

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

**Радіотехнічний факультет  
Теоретичних основ радіотехніки**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Федір ДУБРОВКА  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-науковою програмою «Радіосистемна інженерія»**

**зі спеціальності 172 «Телекомунікація та радіотехніка»**

**на тему: «Алгоритм обробки сигналів у радарних системах виявлення  
зброї на тілі людини»**

Виконав:

студент VI курсу, групи РС-81мн

Серга Андрій Вадимович \_\_\_\_\_

Керівник:

проф., д.т.н.

Дубровка Федір Федорович \_\_\_\_\_

Консультант з охорони праці:

доцент, к.т.н.

Каштанов Сергій Федорович \_\_\_\_\_

Рецензент:

проф., д.т.н.

Жук Сергій Якович \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

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

Радіотехнічний факультет  
Теоретичних основ радіотехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)  
Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка  
Освітньо-наукова програма – Радіосистемна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Федір ДУБРОВКА

«  » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Серга Андрію Вадимовичу**

1. Тема дисертації

Алгоритм обробки сигналів у радарних системах  
виявлення зброї на тлі людини  
науковий керівник дисертації проф., д.т.н. Дубровка Федір Федорович,  
затверджені наказом по університету від «  » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження є процес обробки сигналів у радарних  
системах

4. Предмет дослідження

особливості алгоритму обробки сигналів у радарних  
системах виявлення зброї на тлі людини

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

Аналітичний огляд функціонування радарної системи  
виявлення зброї, дослідження методів отримання зображення  
з ЧВВ радарів, розробка алгоритму виявлення зброї  
на тлі людини



6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каштанов С.Ф., к.т.н., доц.		


9. Дата видачі завдання 14 жовтня 2019 року


Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Опиту функціонування радарних систем виявлення зброї	3.02 - 24.02	
	Опис методів формування зображень з ЧВВ радарів	24.02 - 9.03	
	Опис методів аналізу зображень.	9.03 - 30.03	
	Аналіз методів виявлення об'єктів	30.03 - 13.04	
	Розробка алгоритму виявлення зброї	13.04 - 29.04	
	Охорона праці	29.04 - 11.05	

Студент

Науковий керівник

 Андрій СЕРГА

 Федір ДУБРОВКА

\* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему "Алгоритм обробки сигналів у радарних системах виявлення зброї на тілі людини" складається з 3 розділів і має обсяг 76 сторінок, 23 ілюстрації.

**Ключові слова:** радарна система виявлення зброї, обробка сигналів, алгоритм.

**Актуальність теми** зумовлена інтенсивним розвитком радіолокаційних систем виявлення зброї на тілі людини з метою забезпечення безпеки людей у цивільних громадських місцях.

**Метою роботи** є дослідження та розробка алгоритму обробки сигналів та отримання зображення у просторі для виявлення зброї на тілі людини.

Для досягнення поставленої мети у дисертації виконано:

- Аналітичний огляд функціонування радарної системи виявлення зброї
- Дослідження можливих методів отримання зображення з UWB радарів
- Аналітичну розробку алгоритму для виявлення зброї

**Об'єктом дослідження** є процес обробки сигналів у радарних системах.

**Предметом дослідження** є особливості алгоритму обробки сигналів у радарних системах виявлення зброї на тілі людини.

**Методами дослідження** є методи математичного аналізу, математичної статистики, методи комп'ютерного моделювання.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у створенні оригінального алгоритму обробки даних у радарній системі для виявлення прихованої зброї, особливістю якої є двоетапна обробка двовимірного та тривимірного зображення області сканування.

**Практичне значення** полягає у можливості використання розробленого алгоритму для створення ефективної радарної системи виявлення зброї на тілі людини.

# **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**до магістерської дисертації**

на тему: «Алгоритм обробки сигналів у радарних системах  
виявлення зброї на тілі людини»

Київ 2020 року

# ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	5
ВСТУП .....	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РАДАРНОЇ СИСТЕМИ .....	9
1.1 Класифікація UWB радарів .....	9
1.2 Огляд НВЧ технологій відображення .....	10
1.2.1 Виявлення прихованої зброї (CWD) .....	10
1.2.2 Перегляд через стіни (TWI) .....	11
1.2.3 Радар підземної поверхні .....	12
1.3 Основні відомості з радіолокації .....	13
1.4 Точність дальності та роздільна здатність по відстані та куту системи..	16
1.5 Метод вимірювання в частотній та часовій областях.....	19
1.6 Модель збору та формування даних.....	21
1.7 Модель сигналу.....	24
1.8 Методи формування зображення .....	26
1.8.1 Метод затримки і суми .....	26
1.8.2 Метод з оберненням в часі сигналу .....	29
2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЯВЛЕННЯ ЗБРОЇ .....	32
2.1 Опис та принцип роботи алгоритму .....	32
2.1.1 Принцип роботи .....	32
2.1.2 Загальна структура алгоритму виявлення .....	32
2.1.3 Опис алгоритму .....	34
2.2 Етап формування зображення .....	38

2.3	Етап статистичного аналізу зображення для тривимірного зображення.	41
2.4	Етап виявлення потенційно можливих зон знаходження зброї.....	44
2.5	Етап виявлення образів .....	47
2.6	Алгоритм аналізу та порівняння з еталонними моделями зображення...	52
3	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	56
3.1	Визначення основних потенційно небезпечних і шкідливих виробничих чинників при виконанні науково-дослідної роботи .....	56
3.2	Технічні рішення та організаційні заходи безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії.....	57
3.2.1	Вимоги щодо створення комфортних та безпечних умов праці при використанні ВДТ .....	57
3.2.2	Іонний склад повітря.....	60
3.2.3	Мікроклімат робочої зони .....	61
3.3	Вимоги з електробезпеки під час експлуатації ВДТ ПЕОМ.....	62
3.3.1	Вимоги до організації робочого місця та безпеки праці користувача ВДТ ПЕОМ .....	66
3.4	Безпека у надзвичайних ситуаціях.....	69
3.4.1	Вимоги щодо організації ефективної роботи системи оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації .....	69
3.4.2	Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС.....	70
3.4.3	Пожежна безпека.....	71
	ВИСНОВОК.....	73
	ЛІТЕРАТУРА .....	74

## **СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ**

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ГС – генератор сигналів

НВЧ – надвисокочастотний

ППЧ – підсилювач проміжної частоти

ПРЧ – підсилювач радіочастоти

ПЧ – перетворювач частоти

УФ – ультрафіолетовий

ФПЧ – фільтр проміжної частоти

SAR – Synthetic Aperture Radar

SIFT – Scale Invariant Feature Transform

MIMO – Multiple Input Multiple Output

RAR – Real Aperture Radar

UWB – Ultra-Wide Band



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Розвиток безпечних, надійних та економічно ефективних технологій візуалізації користується великим попитом у цивільній сфері. Існує багато систем для моніторингу різноманітних даних:

- траєкторія руху людей у супермаркеті;
- огляд речей пасажирів в аеропортах;
- виявлення прихованої зброї на тілі людини тощо.

В роботі розглядаються способи реалізації алгоритм обробки даних від зондувальної радарної системи для виявлення зброї на тілі людини у великих скупченнях людей (у аеропортах, на площах тощо).

За допомогою зондування можна отримати зображення різними методами: акустичними полем, електромагнітним полем (від радіо-хвилі до гамма-випромінювання) тощо. Використовуючи декілька областей з різними робочими частотами в спектрі електромагнітного(ЕМ) поля можна отримати різні варіанти інформації про досліджуваний об'єкт.

Щоб отримати зображення через оптично непрозорі матеріали, слід враховувати частоти вище ультрафіолетової (УФ) області ( $> 3 \cdot 10^{17}$  Гц) або нижче області поглинання інфрачервоного діапазону ( $< 10^{12}$  Гц). Таким чином, можна класифікувати методи виявлення, як Х-променевий метод та радіочастотний метод відповідно. Ці два методи хоч і суттєво відрізняються один від одного, але використовуються у багатьох сферах в залежності від необхідної отримуваної інформації.

Система візуалізації, що використовує мікрохвильову енергію, повинна мати спектр, здатний пройти через бар'єр та не бути шкідливим для здоров'я

людини. В цілому принцип роботи подібний до звичайної активної радіолокації. Площина опромінюється мікрохвильовими передавачами, потім відбите або розсіяне поле перехоплюється та збирається приймаючими – антенами. Система повинна обробити отримані відлуння(сигнали, що відбилися) перетворюючи спостережуване хвильове поле в карту коефіцієнтів електромагнітного розсіювання сканованої площини. Такий процес формування променів у деякій мірі аналогічний об'єктиву фотокамери. Мікрохвильовий передавач виконує ту ж роль, що і сонячні промені в оптичній фотографії, підсвічує об'єкти дослідження. Технологія надширокосмугового сканування (UWB) базується на передачі короткотривалих імпульсів дуже малої потужності у широкому діапазоні частот, а не на сигналах гармонічної форми. Досліджуючи відбитий сигнал можна дослідити об'єкт, оскільки широкосмуговий UWB-сигнал має дуже високу проникаючу здатність навіть при малій потужності. Звичайні приймачі сприймають такий сигнал як слабкий шум, таким чином такі системи можуть працювати навіть у спектрі де вже працюють інші засоби радіопередачі. Також короткотривалі імпульси UWB досить стійкі до багатопроменевого затухання, яке виникає при відбитті хвилі від стін, стелі, будівель та інших.

Проектування систем візуалізації для застосувань безпеки є складним завданням, яке вимагає виконання запитів, які часто йдуть у протилежному напрямку. Головною проблемою в цій галузі є розробка систем візуалізації, які є надійними, безпечними та економічно ефективними без будь-яких проблем з конфіденційністю.

Принципово, проектування повної системи зображень – це міждисциплінарна задача, яку можна розділити на чотири основні частини:

- антенна система, яка повинна мати низькі бічні пелюстки (зондуючий промінь);

- фронтальний радіолокаційний апарат, який повинен забезпечувати високу роздільну здатність, високий динамічний діапазон і співвідношення сигнал/шум для виявлення сильних і слабких сигналів;
- радіолокаційний апарат, який повинен забезпечити швидку та ефективну стадію обробки сигналів та зображення;
- система управління із завданням подавати правильні сигнали для керування джерелом та комутаторами;

**Опис:** в рамках даної роботи планується дослідити та спроектувати лише алгоритм для забезпечення швидкої та ефективної обробки сигналів та отримуваних зображень з метою виявлення прихованої зброї на тілі людини.

В роботі було вирішено наступні завдання:

1. Огляд НВЧ технологій відображення;
2. Досліджено принцип побудови UWB радіолокаційних систем;
3. Досліджено методи відновлення зображень;
4. Сформовано структуру алгоритму виявлення зброї;

**Методами дослідження** є методи математичного аналізу, математичної статистики, методи комп'ютерного моделювання.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у створенні оригінального алгоритму обробки даних у радарній системі для виявлення прихованої зброї, особливістю якої є двоетапна обробка двовимірного та тривимірного зображення області сканування.

**Практичне значення** полягає у можливості використання розробленого алгоритму для створення ефективної радарної системи виявлення зброї на тілі людини.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РАДАРНОЇ СИСТЕМИ

## 1.1 Класифікація UWB радарів

Радіолокаційна система UWB генерує та передає дуже короткий імпульс (як правило, тривалість наносекунди та менше) через передавальну антену. Сигнал рухається у вільному просторі зі швидкістю світла. Коли вона досягає цілі, частина сигналу відбивається від об'єкта і повертається до приймальної антени. Затримка в часі між переданим і прийнятим сигналом представляє відстань між антенами і ціллю. Виходячи з відстані (дальності), радары UWB можна класифікувати на два типи: РЛС короткої дальності та РЛС далекої дальності. Останній використовується в основному для цілей спостереження, таких як радіолокаційний апарат над горизонтом та радіолокаційний апарат дистанційного зондування. На відміну від цього, радіолокатор короткої дальності має більш комерційне та промислове застосування. Класифікація радіолокаційних систем UWB наведена на Рис. 1.1.

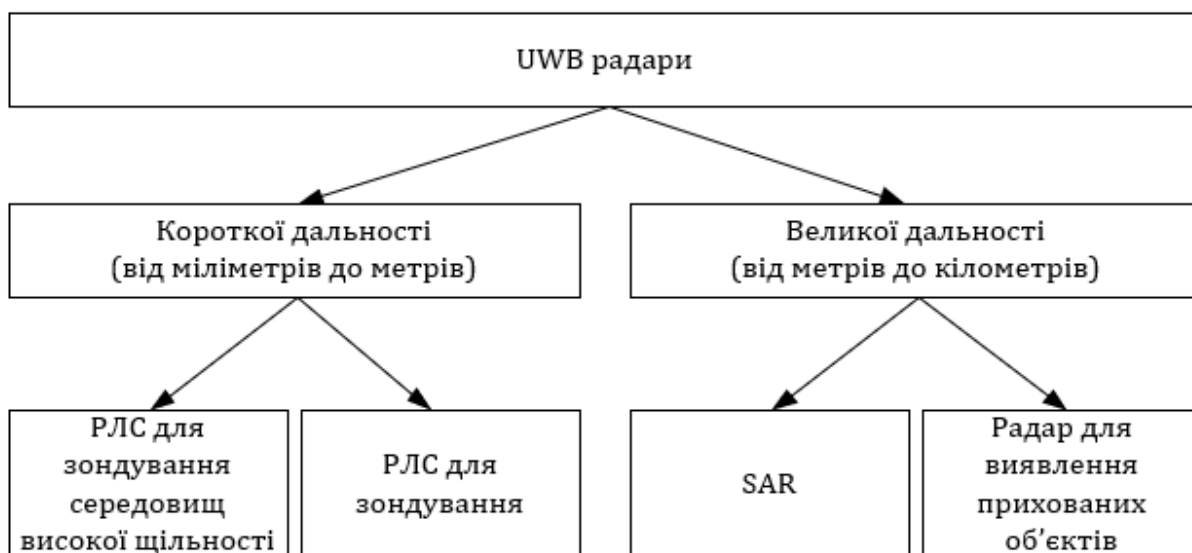


Рис. 1.1 Класифікація UWB радарів

## **1.2 Огляд НВЧ технологій відображення**

### **1.2.1 Виявлення прихованої зброї (CWD)**

Багато останніх подій показують, що нинішньої системи безпеки недостатньо для боротьби зі зростаючою кількістю тероризму та злочинності. Існує багато систем відображення для виявлення як металевих, так і неметалічних матеріалів, захованих під одягом або всередині багажу. Деякі технології вже використовуються у програмах скринінгу та спостереження.

