з  $\Gamma < 1$  дБ/м за  $f \approx 10^{10}$  Гц і практично незмінним  $\epsilon'$ . Це прісний лід, мрамур, сухе вугілля і граніт, кальцит, доломіт, гіпс, кам'яна сіль, сніг.



12

Рисунок Г.12 – Модельні середовища на основі електричних властивостей гірських порід

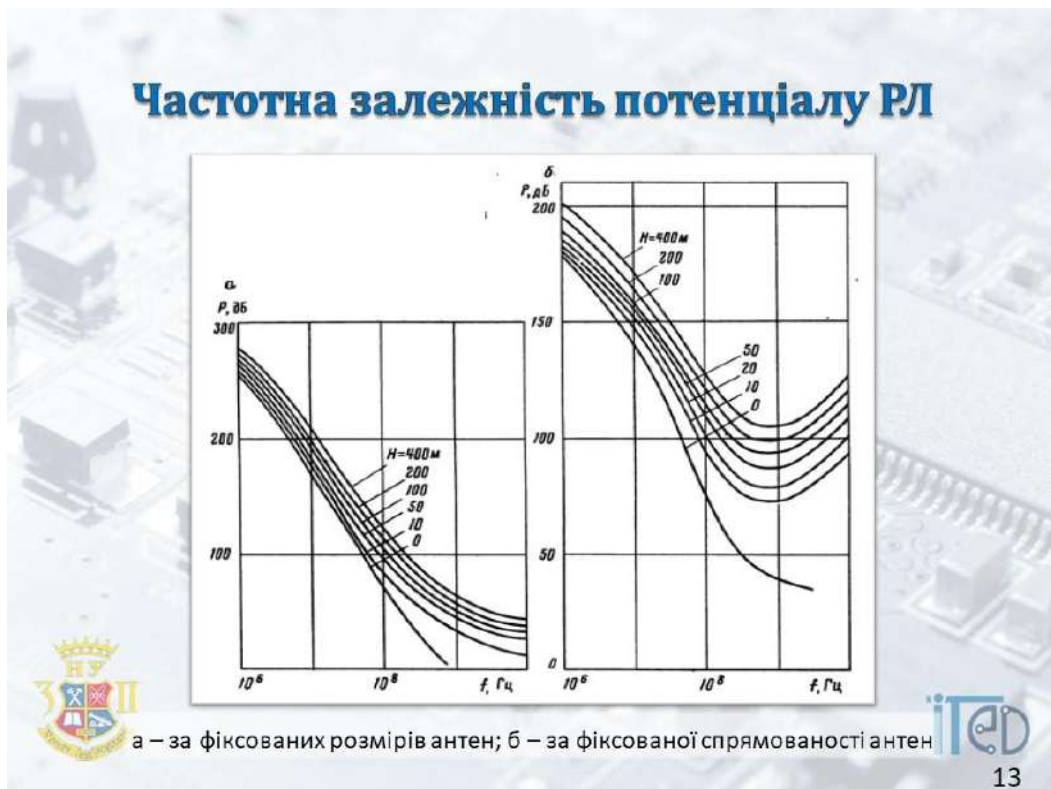


Рисунок Г.13 – Частотна залежність потенціалу РЛ

## Алгоритм узгодження висот рельєфу

- Основна мета алгоритму узгодження висот рельєфу – об'єднати інформацію з РВ, бази даних рельєфу, INS та вимірювань барометричного висотоміра.
- Загалом можна виділити два підходи:
  - пакетний;
  - рекурсивний.



Ілюстрація пакетного підходу



14

Рисунок Г.14 – Алгоритм узгодження висот рельєфу

## Кореляційно-екстремальні системи навігації (КЕНС)

- Часто класичний алгоритм використовують для обробки зображень не в сигнальному просторі, а в просторі перетворень Фур'є. У цьому випадку

$$R(x, y) = F^{-1}\{G(f_x, f_y) \cdot T^*(f_x, f_y)\}. \quad (8)$$

- Обсяг обчислень можна скоротити, скориставшись алгоритмом послідовного визначення схожості зображень (ПВСЗ), який має вигляд

$$I(m, n) = \min_{n, m} \left\{ \sum_i \sum_d |g(i, j) - t(i - m, j - n)| \right\}. \quad (9)$$

- Існує безліч різних алгоритмів КЕНС, таких як: кореляційно-екстремальне опрацювання за допомогою парних функцій, кореляційно-екстремальне опрацювання з використанням інваріантних моментів та інші.