Більшість систем НВЧ-відображення, орієнтованих на виявлення прихованої зброї, базуються на міліметровій хвилі(НВЧ). Історія міліметрової хвилі почалася в 1890-х роках [1]. Одним із основних застосувань є системи відображення для спостереження за безпекою. НВЧ – електромагнітна хвиля з довжиною хвилі від 10 мм до 1 мм (30 до 300 ГГц). У області передачі НВЧ хвиля послаблюється в атмосфері, зумовлено це водяною парою та киснем. Деякі регіони низького загасання, які називаються «атмосферні вікна», існують близько 35, 94, 140 та 220 ГГц. Система візуалізації на основі ММВ бувають двох типів: пасивна та активна. Системи пасивної міліметрової хвилі спостерігають і формують зображення за допомогою пасивного виявлення природного випромінювання міліметрової хвилі. Пасивні датчики мають перевагу створювати зображення без випромінювання ЕМ-випромінювача. Представницькі приклади такої системи можна знайти в [2, 3, 4, 5]. Зображення прихованої зброї пасивно практично неможливо оскільки зброя не є активним джерелом СВЧ випромінення. На відміну від систем пасивного виявлення, в активних системах освітлюють середовище електромагнітними хвилями за допомогою одиничних або розподілених передавачів. Оскільки передані

сигнали мають відомі властивості, така система здатна отримувати слабкі цільові реакції з конкуруючих джерел шуму. Приклади розроблених активних систем НВЧ можна знайти в [6, 7, 8, 9].

### ***1.2.2 Перегляд через стіни (TWI)***

Для задач "перегляду" через перешкоди, такі як стіни, двері та інші візуально непрозорі матеріали, використання мікрохвильових сигналів пропонує потужні інструменти для різних застосувань. Настінне зображення вкрай бажано для поліції, пожеж та рятувальних служб та військових застосувань. Кінцевим бажанням такої системи є надання детальної інформації для визначення плану будівель, де можуть перебувати мешканці, та навіть виявлення об'єктів всередині будівель.

Більшість існуючих систем TWI засновані на технології НВЧ. Одним з найбільш відомих і широко розповсюджених радарів для виявлення людей за стіною на ринку, є імпульсний радар НВЧ під назвою RadarVision2, розроблений корпорацією Time Domain. Радіолокатор дає додаткову інформації щодо ситуації, показуючи розташування мешканців кімнати. Пристрій використовує надширокосмугові імпульси (2,1 - 5,6 ГГц) для проникнення через найбільш поширені будівельні матеріали та використовує масив з 22 антен. RadarVision2 забезпечує лише 2-D зображення цілей і не може класифікувати виявлені цілі (наприклад, між людиною і твариною, об'єктом з рухом і людиною). Компанія в Ізраїлі, Camero Inc, також бере участь у розробці радарів для програм безпеки. Розроблена в режимі реального часу система 3-D 'Through-Wall Vision' Xaver <sup>TM</sup> дозволяє спостерігати за кількома нерухомими та рухомими об'єктами, прихованими стінами. Головною особливістю цієї системи є її справжня 3-D функція візуалізації, яка забезпечує можливість спостерігати в режимі реального часу рух рухомих цілей за стінами та розрізняти різні типи



цілей. Система працює в широкій смузі частот від 3 до 10 ГГц і забезпечує максимальну робочу відстань 20 м. Він використовує 2-D масив, який забезпечує можливість тривимірного зображення до 8 м з роздільною здатністю менше 0,2 м. Технічні деталі цієї системи не публікуються і тому не є доступними для населення.

### ***1.2.3 Радар підземної поверхні***

Радар підземної поверхні – це геофізичне обладнання, яке використовує електромагнітну хвилю в діапазоні мікрохвильових частот для утворення зображення підземної поверхні. Було продемонстровано, що такий радар є корисним інструментом для виявлення мін та у сфері геофізики. У геологічних науках його використовують для вивчення ґрунтових порід, ґрунтів, підземних вод та льоду. В археології використовують для картографування археологічних особливостей та кладовищ. Радар підземної поверхні також широко застосовується у військових програмах для виявлення мін, боєприпасів та тунелів.

Звичайна радарна система сканування підземної поверхні використовує одну пару передавальну і приймальну антен або одну приймально-передавальну антену. Система сканує зону обстеження, щоб зібрати відбиті хвилі з підземної поверхні. Кілька систем, заснованих на такому принципі, були розроблені промисловістю і доступні на ринку. Щоб уникнути двовимірного механічного сканування на поверхні та пришвидшити обстеження ґрунту, було розроблено низку радарних системи на основі масиву [10, 11, 12]. У цих існуючих системах масив формується низкою паралельних приймачів. Механічне сканування у напрямку масиву замінюється послідовно однаковими парами передачі/прийому. Незважаючи на значне збільшення швидкості сканування порівняно зі звичайним 2-D механічним скануванням, цей підхід все ще

обмежує швидкість сканування до кількох кілометрів на годину. Більш досконалий підхід на основі масиву був реалізований у системі EFGPR, розробленій GeoCenters з США, де контрольовані затримки часу вводяться до окремих передавачів та приймачів, щоб активно фокусувати та зображати підповерхні. Передбачається, що подальший розвиток багатостатичного масиву в поєднанні з багатоканальним приймачем та цифровим формуванням променів є наступним технологічним кроком для подальшого збільшення швидкості сканування [13].

### 1.3 Основні відомості з радіолокації

Радіолокаційні системи з неперервно частотною модуляцією хвилі видає неперервний сигнал, який модулюється по частоті в деякій визначеній полосі частот. Основний принцип таких радіолокаторів полягає у вимірюванні зсуву фаз, викликаного часовою затримкою відбитого сигналу. Типова схема радару з неперервною частотною модуляцією зображено на Рис. 1.2, де ГЧ – генератор радіочастоти, ПРЧ – підсилювач радіочастоти, ЗЗ – зворотній зв'язок, ППЧ – підсилювач проміжної частоти, ФПЧ – фільтр проміжної частоти, АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

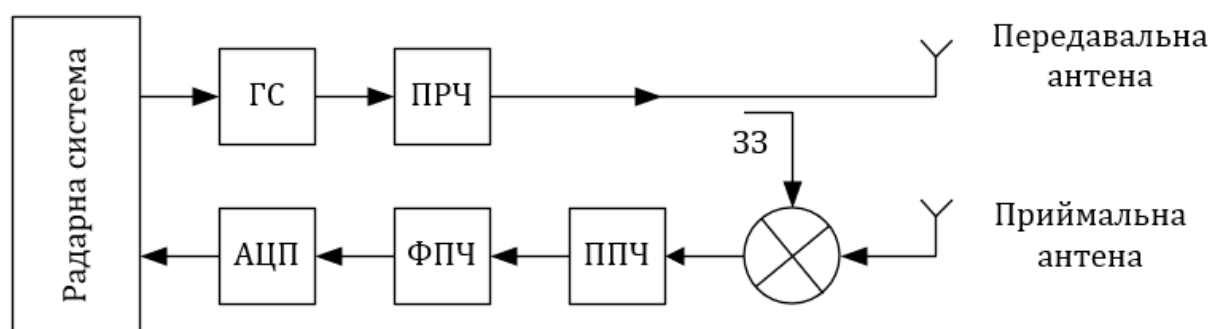


Рис. 1.2 Схема радару з використанням неперервної частотної модуляції

Передавальний сигнал визначається наступним чином:

$$s_{tx}(t) = A_{tx} \cos(2\pi f_0 t + 2\pi\varphi(t)),$$

де  $A_{tx}$  – амплітуда переданого сигналу,  $f_0$  – початкова частота,

$\varphi(t) = \frac{1}{2}kt^2$  – зміна фази, де  $k$  – ступінь модуляції.

Миттєву частоту передаваного сигналу можна отримати шляхом диференціювання миттєвої фази по часу:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d(2\pi f_0 t + \pi kt^2)}{dt} = f_0 + kt$$

Для локації використовують сигнал з наростаючою частотою, тривалість  $T$  якого визначається смугою частот  $B$ , а саме верхньою та нижньою частотою  $f_0$  та  $f_1$  відповідно. Ступінь модуляції  $k$  визначається наступним чином:

$$k = \frac{f_1 - f_0}{T} = \frac{B}{T}$$

Після передачі від передавальної антени переданий сигнал поширюється у просторі до цілі, його частина відбивається назад до радару. Таким чином ехо-сигнал представляє собою послаблену версію переданого сигналу, затриманий на час  $\tau$  – необхідний час для проходження сигналу в двосторонньому напрямку між ціллю та антеною:

$$\tau = \frac{2R}{c},$$

де  $R$  – відстань між антеною та ціллю. Прийнятий сигнал можна описати наступним чином:

$$s_{rx}(t) = A_{rx} \cos(2\pi f_0(t - \tau) + 2\pi\varphi(t - \tau)),$$

де  $A_{rx}$  – амплітуда прийнятого сигналу, з урахуванням втрат при поширенні хвилі та різні параметри роботи радару.

На етапі змішування прийнятий сигнал перемножується з опорним. В результаті чого отримуємо суми та різниці частотних складових. Сумарні складові мають порядок подвійної несущою частоти радару, їх можна відфільтрувати фільтром нижніх частот. Різницеві складові представляють різницю частот між переданим та прийнятим сигналом і прямо пов'язані з затримкою по часу через двосторонній шлях між радаром та ціллю. Сигнал різниці частотних складових також називають сигналом биття:

$$s_{beat}(t) = s_{tx}(t) \times s_{rx}(t) = A_{beat} \cos(2\pi f_0 t + 2\pi k t \tau - \pi k \tau^2)$$

Частота биття отримується шляхом диференціювання фази:

$$f_{beat} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d(2\pi f_0 t + 2\pi k t \tau - \pi k \tau^2)}{dt} = k \cdot \tau = \frac{B \cdot \tau}{T} = \frac{2R \cdot B}{c \cdot T}$$

### Рівняння радіолокації

Рівняння радіолокації вказує на корисні співвідношення для багатьох ключових факторів в радіолокаційних системах, таких як параметри цілі і системи, фонові ефекти, такі як завади та шуми і т.п. Припустивши, що максимальний діапазон виявлення для радіолокаційної системи рівний  $R$ , через рівняння радіолокації можна виразити як:

$$R^4 = \frac{P_A G_t G_r \sigma \lambda}{(4\pi)^2 k T B N_f L(SNR)}$$

де  $P_A$  – передана середня потужність,

$G_t$  – підсилення передавальної антени,

$G_r$  – підсилення приймальної антени,

$\sigma$  – поперечний переріз системи,

$kT$  – щільність потужності шуму,

$B$  – ефективна ширина полоси шуму,

$N_f$  – коефіцієнт шуму,

$L$  – втрати в системі

$SNR$  – мінімальне виявлене значення відношення сигнал/шум.

#### 1.4 Точність дальності та роздільна здатність по відстані та куту системи

Для надшироксмугової радіолокаційної системи точність визначення дальності, та роздільна здатність по дальності є дуже важливими параметрами для ідентифікації об'єктів.

Точність дальності представляє собою невизначеність при вимірюванні абсолютної відстані від радару до цілі. Роздільна здатність по дальності – це мінімальна відстань між двома цілями, щоб можна було відрізнити одну від іншої. В UWB радіолокаційних системах ці два фактори відіграють важливу роль при виявленні цілей.

Роздільна здатність по дальності відображає можливість радару розрізнити декілька цілей, як показано на . Коли часова затримка між відлуннями перевищує тривалість імпульсу  $t$ , вони розділяються як показано на Рис. 1.3(а), коли цілі стають ближче, до такого стану коли часова затримка коротше тривалості імпульсу, відлуння зливаються, це означає, що дві цілі не можна відрізнити, як показано на Рис. 1.3(б). Обмеженням часу розрізнення двох цілей

є часова затримка, аналогічна тривалості імпульсу, як показано на Рис. 1.3(с).

Роздільна здатність  $\Delta R = \frac{c\tau}{2}$ , де  $c$  – швидкість світла.

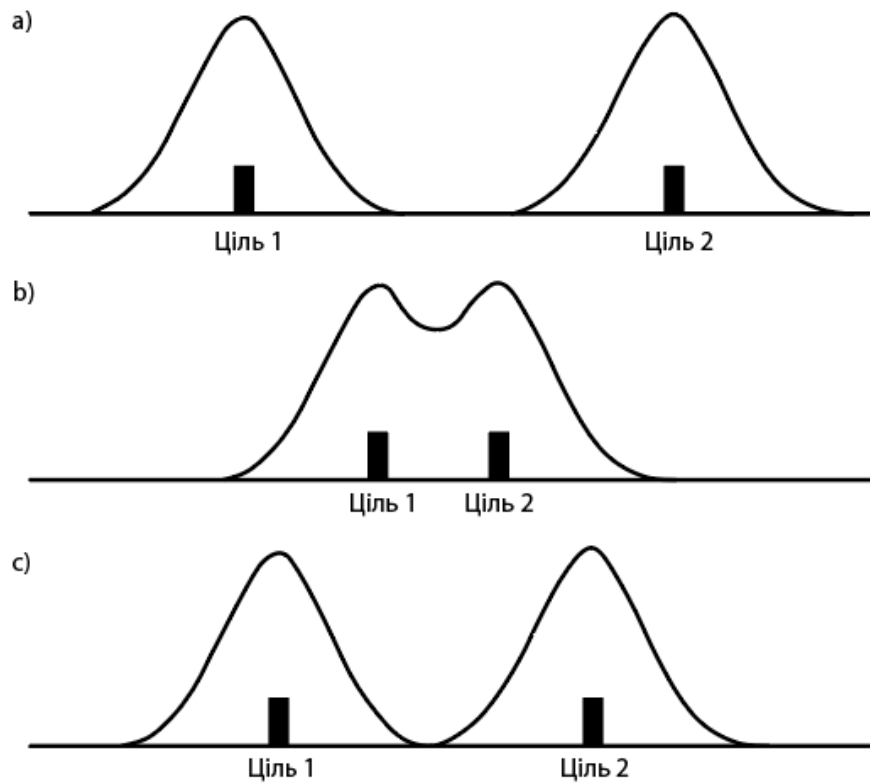


Рис. 1.3

Радіолокаційна система UWB має більш широкую пропускну здатність, меншу тривалість імпульсу та більшу роздільну здатність діапазону, ніж звичайні вузькосмугові радіолокаційні системи.