15

Рисунок Г.15 – Кореляційно-екстремальні системи навігації (КЕНС)

### Порівняння обсягу обчислень під час використання різних алгоритмів

Кількість елементів розкладання		Класичний кореляційний алгоритм	ШПФ	ПВСЗ
L	M	$4,5 \cdot M^2(L - M + 1)^2$	$20L^2 \log_2 L$	$4 \left[ 1 + 10 \left( \frac{M}{32} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot (L - M + 1)^2$
128	32	$4,4 \cdot 10^7$	$2,25 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^5$
256	32	$2,57 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^6$
512	32	$1,1 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^8$	$1,05 \cdot 10^7$
1024	32	$4,5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$4,35 \cdot 10^7$
2048	32	$1,85 \cdot 10^{10}$	$8,8 \cdot 10^9$	$1,75 \cdot 10^8$
128	64	$8,15 \cdot 10^7$	$2,25 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^5$
256	64	$6,9 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^6$
512	64	$3,7 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^7$
1024	64	$1,7 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^7$
2048	64	$7,4 \cdot 10^{10}$	$8,8 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^8$
256	128	$1,15 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^8$	$1,37 \cdot 10^6$
512	128	$1,1 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^8$	$1,25 \cdot 10^7$
1024	128	$5,8 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^9$	$6,7 \cdot 10^7$
2048	128	$2,5 \cdot 10^{11}$	$8,8 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^8$
512	256	$2 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^8$	$7,5 \cdot 10^5$
1024	256	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^7$
2048	256	$1 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^8$
1024	512	$2,7 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	$4,1 \cdot 10^7$
2048	512	$2,6 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^8$
2048	1024	$4,5 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^9$	$5,7 \cdot 10^8$




16

Рисунок Г.16 – Порівняння обсягу обчислень під час використання різних алгоритмів

### Огляд загальнодоступних баз даних висот

	Доступ	Прив'язка до координат	Формат даних	Роздільна здатність, м
Google Elevation API	Платний	Існує	Запит у кодї до по точкам	30
DEM.Net Elevation API!	Безкоштовний	Не існує	Різноманітні варіанти карт висот	1–30
Архівна база з SRTM	Безкоштовний	Існує	.hgt-файл	30
Maptoolkit	Платний	Існує	Запит у кодї до по точкам	30
Viewfinder panoramas	Безкоштовний	Існує	.hgt-файл	30 (не повне покриття)