Роздільна здатність по куту є одним параметром для розрізнення декількох цілей розміщених горизонтально вздовж однієї лінії паралельно напрямку скануючого масиву антен. Його розрахунок базується на ширині променя антенної решітки, як показана на Рис. 1.4. Якщо припустити, що відстань від антени до цілі рівний  $R$ , ширина променя  $\theta$ , роздільна здатність по куту  $\delta$  визначається як:  $\delta = 2 \cdot R \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$ .



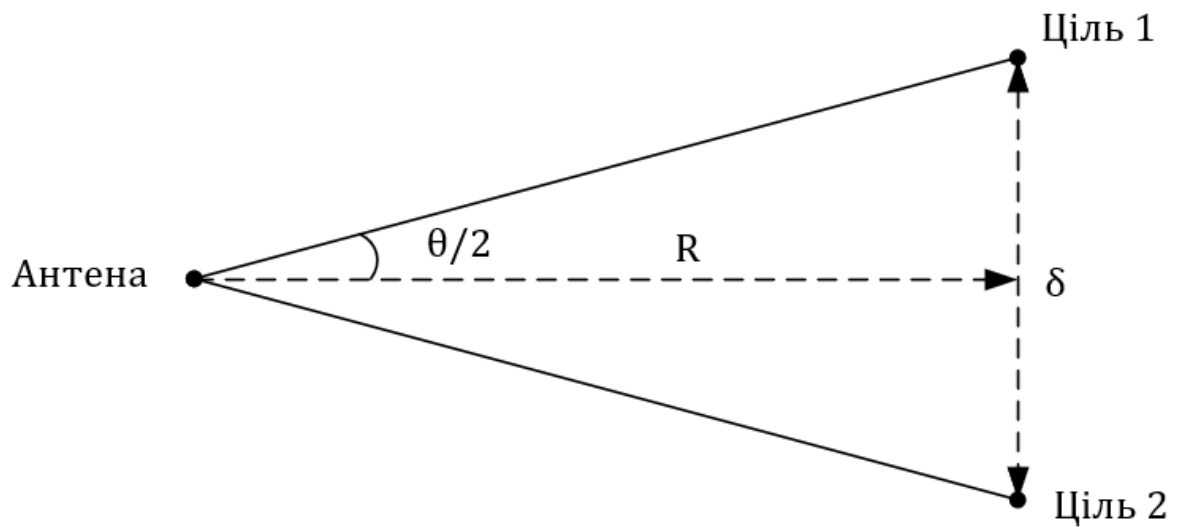


Рис. 1.4

Точність дальності залежить від ширини полоси радіолокаційної системи. На Рис. 1.5 (а) радар випромінює неперервну хвилю і вимірює фазу відлуння, щоб знайти положення цілі. Результат виявлення є неоднозначний та невизначений. Додаючи другий сигнал з іншою частотою можна отримати два неоднозначних варіанти знаходження цілі. Цей процес можна повторювати декілька разів. Перекриваючи всі три результати, можна уточнити істинне положення цілі. Таким чином при додаванні більшої кількості частот, невизначеність може бути усунена більш ефективно і положення цілі може бути визначене більш точно.

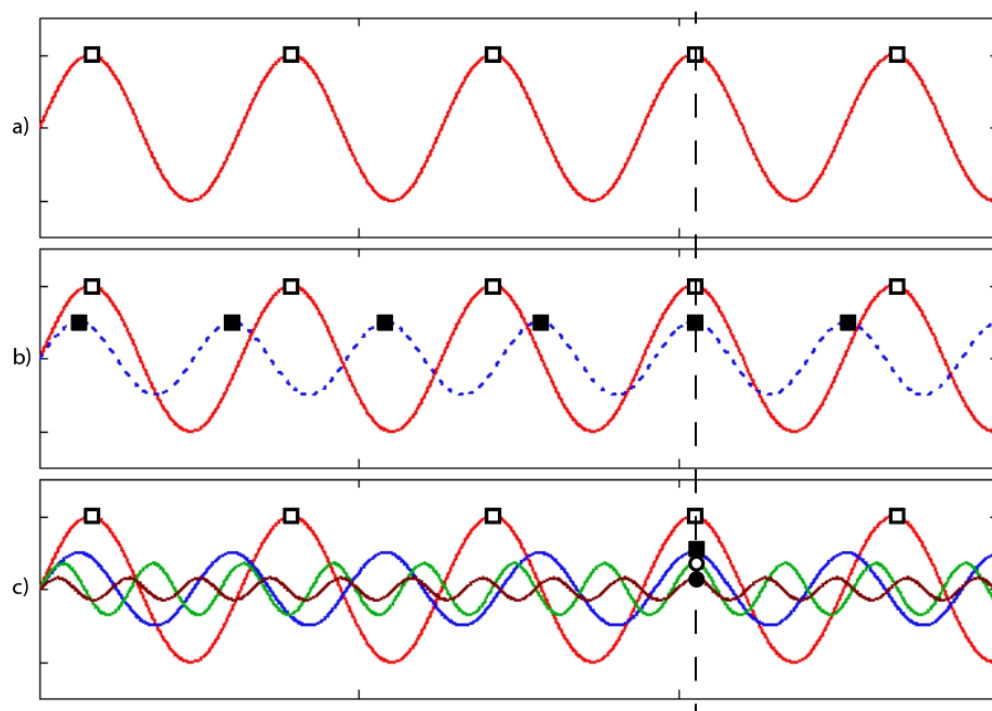


Рис. 1.5

## 1.5 Метод вимірювання в частотній та часовій областях

Метод вимірювання в частотній області має свої переваги, серед яких забезпечення більшим динамічним діапазоном. Його структура відносно легше і швидше збирається по відношенню до систем в часовій області. Оскільки виміри в частотній області виконуються в одній частотній точці на всьому частотному діапазоні, це призводить до високочастотному розрізненню і ймовірно високій роздільній здатності при формуванні зображення. Недоліком методу є досить тривалий час роботи та результат вимірювання можна проаналізувати лише за допомогою швидкого перетворення Фур'є у часовій області, що збільшує обчислювальні потреби та час обробки.

Однією з важливих проблем вимірювання у часовій області є синхронізація передачі прийому сигналу. Теоретично. Часова затримка внесена шляхом поширення радіохвиль, може бути розрахована і компенсована регулюванням

часової затримки між попереднім сигналом і затриманим сигналом. Іншою проблемою є калібрування, яке має виключати вплив неідеальних характеристик вимірювальних пристроїв.

Проведемо порівняльний аналіз в частотній та часовій областях:

Для розміру часового вікна  $T$  і кількості точок вибірки  $N$  інтервал вибірки буде рівний  $\tau = \frac{T}{N}$ , а точки вибірки  $t_k = k\tau$ , для  $k = 0, 1, \dots, (N - 1)$ , тоді сигнал в дискретній часовій області  $f_k = f(t_k)$ . Частота дискретизації  $\omega_n = \frac{2\pi n}{T}$ .

Для прикладу, припустимо, що імпульсний сигнал в часовій області має період 25 нс, його можна перетворити в діапазон виявлення 3.75 м:

$$D = \frac{25 \cdot 10^{-9} \cdot c}{2} = \frac{25 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \cdot 10^8}{2} = 7.5 \text{ м}$$

Припускаючи, що імпульсний сигнал дискретизується з інтервалом 100пс/вибірка(що складає  $10^{10}$  вибірок за секунду). Для діапазону виявлення 0.15 м пропускна здатність системи становить:

$$BW = \frac{0.15 \text{ м}}{100 \text{ пс/вибірка}} = 1.5 \text{ ГГц}$$

Для відтворення такої системи у частотній області, якщо припустити, що крок 5МГц, то отримаємо загальну кількість частотних точок  $\frac{1.5 \text{ ГГц}}{5 \text{ МГц}} = 300$ . Тому в частотній області недоцільно проектувати систему якій необхідна висока роздільна здатність.

Вибір метода вимірювання в частотній чи часовій областях в цілому залежить від цілі побудови радарної системи. Наразі система вимірювання часовій більш поширена в проектуванні такого роду РЛС.

## 1.6 Модель збору та формування даних

Для формування тривимірного зображення, антенна система UWB радарної системи повинна збирати данні в різних просторових точках в межах двовимірної апертури. Збір даних та подальша їх реконструкція зображення вимагає дискретизації зібраних даних, що у свою чергу мають відповідати критерію Найквіста.

Критерій Найквіста стверджує, що для запобігання небажаних пелюсток решітки в отриманих даних, які можуть сильно зменшити контрастність або динамічний діапазон для формування зображення, зсув фази від однієї просторової точки до наступної повинен бути меншим, ніж  $\pi$ . Необхідна просторова вибірка залежить від багатьох факторів, таких як розмір апертури та цілі, довжина хвилі та відстань до цілі. На практиці системи візуалізації використовують вибірку порядку  $\lambda/2$ .

Для широкосмугової системи критерій Найквіста має бути задоволений для меншої довжини хвилі всієї робочої смуги частот. Таким чином, визначивши робочу пропускну здатність та розміри апертури, за критерієм Найквіста можна визначити кількість просторових точок, в яких будуть збиратися данні, за формулою:

$$N = \left( \frac{2}{\lambda_{min}} (L_{az} + 1) \right) \cdot \left( \frac{2}{\lambda_{min}} (L_{el} + 1) \right),$$

де  $L_{az}$  та  $L_{el}$  – розміри апертури решітки в азимутальній та вертикальній площині відповідно,  $\lambda_{min}$  – довжина хвилі на найвищій частоті. Це число відноситься до кількості приймальних антен, передавальні антени можуть мати відмінну кількість антен.

Збір даних радіолокаційної системи на основі масиву може здійснюватися за двома основними підходами: реальним апертурним радаром (RAR) та синтетичним апертурним радаром (SAR).

Підхід RAR використовує плоску антенну решітку, розмір якої визначає розмір двовимірної апертури. Щоб задовольнити критерій Найквіста, приймальний елемент повинен бути розміщений в кожній точці просторової вибірки в межах апертури, що теоретично робить можливим створення тривимірного зображення в режимі реального часу при одночасній роботі всіх елементів масиву. З іншого боку, цей метод має фізичні обмеження, такі як обмежений розмір апертури та, як правило, велика кількість елементів масиву, що часто призводить до великих витрат і проблем з виготовленням. Крім того, одночасна робота всіх елементів масиву створює величезну кількість даних, які було б важко обробляти та проводити операції в режимі реального часу.

Інший підхід SAR допомагає зменшити витрати за рахунок більш тривалого часу збору даних. Типовий SAR використовує одну пару антен передачі-прийому, яка механічно сканує просторові точки для збору даних. Таким чином, SAR дозволяє синтезувати великі 2-D апертури, не вимагаючи великої кількості елементів решітки, як для RAR-підходу. Це призводить до зниження вартості антенного решітки і вимагає лише одноканального приймача, що також робить дешевшою систему. З іншого боку, у цьому методі зазвичай використовуються механічні сканери для покриття всієї двовимірної апертури, що призводить до набагато більшого часу збору даних, ніж RAR, що робить його недоцільним для проведення операцій у режимі реального часу. Крім того, процедура сканування може спричинити помилки в позиціонуванні радара щодо цілі, якщо використовується не дуже точний сканер. Помилки позиціонування

врешті-решт призводять до спотворень зображення, які можуть бути більшими, ніж спотворення, спричинені нелінійностями радіолокаційної електроніки.

Хорошим компромісом між низькою вартістю та швидким часом збору даних полягає в гібридному підході RAR-SAR, який реалізується заміною механічного сканування в одному напрямку – лінійним масивом. Масив, як правило, складається з однакових елементарних випромінювачів, а різні пари антен послідовно використовуються в якості передавальних та приймальних антен. Такий підхід вимагає значно меншої кількості елементів масиву порівняно з RAR, при цьому досягається більш швидке отримання даних відносно SAR за рахунок одновимірного сканування.

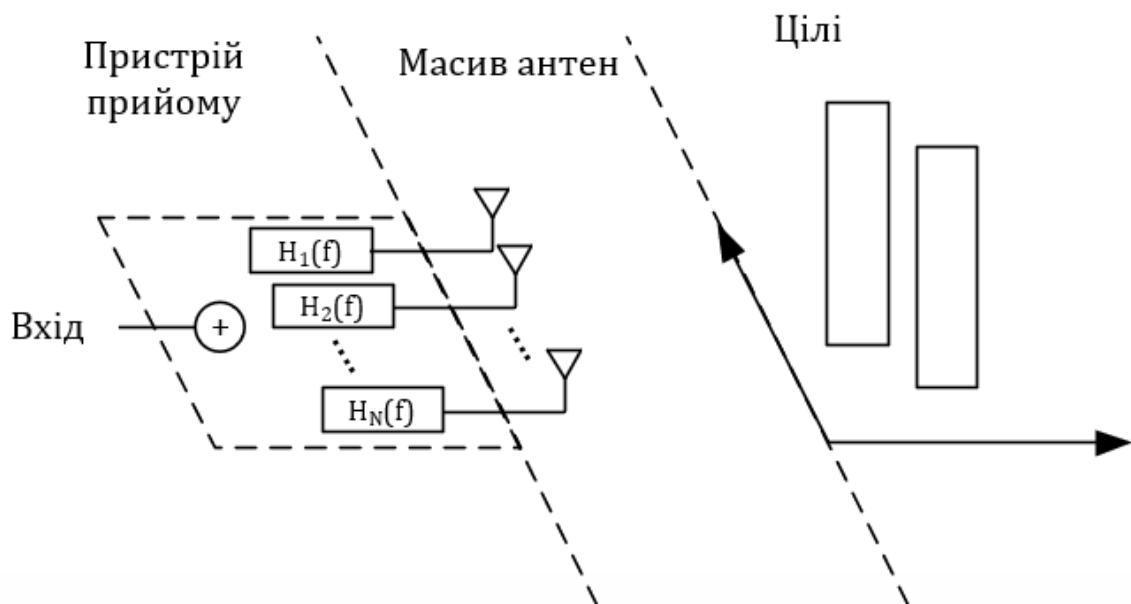


Рис. 1.6 Схема антенної системи для сканування цілей

Хорошим методом зменшення кількості антен є підхід із множинним входами та множинними виходами (MIMO), який дозволяє отримувати діаграму направленості ближнього поля, схожу з діаграмою направленості плоскої решітки. Загальна кількість антен буде мінімальна, якщо обрати однакову



кількість елементів прийому-передачі в решітці. Для широкосмугової системи кількість необхідних просторових елементів складає:

$$N_{MIMO} = \left( \frac{2}{\lambda_{min}} (L_{az} + 1) \right) + \left( \frac{2}{\lambda_{min}} (L_{el} + 1) \right)$$

При плоскій апертурі  $L_{az} = 1\text{м}$ ,  $L_{el} = 1\text{м}$  та смугою частот 10-20 ГГц,

MIMO масив складатиметься з  $134 + 134 = 268$  елементів.

Таким чином можна синтезувати великі та щільні решітки, тоді як реальна діафрагма антени та інтервали між елементами можуть бути меншими та більш грубими. Крім того, використовуючи просторово розподілених приймачів/передавачів, радіолокатори MIMO можуть використовувати різність освітлення та розсіювання цілі, скануючи ціль з різних кутів, тим самим покращуючи можливості виявлення. Переваги антенних масивів MIMO продемонстровані в роботах [1, 2].

## 1.7 Модель сигналу

В системі формування зображення MIMO-SAR лінійна MIMO решітка розташована вертикально відносно напрямку сканування. Вигляд розрізної геометрії MIMO-SAR показано на Рис. 1.7. Широкосмугова лінійна платформа приймачів-передавачів MIMO(паралельно осі  $x$ ) рухається вздовж напрямку синтетичної апертури (паралельно осі  $y$ ).

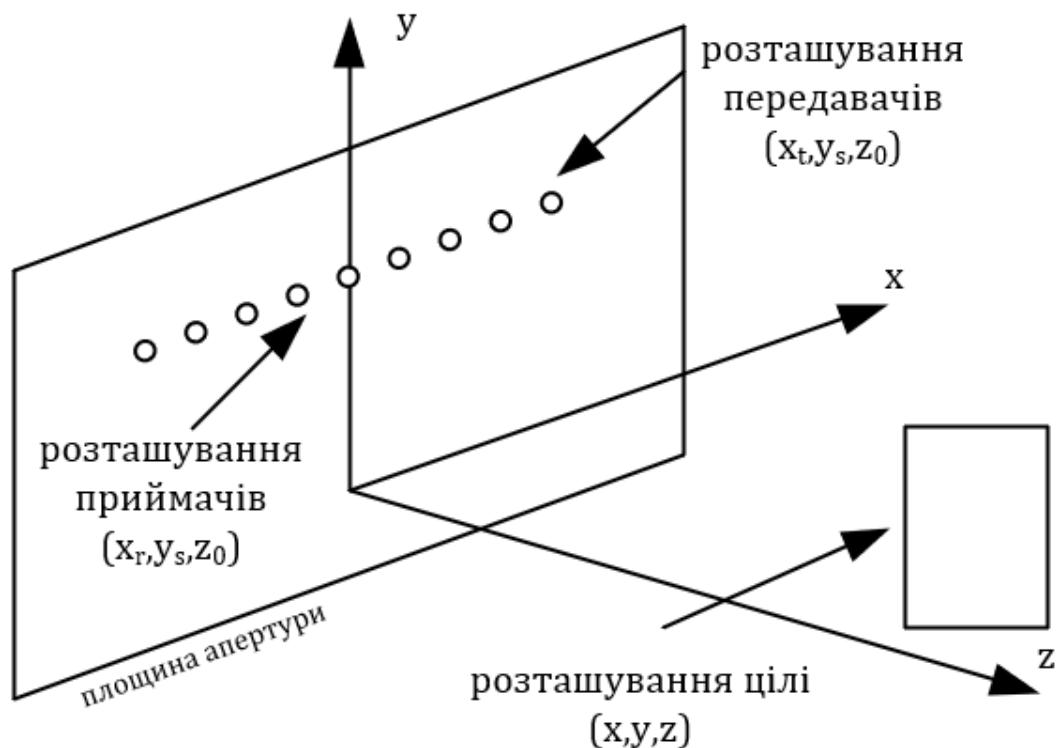


Рис. 1.7

Антени вважаються повністю ізотропними, а втрати відстані між ними нехтують. Мішень характеризується функцією відбиваючої здатності  $f(x, y, z)$ . Відгуком на певному передавачі та приймачі буде суперпозиція  $f(x, y, z)$ , помножена на фазу подвійної відстані до цієї точки.

$$s(x_t, x_r, y_s, k) = \iiint f(x, y, z) \cdot e^{-jk(d_t - d_r)} dx dy dz$$

де  $k = \frac{2\pi f}{c}$  – хвильове число,  $f$  – частота носійної,  $c = 3 \cdot 10^8$  м – швидкість

світла. Загальна точка знаходиться в положенні –  $(x, y, z)$ , передавач в

положенні –  $(x_t, y_s, z_0)$ , приймач в положенні –  $(x_r, y_s, z_0)$ .  $d_t$  і  $d_r$  – відстані між

ціллю та передавачем і приймачем відповідно:

$$d_t = \sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_o)^2}$$

$$d_r = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_o)^2}$$

## 1.8 Методи формування зображення

### 1.8.1 Метод затримки і суми

Основу метода затримки та суми можна описати наступним чином: передавальна хвиля падає на масив елементів під певним кутом падіння, кожен елемент записує дані з деякою часовою затримкою в зв'язку з різним шляхом поширення хвилі, записи з часовою затримкою зважуються з різними часовими параметрами, щоб скласти сфокусований сигнал.

Існує два методи обрахунку, в залежності від діапазону виявлення. Коли ціль знаходиться в дальній зоні поширення хвиль, відбиті хвилі від цілі можна розглядати як плоскі хвилі. Це припущення може спростити обрахунки. Як показано на , всі вхідні сигнали досягають антен одночасно під кутом падіння  $\theta$ , для корегування сигналів додають корегуючі коефіцієнти.

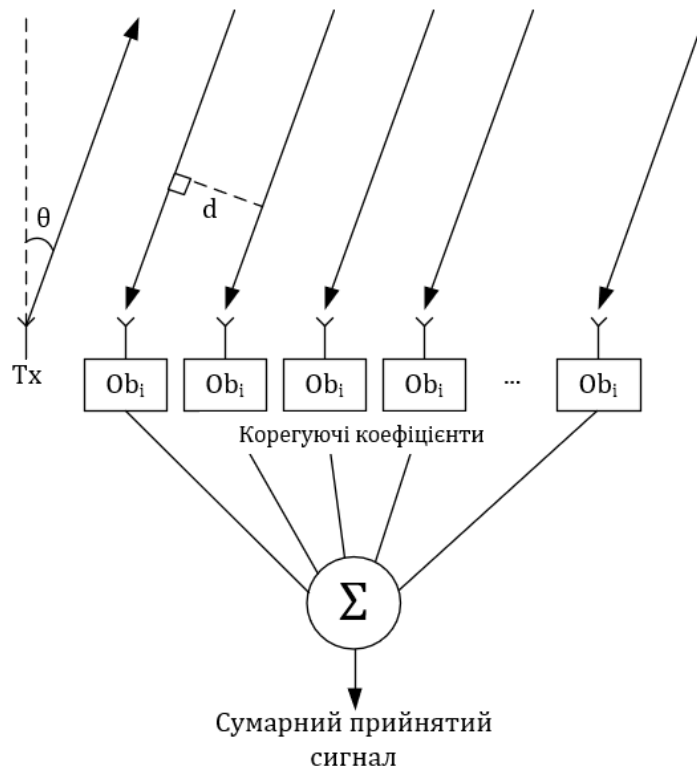


Рис. 1.8

Прийнятий комплексний сигнал складається з двох складових: синфазної та квадратурної. Комплексний прийнятий сигнал на  $i$ -ій антені має вигляд:

$$S_i(n) = S_{\text{inphase}_i}(n) + S_{\text{quadrature}_i}(n),$$

де  $n$  – номер антени, що відноситься до рівня певного пікселя скануючої області. Інтенсивність конкретного пікселя зображення можна записати як:

$$P_i(n) = \sum_{n=1}^N Ob_i \cdot S_i(n) e^{j\psi_i},$$

де  $N$  – загальна кількість приймальних антен,  $Ob_i$  – корегуючий коефіцієнт, що компенсує ослаблення, втрати та затримку сигналу, для плоских хвиль вважається однаковий на всіх каналах,  $\psi_i$  – фазовий фактор:

$$\psi_i = \pm(n - 1) \cdot d \cdot \sin(\theta)$$

Але якщо ціль знаходиться в ближньому полі, виведені вище визначення стають недійсними, оскільки приймаючі сигнали вже не можуть розглядатися, як плоскі хвилі. Різницю в відстанях поширення неможливо нехтувати і кожен канал має свій внесок у підсумовування сигналу: корегуючий коефіцієнт  $Ob_i$  стає різним для всіх антен і пов'язаний з кутами падіння та кутами заломлення під час поширення. Фазовий фактор також потребує корекції і також пов'язаний з довжиною шляху поширення та кутами падіння.

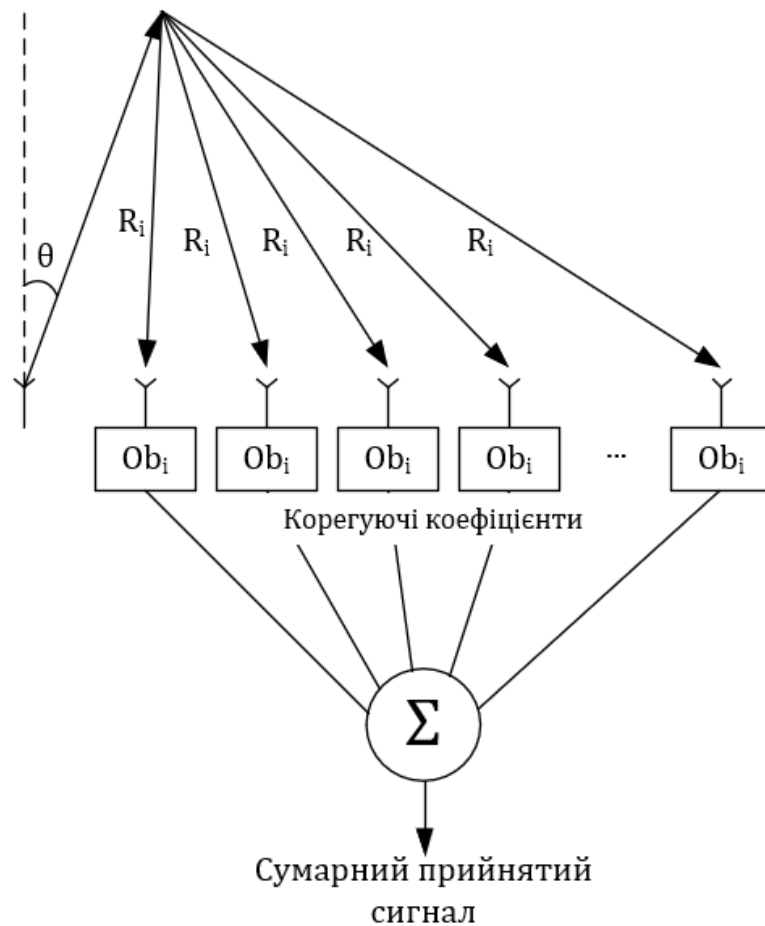


Рис. 1.9

### ***1.8.2 Метод з оберненням в часі сигналу***

Метод "Time-Reversal" (TR) інвертує отримані сигнали у часовій послідовності і повторно передає їх. Перший вхідний сигнал буде останім для повторної передачі. Обернений сигнал у часовій області еквівалентний фазовому спряженню сигналу у частотній області. Особливість метода полягає в його можливості фокусуватися одночасно у часі та просторі [15]. Часове фокусування дає можливість максимально концентрувати енергію обернених в часі сигналів одночасно від приймачів. Це особливо корисно для неоднорідних та складних середовищах, де поширенню сигналу заважають сигнали багатопроменевого поширення. Просторове фокусування означає, що обернені в часі сигнали можуть самостійно адаптуватися та прослідковувати місцезнаходження джерела, незалежно від того активний він чи пасивний. Теоретично обидва фокуса не потребують інформації про середовище поширення, при умові що воно не залежить від часу або має незначні зміни протягом періоду розрахунку.

Ідеалізований порядок дій наступний:

Крок 1: точкове джерело генерує фронт хвилі і випромінює назовні, хвиля спотворюється незмінною у часі неоднорідністю. Спотворене поле реєструється антенними елементами.

Крок 2: записані сигнали обертаються по часу і повторно випромінюються цими елементами. Обернене в часі поле поширюється і фокусується на джерелі освітлення.

У вільному просторі ефективна апертура решітки визначається типом антени і конфігурацією решітки. Моделювання у вільному просторі можна описати наступною процедурою:

1. Короткий UWB імпульс передається однією з антен в напрямку цілі.