17

Рисунок Г.17 – Огляд загальнодоступних баз даних висот

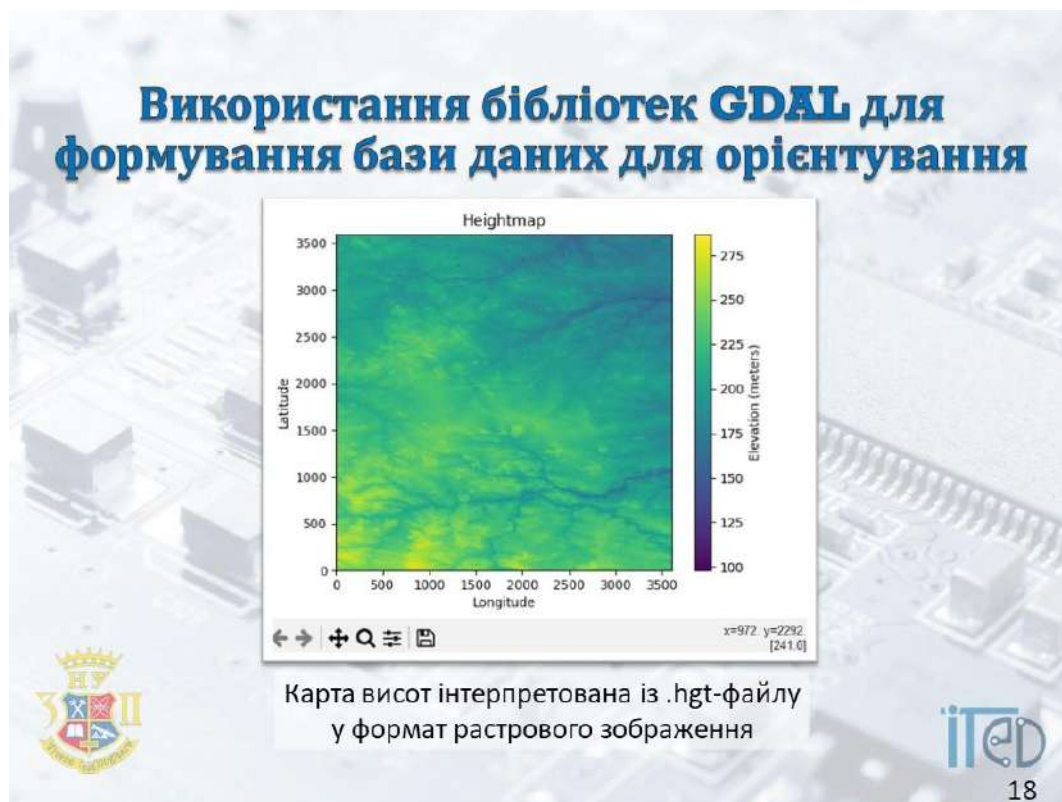


Рисунок Г.18 – Використання бібліотек GDAL для формування бази даних для орієнтування