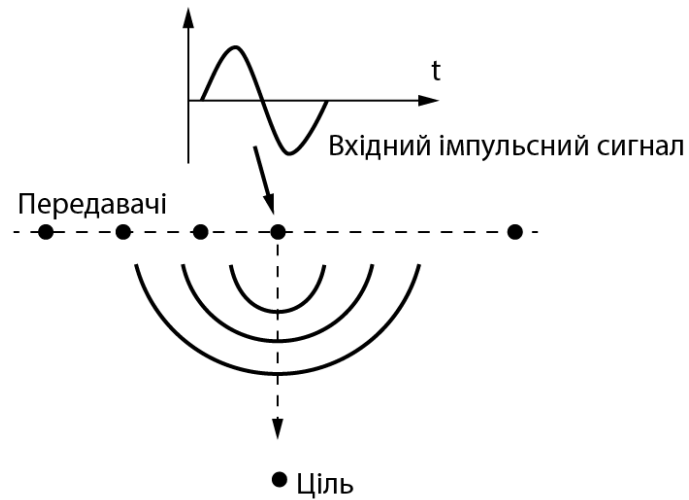


Рис. 1.10

2. Переданий сигнал поширюється в середовищі і відбивається від цілі, як показано на Рис. 1.11. прийнятий сигнал може містити не тільки цільовий відгук, але й інтерференції.

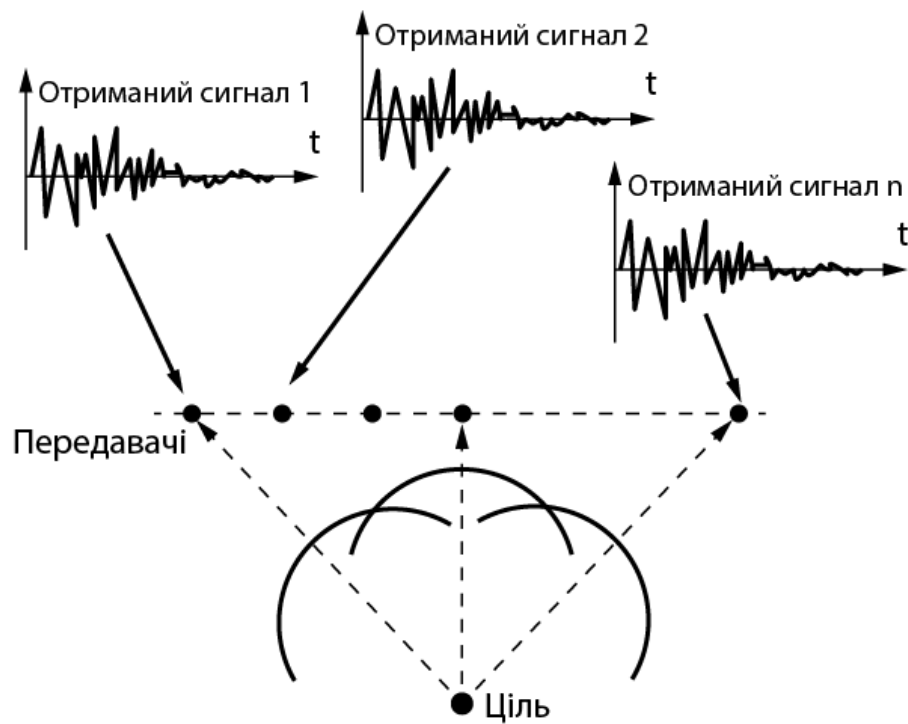


Рис. 1.11

3. За попередньо визначений період часу поширення отримані сигнали збираються та зберігаються до кінця прийому. Параметр часу відсікання використовують для припинення прийому в певний момент. Потім всі сигнали обрізаються і обертаються у часовій послідовності, як показано на Рис. 1.12

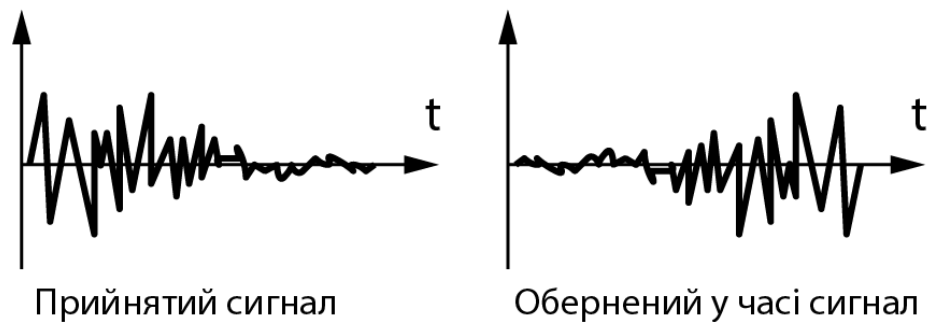


Рис. 1.12

4. Сигнали, обернені у часі, передаються назад в напрямку цілі.

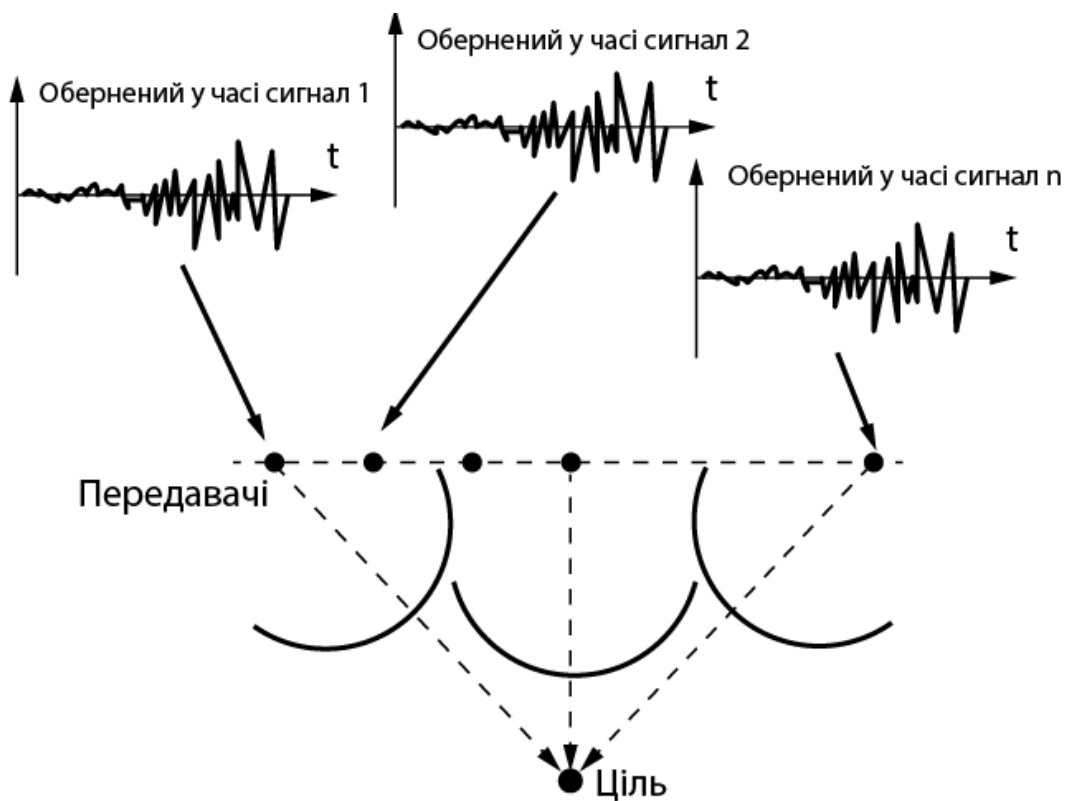


Рис. 1.13



## **2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЯВЛЕННЯ ЗБРОЇ**

### **2.1 Опис та принцип роботи алгоритму**

#### ***2.1.1 Принцип роботи***

Властивості НВЧ візуалізації зберігають форми об'єктів, що дозволяє застосовувати алгоритми відновлення форми (такі як SIFT). Зображення отримувані за допомогою НВЧ радару є тривимірними, тому для того щоб використовувати SIFT необхідно перетворити зображення в двовимірну площину. Відомо що мікрохвильові зображення погіршуються від недостатньої роздільної здатності в порівнянні з оптичними зображеннями. Таким чином зображення, що отримується НВЧ радаром створює розмите зображення з слабо вираженими контурами, але основні характеристики об'єктів ще чітко виділені. Фонова частина зображення зазвичай володіє статичними властивостями, на відміну від областей, які мають інтерес (металевих об'єктів). Це призводить до різних гістограм інтенсивності між різними областями зображення, яка в свою чергу дозволяє в деякій мірі відділити фон від цілі. Крім того, тривимірне походження зображення можна використовувати, виконуючи проекцію тривимірних об'єктів даних отриманих радаром в різних кутах сканування. Ця процедура створює зображення з різним фоном, які можуть покращити можливості виявлення.

#### ***2.1.2 Загальна структура алгоритму виявлення***

В загальному вигляді алгоритм виявлення можна розділити на 4 етапи як зображена на Рис. 2.1.

Мультивходовий аналізатор включає в себе отримання даних з радарів та створення масивів даних для подальшої обробки. Працюючи з декількома радарми одночасно передбачається можливість кореляції даних між сусідніми

радарами та радарами, зони яких перетинаються. Таким чином можна отримати тривимірне зображення скануючої області. Блок сегментації зображення розділяє зображення на області для аналізу зацікавлених блоків, визначає їх гістограми яскравості та вибирає зображення зон в яких гістограми мають області з високою яскравістю(наявністю джерел з високою відбиваючою здатністю).



Рис. 2.1 Загальна структура алгоритму виявлення

Блок детектування об'єктів займається обробкою сегментованих зображень для створення контурів об'єктів на зображенні. Використовуючи

методи для обробки оптичних зображень виконується створення контурів на нечіткому (розмитому) зображенні контурів об'єктів що на ньому знаходяться

Блок прийняття рішення займається най складнішою задачею – порівняння отриманого зображення з накопиченою базою або створеним алгоритмом прийняття рішення, що в себе може включати як простий аналіз гістограм так і навчену нейрону мережу. Рішення складаються у матрицю областей з даними ймовірності присутності об'єкта та класифікацію виявленого об'єкта.

### ***2.1.3 Опис алгоритму***

Структурна схема алгоритму представлена на Рис. 2.2.

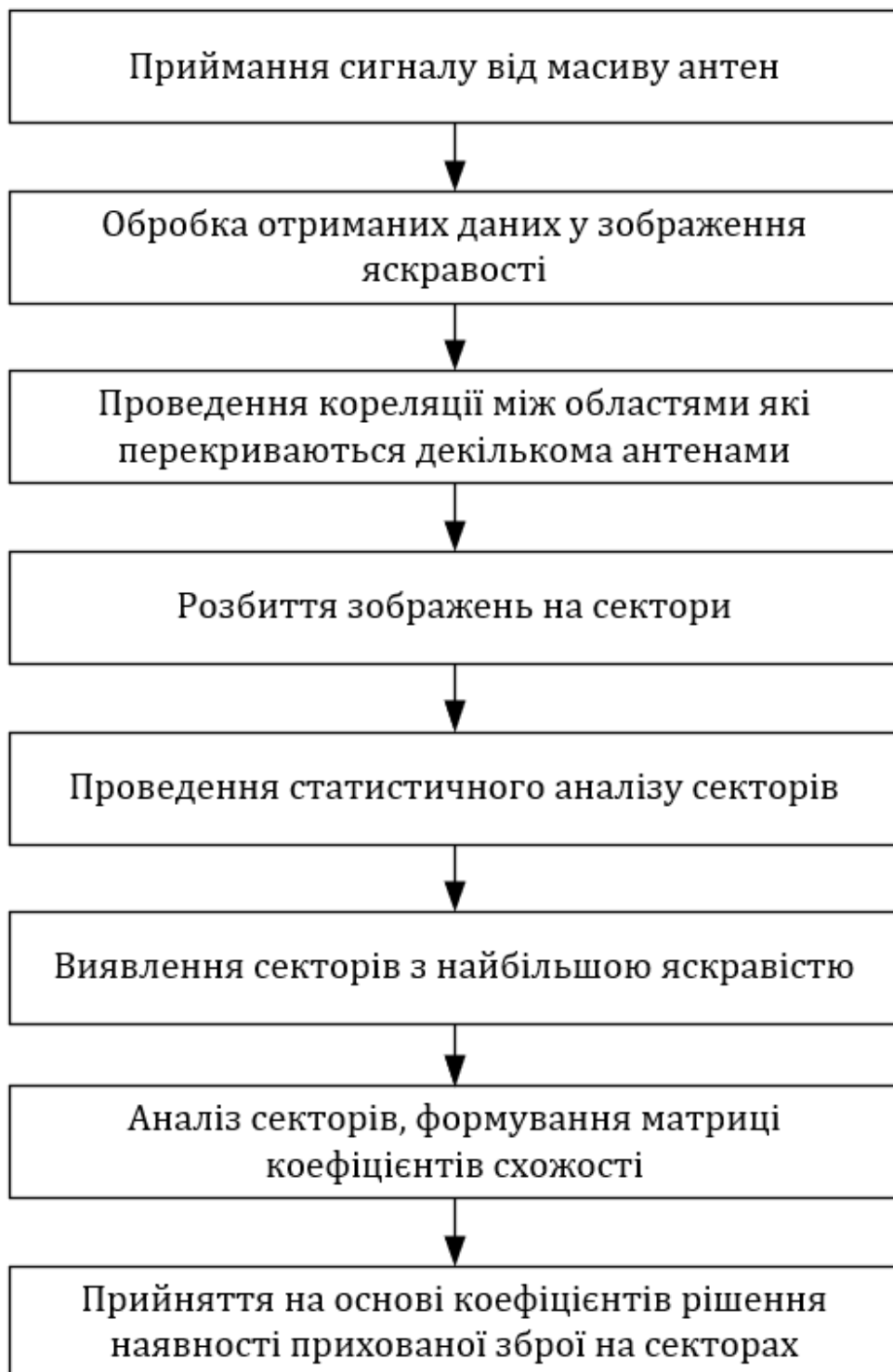


Рис. 2.2

Першим кроком є приймання сигналу від антенного масиву та його попередня обробка, а саме фільтрація, кореляція. Обробка зображення включає у себе

попередню фільтрацію та усунення шумів на зображенні. Наступним кроком є проведення кореляції зображень отриманих від сусідніх радарів та формування цілісного зображення області сканування, створення загального масиву яскравості області сканування. Розбиття зображення на сектори передбачає виявлення точок з найбільшою яскравістю та виділення яскравих зон з попередньо заданим допуском контрастності. Яскраві зони формуються у список секторів для подальшого аналізу. Аналіз окремих зон суттєво збільшує швидкодію роботи алгоритму та точність аналізу оскільки обробка та порівняння в подальшому відбувається лише у зацікавлених зонах. Проведення статистичного аналізу передбачає створення гістограм яскравості кожного сектора. Наступним кроком виявляються найбільш яскраві сектори та формується список секторів для подальшого аналізу.

Аналіз секторів можна описано структурною схемою на Рис. 2.3. Аналіз секторів може включати в себе декілька факторів аналізу, наприклад, аналіз двовимірної форми об'єкту та аналіз тривимірної форми об'єкту. Двовірний аналіз включає в себе формування контурів зображення та порівняння цього контуру з еталонними двовимірними зображеннями та/або заздалегідь сформованими схемами форми. Для такого аналізу можна використовувати стандартні моделі порівняння двовимірних зображень або застосувати створену модель нейронної мережі. Тривимірний аналіз потребує створення моделі базуючись на рівнях яскравості та формування розгортки еталонних моделей.



Рис. 2.3

В результаті аналізу отримується масив з імовірнісними коефіцієнтами схожості з еталонними моделями та загальний коефіцієнт наявності прихованого об'єкта. На основі коефіцієнтів схожості приймається рішення про наявність прихованого об'єкта у певній зоні зображення.

Приклад деяких етапів обробки наведено на Рис. 2.7-10

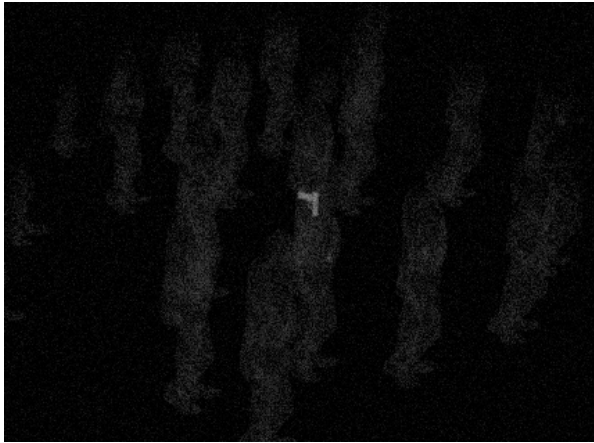


Рис. 2.4 До розділення на сектори

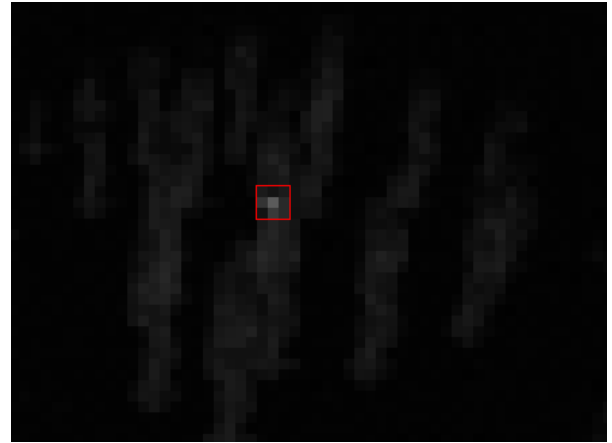


Рис. 2.5 Після розділення на сектори та виявлення найяскравішого сектора

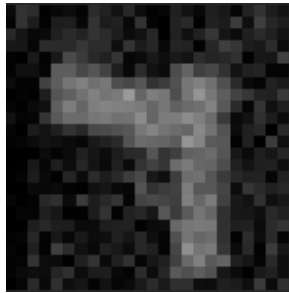


Рис. 2.6 Деталізація сектора



Рис. 2.7 Контур виявленого предмета

## 2.2 Етап формування зображення

Першим кроком формування зображення є перетворення даних напрямку синтетичної апертури в частотну область:

$$S_y(x_t, x_r, k_{y_s}, k) = FFT_{y_s}(s(x_t, x_r, y_s, k))$$

Застосування метода стаціонарної фази, призводить до складної форми перетворення Фур'є. Для спрощення виразу можна використати розкладення Тейлора третього порядку.

Враховуючи

$$|(x - x_t)^2 - (x - x_r)^2| \ll (x - x_t)^2 + (x - x_r)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_0)^2,$$

апроксимуємо суму відстаней між мультистатичними передавачами і цілями:

$$d_t + d_r \approx 2\sqrt{(y - y_s)^2 + R_s} - \frac{R_d^2}{4((y - y_s)^2 + R_s)^{\frac{3}{2}}},$$

де  $R_s = ((x - x_t)^2 + (x - x_r)^2)/2 + (z - z_0)^2$  – часткова сума квадратів

відстаней між мультистатичними передавачами та цілями,

$R_d = ((x - x_t)^2 - (x - x_r)^2)/2$  – різниця квадратів відстаней між

мультистатичними передавачами і цілями.

Застосувавши метод стаціонарної фази, можна отримати наближений вираз в частотній області:

$$S_y(x_t, x_r, k_y, k) \approx$$

$$\approx \iiint f(x, y, z) \cdot e^{-jk_y y} \cdot e^{-j\sqrt{4k^2 - k_y^2} \left( \sqrt{R_s} - \frac{4k_0^2 - k_y^2}{4k_0^2} \frac{R_d^2}{8R_s^{\frac{3}{2}}} \right)} dx dy dz$$

Еквівалентне хвильове число:

$$k_e = \sqrt{4k^2 - k_y^2}$$

Тоді  $S_y(x_t, x_r, k_y, k)$  можна перетворити в  $S_y(x_t, x_r, k_y, k_e)$ .  $k_e$  потрібно інтерполювати на пропорційні інтервали, щоб можна було реалізувати зворотне перетворення Фур'є.



$$s_{R_{xz}}(x_t, x_r, k_y, R_{xz}) = \text{IFFT}_{k_e} \left( S_y(x_t, x_r, k_y, k_e) \right),$$

Двовимірна система координат  $(x', z')$  побудована таким чином, щоб охопити  $x$  та  $z$  розміри зображення сцени. Інтервал між пікселями повинен бути більше критерія Найквіста. Реконструкція двовимірного зображення формується інтегралом по зрізу  $k_y$ :

$$\begin{aligned} S_{xz}(x', k_y, z') = \\ = \iint s_{R_{xz}}(x_t, x_r, k_y, r(x', z', x_t, x_r, z_0)) \cdot e^{jk_{em}r(x', z', x_t, x_r, z_0)} dx_t dx_r, \end{aligned}$$

де  $k_{em}$  – мінімальне значення  $k_e$ , діапазон значень  $r(x', z', x_t, x_r, z_0)$  від приймача до пікселя  $(x', z')$  визначається:

$$r(x', z', x_t, x_r, z_0) = \sqrt{R_s'} - \frac{4k_0^2 - k_y^2}{4k_0^2} \cdot \frac{R_d'^2}{8R_s'^{\frac{3}{2}}}$$

де  $R_s' = \frac{((x' - x_t)^2 + (x' - x_r)^2)}{2} + (z' - z_0)^2$  – часткова сума квадратів діапазонів між

мультистатичними передавачами і  $(x', z')$ ,

$R_d' = \frac{((x' - x_t)^2 - (x' - x_r)^2)}{2}$  – часткова різниця квадратів між мультистатичними

передавачами і  $(x', z')$ .

Кінцеве тривимірне зображення  $I(x', y', z')$  реконструюється одновимірним зворотнім перетворенням Фур'є відносно  $k_y$ .

Припустимо, що тривимірне зображення має розміри  $N_x \times N_y \times N_z$ .

Розміри отриманих чотиривимірних даних:  $N_{xt} \times N_{xt} \times N_{ys} \times N_k$ . Прямий

алгоритм зворотної проєкції має обчислювальне навантаження

$O(N_{xt}N_{xt}N_{ys}N_xN_yN_z)$ . В запропонованому варіанті обчислювальне

навантаження  $O(N_{xt}N_{xt}N_xN_yN_z)$ . Очевидно, що даний метод швидший

приблизно у  $O(N_{ys})$ .

### 2.3 Етап статистичного аналізу зображення для тривимірного зображення.

Метод статистичного аналізу зображення (далі SIFT) широко використовується для порівняння двовимірної графіки. Важливою властивістю SIFT є його здатність порівнювати характеристики двох зображень з не зміним масштабом і кутом. Це дуже важливо для виявлення прихованої зброї, оскільки об'єкт може розрізнятися по масштабу та положенню на тілі. Більш того цей метод досить стійкий відносно шумів та зміни контрасту зображення.

Двовимірний градієнт та орієнтація для кожного пікселя визначається наступним чином:

$$m_{2D}(x, y) = \sqrt{L_x^2 + L_y^2}, \quad \theta(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{L_y}{L_x}\right). \quad (1)$$

де  $L_x$  та  $L_y$  обчислюються з використанням кінцево-різницевого наближення відповідно:  $L(x+1, y, t) - L(x-1, y, t)$  та

$L(x, y+1, t) - L(x, y-1, t)$ . Так само і в тривимірному може бути

обрахований просторово-часовий градієнт  $(L_x, L_y, L_t)$ , де  $L_t$  –

апроксимується з

$L(x, y, t + 1) - L(x, y, t - 1)$ . Таким чином градієнт та орієнтація в

тривимірному вигляді має наступний вигляд:

$$m_{3D}(x, y, t) = \sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_t^2}$$

$$\theta(x, y, t) = \text{ctg} \left( \frac{L_y}{L_x} \right)$$

$$\phi(x, y, t) = \text{ctg} \left( \frac{L_t}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right)$$

Тепер  $\phi$  кодує кут від напрямку двовимірного градієнта. Оскільки

$\sqrt{L_x^2 + L_y^2}$  завжди додатне,  $\phi$  буде мати значення в межах  $\left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$ , тоді кожен

кут буде представлений однією унікальною парою  $(\theta, \phi)$ . Кожен піксель піксель

матиме 2 значення, які представлені напрямком градієнта в трьох вимірах.

Ілюстрація переходу продемонстрована на Рис. 2.8.

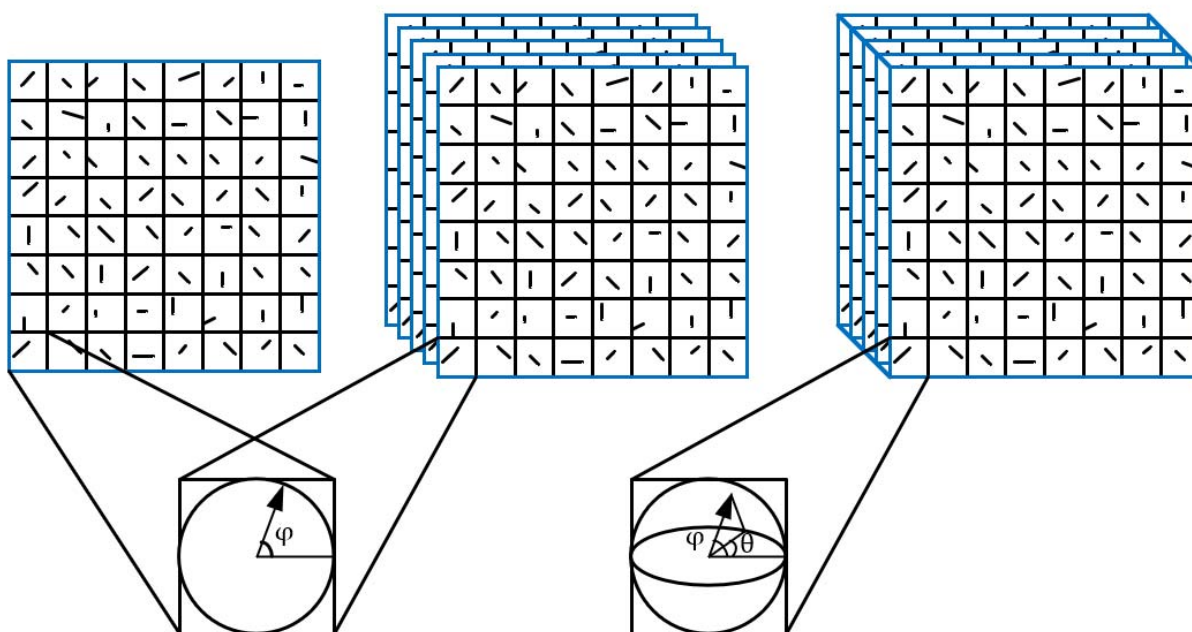


Рис. 2.8

Наступним кроком є побудова гістограми для тривимірного околу відносно точки. Застосуємо метод розділення  $\theta$  і  $\phi$  на комірки однакового розміру (створення меридіан та паралелей). Для усунення недоліків зваження комірок від полюса до екватора необхідно нормалізувати по просторовому куту ( $\omega$ ). Просторовий кут можна розрахувати наступним чином:

$$\omega = \int_{\phi}^{\phi+\Delta\phi} \int_{\theta}^{\theta+\Delta\theta} \sin(\theta) d\theta d\phi = \Delta\phi \int_{\theta}^{\theta+\Delta\theta} \sin(\theta) d\theta = \Delta\phi (\cos(\theta) - \cos(\theta + \Delta\theta))$$

Фактичне значення, додане до гістограми:

$$hist(i_{\theta}, i_{\phi}) += \frac{1}{\omega} m_{2D}(x', y', t') e^{\frac{-((x-x')^2 + (y-y')^2 + (t-t')^2)}{2\sigma^2}},$$

де точка  $(x', y', t')$  представляє місцезнаходження пікселя додаваного до гістограми орієнтації. Таким чином піки цієї гістограми представляють домінуючі орієнтації. Домінуючий пік зберігається, його можна

використовувати для обертання навколо ключової точки створюючи обертально-інваріантні об'єкти.