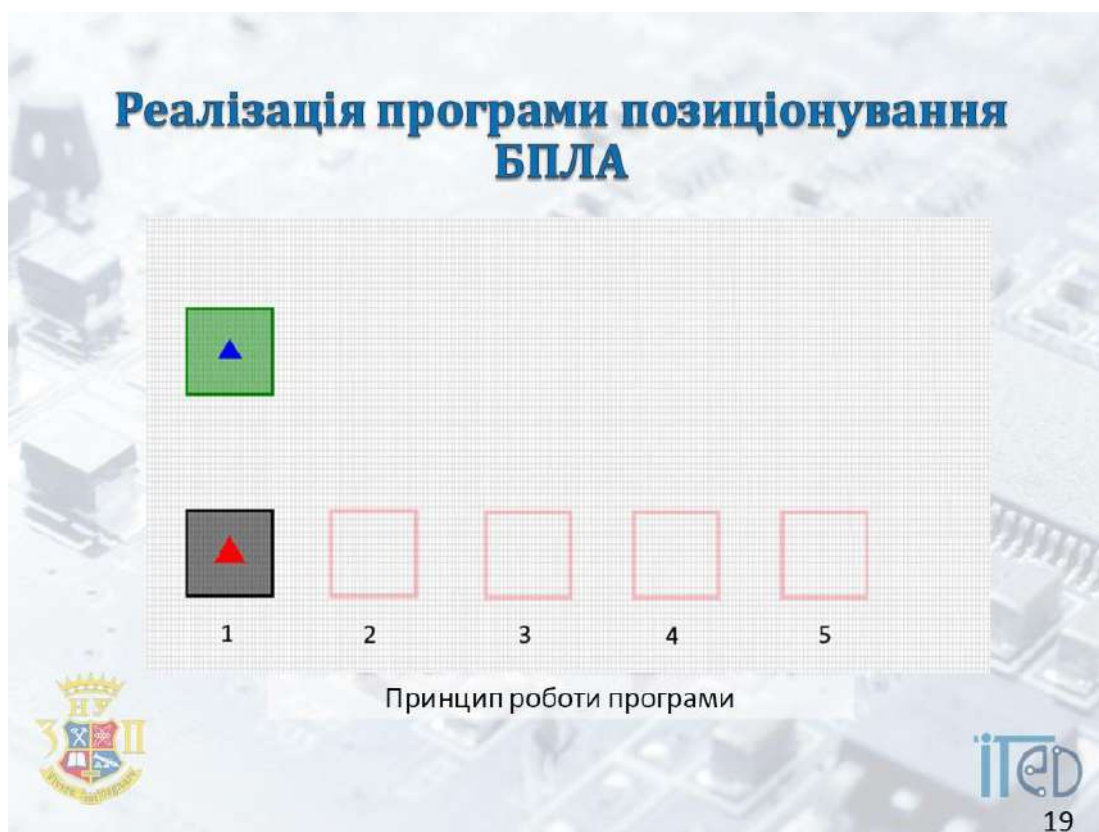


Рисунок Г.19 – Реалізація програми позиціонування БПЛА

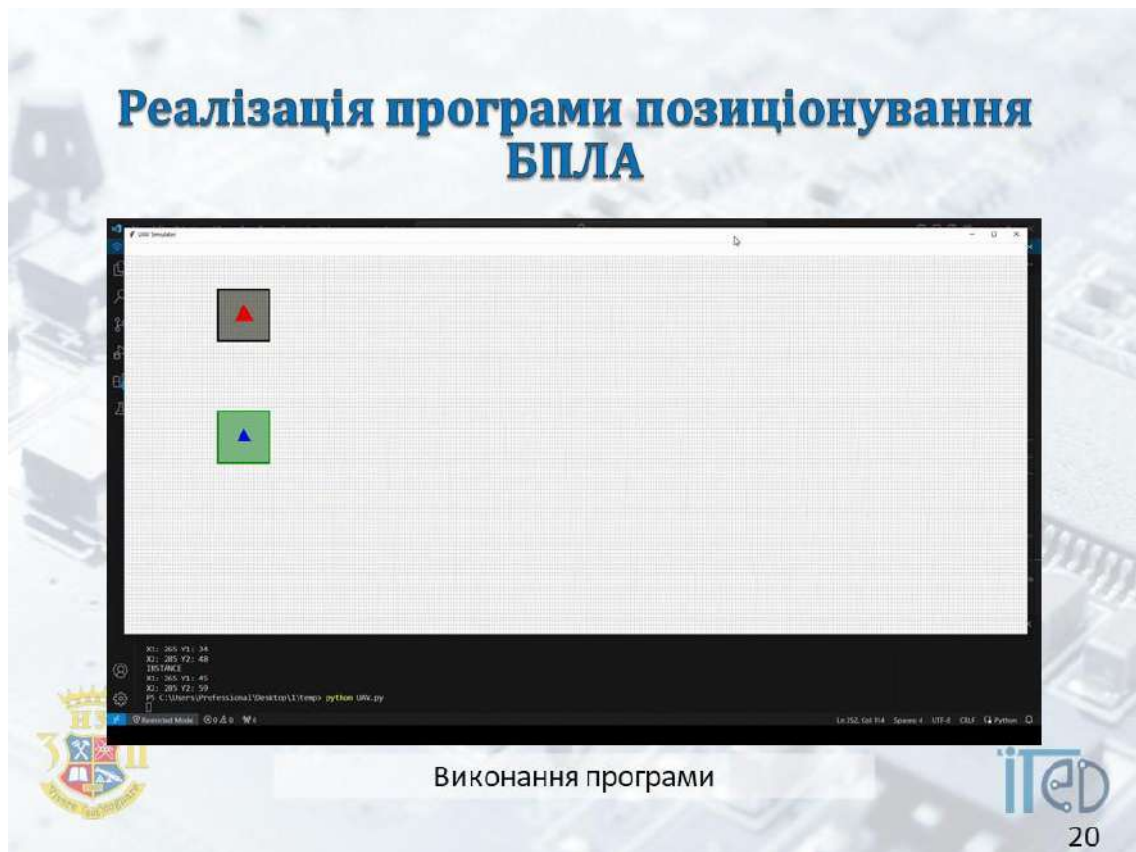


Рисунок Г.20 – Реалізація програми позиціонування БПЛА



Рисунок Г.21 – Висновки