## 2.4 Етап виявлення потенційно можливих зон знаходження зброї

Виявлення потенційно можливих зон знаходження зони дає можливість звужити зону для пошуку та аналізу зображення, оскільки аналізувати увесь знімок не є необхідним. Таким чином необхідно виділити зони з найбільшим середнім рівнем, тобто в яких найбільш імовірно знаходяться металеві об'єкти.

Алгоритм детектування таких зон можна описати наступними кроками:

1. Збір пасивних 2D радіометричних даних.

$I_{raw}(x, y)$ ,

де  $x$  – горизонтальна вісь,  $y$  – вертикальна вісь. В цьому зображенні, данні про металеві матеріали виглядають, як області з великим рівнем відбиття, матимуть холодний відтінок. Тіло людини та фон в даному випадку будуть мати меншу відбиваючу здатність, та будуть мати теплу температуру ніж метал.

2. Далі, 2D радіометричних даних перетворюються в масштаб відтінків сірого  $I_{scale}(x, y)$ , таким чином, що найвище значення зображення представляється числом 255, тоді як найнижче значення – 0.

3. Наступним кроком визначаємо на гістограмі  $I_{scale}(x, y)$  розподіл інтенсивності зображення та 2 порогових значення  $L_{low}$  та  $L_{high}$ .

$L_{low}$  – відповідає областям зображення з низьким відбиттям, таким як тіло людини, одяг, фон тощо. Таким чином області, які перевищують порогове значення  $L_{low}$  мають більшу відбивну здатність це можуть бути металовмісні

матеріали, але для того щоб класифікувати саме суцільні металеві об'єкти вводимо порогове значення –  $L_{high}$ . Значення  $L_{low}$  та  $L_{high}$  мають визначатися експериментально та задля більшої точності для кожної ділянки зображення окремо.

4. На наступному етапі визначається відношення порогових значень, визначаємо наступним чином:

$$R = \frac{N_{L_{high}}}{N_{L_{low}}},$$

де  $N_{L_{high}}$  – кількість пікселів зображення рівень гістограми яких більший за

$L_{high}$ ,  $N_{L_{low}}$  – кількість пікселів зображення рівень гістограми яких більший за

$L_{low}$ . На цьому етапі використовуючи це співвідношення класифікуємо дане

зображення, як те що має металевий об'єкт чи ні.

5. Якщо коефіцієнт  $R \gg 0.5$  – це свідчить про відсутність металевого об'єкта на даному фрагменті зображення. Тоді приймаємо значення порогу цього зображення за  $L_{low}$ . Якщо немає об'єкта з високим рівнем відбиття то контрастність у всьому зображенні має низьке значення.

6. Якщо коефіцієнт  $R \ll 0.3$ , це означає, що може бути невеликий металевий прихований об'єкт, і ми приймаємо поріг цього зображення як  $L_{high}$ . Цей результат розглядається в тому сенсі, що там, де сильно розсіюється невеликий об'єкт, контраст у сирому зображенні концентрується лише на місці розташування цієї цілі. Тому співвідношення  $R$  стає малим, як у нашому випадку  $< 0.3$ .

7. Якщо коефіцієнт  $R$  становить від 0.5 до 0.3, то, напевно, під тканиною є великий прихований об'єкт, і ми встановлюємо порогове значення зображення як  $L_{low}$ . Цей результат ґрунтується на тому, що коли співвідношення областей становить  $>0.3$ , високовідбиваючий об'єкт має більшу величину. З іншого боку, це співвідношення не повинно перевищувати 0.5, коли було визначено, що на тілі немає предмета.
8. На даному кроці обрізається  $I_{scale}(x, y)$  до визначеного на кроках 5-7 порогового значення та отримуємо реконструйоване зображення  $I_{rec}(x, y)$
9. Потім визначаємо алгоритмом виявлення контурів, контур прихованого об'єкта  $O(x, y)$ .
10. На останньому кроці накладаємо контур  $O(x, y)$  на відреконструйоване зображення  $I_{rec}(x, y)$  для точного прийняття рішення про можливий прихований об'єкт та його подальший аналіз.

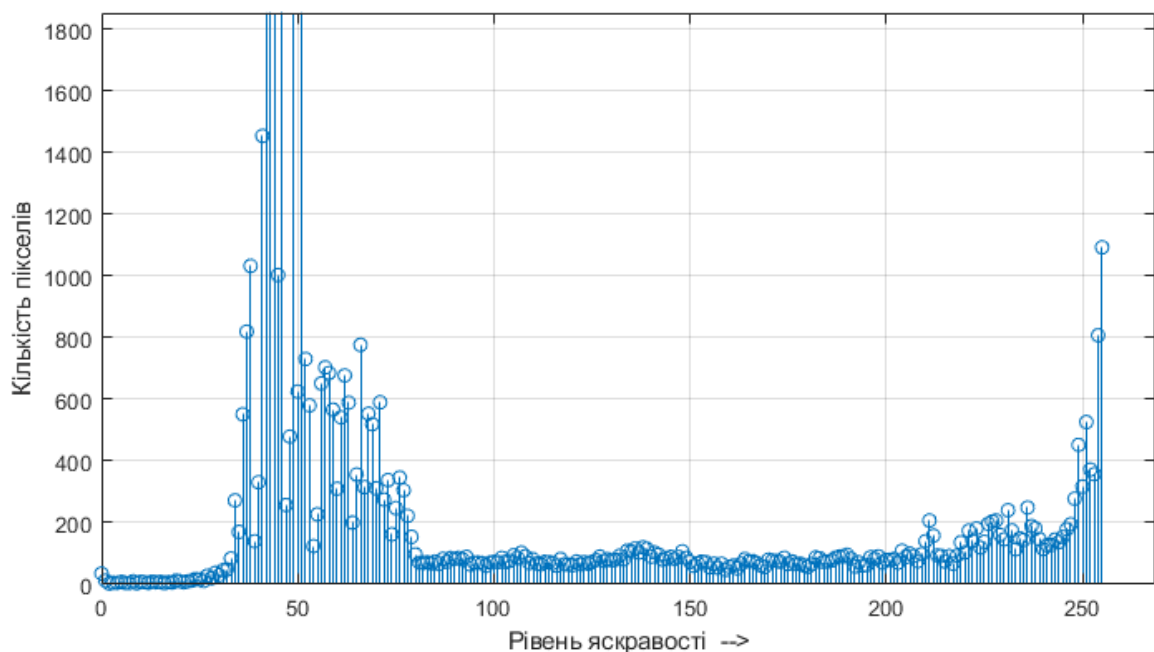


Рис. 2.9 Приклад гістограми зображення

## 2.5 Етап виявлення образів

Алгоритм Scale-invariant feature transform (SIFT) був введений Лоу у 1999 році та згодом вдосконалений у 2004 році для погодження локальних особливостей в зображеннях.

SIFT є класичним алгоритмом виявлення точок інтересу та опису локальних ознак. Завдяки своїй ефективності він широко використовується в сфері комп'ютерного зору для зіставлення зображень чи для локалізації та виявлення об'єктів. Алгоритм SIFT та його варіації мають необхідний функціонал для зображень дистанційного зондування завдяки ефективному зіставлення зображень та їх варіативності. Такі алгоритми зазвичай застосовують для отримання супутникового оптичного зображення. Деякі методи реєстрації використовують ключові точки SIFT в якості контрольних точок для оцінки моделей деформації.

Алгоритм поєднує два оператори: детектор ознак та дескриптор функції. Функція виявлення складається з вибору точок інтересу. Дескриптор вводять для опису цих функцій. Алгоритм SIFT складається з наступних кроків:

1. Виявлення ключових точок. Спочатку обираються ключові точки, які характеризуються їх положенням  $(x, y)$ , масштабом  $\sigma$  та орієнтацією  $\theta$ .

$$P(x, y, \sigma, \theta)$$

Локальні екстремуми обирають в тривимірному просторі  $(x, y, \sigma)$ , для отримання ключових точок, які визначаються положенням та масштабом. Кандидати з низькою контрастністю або розташовані на краях фільтруються за порогом методом Difference of Gaussians та критерієм матриці Гесіана. Інший метод фільтрації є використання порогу на багатомасштабному кутовому детекторі Харріса. Матриця



Харріса та кутовий детектор визначаються наступним чином:

$$C(x, y, \sigma) = \sigma^2 G_{\sqrt{2}\sigma} * \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I_\sigma}{\partial x}\right)^2 & \left(\frac{\partial I_\sigma}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial I_\sigma}{\partial y}\right) \\ \left(\frac{\partial I_\sigma}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial I_\sigma}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial I_\sigma}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix}$$

$$R(x, y, \sigma) = \det(C(x, y, \sigma)) - t \cdot \text{trace}(C(x, y, \sigma))^2,$$

де  $G_{\sqrt{2}\sigma}$  – функція Гауса з стандартним відхиленням  $\sqrt{2}\sigma$ , \* -- оператор

згортки,  $I_\sigma$  – згортка вхідного зображення з функцією Гауса з

стандартним відхиленням  $\sigma$ ,  $t$  – довільний параметр.

2. Призначення орієнтації. Для визначення орієнтацій  $\theta$ , зв'язаних з кожною ключовою точкою, було запропоновано обрахувати локальну гістограму орієнтацій градієнта, зважену по величинам градієнта та гаусівського вікна. Розрахунок гістограми залежить від масштабу. Кожен пік вище 80% обирається в якості орієнтації. Таким чином можна отримати декілька ключових точок з однаковим положенням  $(x, y)$  і масштабом  $\sigma$  але різними орієнтаціями  $\theta$ .
3. Визначення дескрипторів. Дескриптор SIFT призначається кожній ключовій точці  $P(x, y, \sigma, \theta)$  для опису її локальної геометрії. Квадратний окіл визначається навколо кожної точки в залежності від  $\sigma$ , щоб отримати перехід в масштабну інваріантність. Потім він повертається на кут  $\theta$ , щоб забезпечити обертальну інваріантність. Нормалізований окіл поділяють на 4x4 квадратних сектори, на яких обраховують гістограми

орієнтації градієнта. Пере обрахуванням цих гістограм величини градієнта зважують гаусівською функцією визначеною над локальним околom. Для кожної ключової точки дескриптор SIFT отримують шляхом об'єднання і нормалізації цих гістограм.

Розглянемо спосіб адаптації алгоритму SIFT для SAR Images. Зображення SAR є досить складним для тривіального алгоритму SIFT, оскільки він розроблявся для оптичних зображень. Тому аналіз зображень з великою кількістю шумів, призводить до чисельних хибних виявлень та хибних ключових точок. Щоб адаптувати алгоритм SIFT необхідно врахувати статистичні особливості зображення SAR.

Співвідношення середніх показників (ROA) базується на обрахунку співвідношення локальних середніх значень на протилежних сторонах досліджуваного пікселя вздовж одного напрямку, Рис. 2.10.

$$R_i = \frac{M_1(i)}{M_2(i)}$$

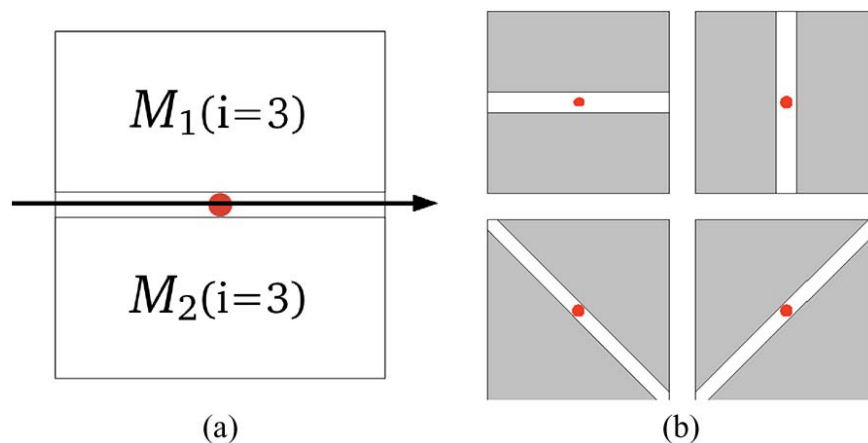


Рис. 2.10

Співвідношення  $R_i$  нормалізується:

$$T_i = \max\left(R_i, \frac{1}{R_i}\right)$$

Ці співвідношення розраховуються по чотирьом основним напрямкам.  
Величина градієнту  $D_n^1$  та орієнтація  $D_f^1$  визначається:

$$D_n^1 = \max_i(T_i)$$

$$D_f^1 = \arg\left(\max_i(T_i) - 1\right) \cdot \frac{\pi}{4}$$

Встановивши порогове значення величини градієнту  $D_n^1$  можна отримати края.

Співвідношення експоненційно-зважених середніх показників (ROEWA) є модифікацією ROA для багаторівневого контексту, який отримується обчисленням експоненціально зважених локальних показників. Наприклад задавши точку (a,b), для напрямку  $i = 3$  середнє значення визначається:

$$M_{1,\alpha}(i = 3) = \int_{x=R} \int_{y=R+} I(a+x, b+y) \cdot e^{-\frac{|x|+|y|}{\alpha}},$$

$$M_{2,\alpha}(i = 3) = \int_{x=R} \int_{y=R-} I(a+x, b+y) \cdot e^{-\frac{|x|+|y|}{\alpha}},$$

де  $\alpha$  – експоненційний параметр впливу.

Як і в ROA співвідношення та нормалізація напрямку визначається як:

$$R_{i,\alpha} = \frac{M_{1,\alpha}(i)}{M_{2,\alpha}(i)}$$

$$T_{i,\alpha} = \max\left(R_{i,\alpha}, \frac{1}{R_{i,\alpha}}\right)$$

Параметр  $T_{i,a}$  обчислюється по горизонтальному ( $i = 3$ ) та вертикальному ( $i = 1$ ) напрямках. За аналогією з детектором границь на оптичних зображеннях, що базується на градієнтах, крайове зображення отримують з:

$$D_{n,a}^2 = \sqrt{(T_{1,a})^2 + (T_{3,a})^2}$$

Введемо горизонтальний та вертикальний градієнти:

$$G_{x,a} = \log(R_{1,a})$$

$$G_{y,a} = \log R_{3,a}$$

Розрахуємо градієнт величини та орієнтації наступним способом:

$$G_{n,a} = \sqrt{(G_{x,a})^2 + (G_{y,a})^2}$$

$$G_{\theta,a} = \arctan\left(\frac{G_{y,a}}{G_{x,a}}\right)$$

Використовуючи логарифм, проблема для орієнтації градієнта на вертикальному ребрі виключається, так як обрахунки дають:

$$G_{x,a} = \log(m_a) - \log(m_b)$$

$$G_{y,a} = 0$$

$$G_{\theta,a} = 0$$

Тут немає нормалізації по мінімуму (або максимуму) між співвідношенням. При такому підході враховуються всі можливі значення орієнтації. Крім того, ваговий коефіцієнт  $a$  дозволяє згладити зображення в різних масштабах, як розмиття по Гаусу.

## 2.6 Алгоритм аналізу та порівняння з еталонними моделями зображення

Для того щоб порівняти два тривимірні об'єкти необхідно порівняти їх дескрипторів форми. Дескриптори форми можна отримати за допомогою функції форми, які відображають зв'язки, відношення між точками на поверхні фігури. В якості функції, яка описуватиме форму об'єкта оберемо евклідову відстань між парами випадкових точок на поверхні об'єкта:

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2},$$

де  $x_1, y_1, z_1$  – координати першої точки,  $x_2, y_2, z_2$  – координати другої точки. Для обрахування функції розподілу використовуємо стохастичні методи, визначаємо  $N$  значень функції форми і будуємо гістограми шляхом підрахунку скільки зразків потрапило в кожний із попередньо заданих інтервалів. З гістограми відновлюємо кусочно-лінійну функцію, яка представляє функцію густини розподілу. Таким чином взявши однакову кількість точок  $N$  з двох множин і розрахувавши для кожної з них евклідову відстань, від неї до всіх інших отримуємо множину відстаней всередині об'єкта  $S$ , їх кількість можна визначити за формулою:

$$S = \frac{N \cdot (N - 1)}{2}$$

Для такого підходу є необхідним щоб об'єкт був представлений множиною точок, що для вхідних даних не є проблемою, а полігональний еталонний об'єкт необхідно з полігонального привести до точкової моделі.

Отримавши форму розподілу двох моделей необхідно визначити міру їх схожості. Для цього можна використати методи порівняння двох функцій  $f$  та  $g$ :

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - g_i)^2}$$

- перетин

$$I = \sum_{i=1}^n \min(f_i, g_i)$$

- критерій Пірсона

$$\chi^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - g_i)^2}{f_i + g_i}$$

- критерій Колмогорова

$$K = \max_i |f_i - g_i|$$

- критерій Крамера-Мізеса

$$CM = \sum_{i=1}^n (f_i - g_i)^2$$

- критерій Бхаттачарія

$$B = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{f_i - g_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n f_i \cdot \sum_{i=1}^n g_i}}}$$

- дивергенція Кульбака-Лейблера

$$KL = \sum_{i=1}^n f_i \log \frac{f_i}{g_i}$$

- дивергенція Дженсена-Шенона

$$JS = \sum_{i=1}^n f_i \log \frac{f_i}{g_i} + g_i \log \frac{g_i}{f_i}$$

Всі ці критерії крім Бхаттачарія будуть рівні 0 при повному співпадінню двох функцій щільності розподілу. Звідси можна вивести сумарний критерій оцінки схожості:

$$S = \sigma + I + \chi^2 + K + CS + (1 - B) + KL + JS$$

Чим  $S$  менший тим більше об'єкти схожі між собою. Такий метод досить грубий та не передбачає аналізу двох віддалено схожих об'єктів між собою.

Для аналізу і отримання карти дальності на еталонному об'єкті можна застосувати метод Ray Casting. Для цього модель розташовується всередину ікосаедрального сферичного багатогранника, з полігонів якого проводять промені і записується їх довжина (відстань) до поверхні моделі. Списки цих відстаней сортуються і порівнюються один з одним. Сортування нівелює повороти, так як у однакових або близьких по геометрії моделей шляху променів будуть збігатися в межах похибки, але відрізнятися за порядком.

Перед порівнянням моделі проходять етап підготовки:

1. Початок локальних координат об'єкту розміщується в центр маси об'єму.
  2. Об'єкт вписується в сферу одиничного радіусу з центром в початку локальних координат.
  3. Застосовуємо трансформацію об'єкта, щоб він знаходився всередині сфери.
  4. Навколо об'єкта будується ікосаедрального сферичного багатогранника (ікосфера) одиничного радіусу з нормальями, направленими всередину.
- Кількість полігонів ікосфери залежить від необхідної точності.

5. З кожного полігона ікосфери по нормалі опускається промінь і зберігається його шлях до зіткнення з поверхнею об'єкту, нормаль якого направлена в сторону променя.
6. Нормалі об'єкта повертаються в протилежному напрямку.
7. Нормали об'єкта переворачиваются в противоположном направлении.
8. З кожного полігона ікосфери ще раз опускаються до зіткнення з поверхнею об'єкта, нормалі якої направлені всередину об'єкта. Цей крок фіксує внутрішню геометрію та заповнює сліпі зони попередніх променів.
9. Шляхи променів, направлених з протилежних полігонів компонуються в списки. Кожен список сортується по найменшому значенню.
10. Список всіх списків сортується по першому значенню. Цей список містить 4 стовпці і кількість рядків, рівну половині кількості полігонів ікосфери і називається картою променів.

Після отримання карти променів можна порівнювати зображення з іншими:

1. Задається порогове значення допустимої похибки.
2. Створюється лічильник відповідності
3. Для кожного рядка в першому списку шукається рядок з другого списку, у якій сума відхилень не перевищує порогове значення, помножене на кількість значень. Якщо такий рядок знаходиться, він не бере участі в подальшому пошуку. Обчислюється попарно абсолютна різниця значень з двох списків і віднімається з одиниці, середнє арифметичне цих значень додається до лічильника.
4. Коли пройдено всі рядки першого списку, значення лічильника ділиться на кількість рядків. Отримане значення є результатом порівняння
5. Якщо об'єкти ідентичні по формі (незалежно від розмірів та повороту) результат близький до 1.



### **3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

В даній магістерській дисертації досліджуються та розробляється алгоритм обробки сигналів для систем радіолокаційного виявлення зброї на тілі людини. Дослідницька робота проводилася методами комп'ютерного моделювання та обчислень за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. За цих обставин є доцільним розглянути у цьому розділі питання гігієни та безпеки праці за умови використання персонального відеотерміналу електронно-обчислювальних машин (ВДТ ПЕОМ) з урахуванням вимог діючого Положення «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями», зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 25 квітня 2018 р. за № 508/31960 [78], та ДСанПін 3.3.2.007-98, і перевірити відповідність умов праці діючим санітарним нормам і вимогам техніки безпеки та запропонувати необхідні технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії. Також в цьому розділі визначенні основні заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.

#### **3.1 Визначення основних потенційно небезпечних і шкідливих виробничих чинників при виконанні науково-дослідної роботи**

До потенційно небезпечних і шкідливих для здоров'я людини чинників в робочому приміщенні, де проводилася дана розробка та з урахуванням наявного обладнання, можуть бути віднесені:

- можливість поразки електричним струмом;
- наявність електромагнітних випромінювань ВДТ ПЕОМ ;
- невикористовуєме рентгенівське випромінювання ВДТ ПЕОМ з ЕПТ;
- невідповідність параметрів мікроклімату у робочому приміщенні санітарним нормам;

- порушення іонного складу повітря;
- наявність електростатичних полів;
- напруженість праці;
- статичні навантаження;
- виникнення надзвичайних ситуацій, тощо.

### **3.2 Технічні рішення та організаційні заходи безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії**

#### **3.2.1 Вимоги щодо створення комфортних та безпечних умов праці при використанні ВДТ**

Дисплеї є потенційним джерелом випромінювання кількох діапазонів електромагнітного спектра: рентгенівського (у разі використання ЕПТ), оптичного (УФ, ІЧ і видиме) та радіочастотного. Кожний вид випромінювання відрізняється своїми характеристиками впливу на організм людини.

Відповідно до ДсанПіН 3.3.2.007-98 та НРБУ-97 гранично допустима потужність дози рентгенівського випромінювання на відстані 5 см від екрану та інших поверхонь ВДТ ПЕОМ не повинна перевищувати 100 мкР/год.

ВДТ ПЕОМ охоплює діапазон довжин хвиль ультрафіолетового (УФ) випромінювання від 200 до 400 нм. Доведено, що більшість біологічних ефектів, пов'язаних з ультрафіолетовим випромінюванням, спричинена активною областю УФ (довжина хвилі від 200 до 315 нм). Це випромінювання, як правило, впливає на шкіру та очі людини. Рівні ультрафіолетового випромінювання не повинні перевищувати **0.05 Вт/м<sup>2</sup>** відповідно до ДСанПіН 3.3.2-007-98.

Світловий діапазон охоплює вузький діапазон частот між найдовшими хвилями УФ-випромінювання (400 нм) та найкоротшими хвилями інфрачервоного(ІЧ) випромінювання (760 нм). Інтенсивність випромінювання видимого світла від ВДТ знаходиться у межах  $0.1 \dots 2.5 \text{ Вт/м}^2$ , а яскравість має рівні  $3.4 \dots 127 \text{ кд/м}^2$ .

Діапазон ІЧ-випромінювання обмежений довжиною хвилі від 0.76 мкм до 1 мм. Основна реакція при поглинанні цих енергій є тепловою.

Допустима поверхнева щільність потоку енергії в різних областях оптичного випромінювання (ДСанПіН 3.3.2-007-98) приведена в таблиці 3.1. Комп'ютерне обладнання, яке використовується у лабораторії відповідає цим вимогам.

Таблиця 3.1

Види оптичного випромінювання	Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку) енергії), $\text{Вт/м}^2$
Ультрафіолетові випромінювання	
УФ-С (220—280 нм)	0,001
УФ-В (280—320 нм)	0,01
УФ-А (320—400 нм)	10,0
Видимі випромінювання (400—760 нм)	10,0
Інфрачервоні випромінювання (0,76—10.0 мкм)	35,0-70,0

Електромагнітні випромінювання, що генеруються ВДТ ПЕОМ пов'язані перш за все з частотою формування елементів зображення та тактовою частотою процесору ВДТ ПЕОМ.

У таблиці 3.2 наведені допустимі рівні напруженості електромагнітних полів відповідно до ДСанПіН 3.3.2-007-98.

Таблиця 3.2

Діапазон частот, Гц	Допустимі рівні напруженості електромагнітного поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/м <sup>2</sup>
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
60 кГц до 3 МГц	50	5	—
3 МГц до 30 МГц	20	—	—
30 МГц до 50 МГц	10	0,3	—
50 МГц до 300 МГц	5	—	—
300 МГц до 300 ГГц	—	—	10

Комп'ютерне обладнання, яке використовувалося у лабораторії відповідає цим вимогам.

### 3.2.2 Іонний склад повітря

В повітрі зовнішнього природного середовища, як і в повітряному середовищі приміщень завжди є наявною певна кількість заряджених частинок, що називаються іонами. Так в **1 см<sup>3</sup>** чистого зовнішнього повітря міститься близько 1000 негативних іонів і понад 1200 позитивних. Іонний склад повітря може значно змінюватись під впливом цілої низки факторів, до яких також належить специфіка виробничої діяльності. Під час роботи ВДТ на ЕПТ при наявності радіовипромінювань високих частот, сильних електричних полів в повітрі закритих помешкань створюється підвищене утримання позитивних і негативних легких іонів. Встановлено, що вже через 5 хвилин роботи ВДТ концентрація легких негативних іонів знижується приблизно у 8 разів. Також істотно знижується концентрація середніх та важких негативно заряджених

частинок. Разом з тим концентрація позитивних іонів зростає, і вже через 3 години роботи ВДТ у повітрі робочої зони переважають позитивно заряджені частинки. Така зміна балансу іонного складу повітря призводить до несприятливого впливу на здоров'я користувачів ВДТ.

ДНАОП 0.03-3.06-80 "Санітарно-гігієнічні норми допустимих рівнів іонізації повітря виробничих та громадських приміщень" регламентує рівні іонізації повітря приміщень при роботі за ВДТ ЕОМ (Таблиця 3.3).

*Таблиця 3.3*

Рівні	Кількість іонів в 1 см <sup>3</sup> повітря	
	n <sup>+</sup>	n <sup>-</sup>
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500—3000	3000—5000
Максимально допустимі	50000	50000

Необхідні концентрації позитивних та негативних іонів в повітрі робочих зон можна забезпечити застосуванням:

- генераторів негативних іонів;
- установок штучного зволоження;
- кондиціонерів.

### ***3.2.3 Мікроклімат робочої зони***

Мікроклімат у робочих приміщеннях визначається декількома параметрами: температура повітря, відносна вологість повітря, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового випромінювання на робочому місці, температура поверхні.

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюють оптимальне й допустиме значення параметрів мікроклімату залежно від періоду року та категорії робіт. У таблиці наведені оптимальні і допустимі значення параметрів мікроклімату для категорій тяжкості робіт «Ia» (роботи, виконувані сидячи й не потребуючі фізичної напруги при витраті енергії не більше 120 ккал/година).

*Таблиця 3.4*

Параметри	Холодний період		Теплий період	
	оптимальні	допустимі	оптимальні	допустимі
Температура °С	22-24	21-25	23-25	22- 28
Відносна вологість, %	40-60	80	40-60	75
Швидкість руху повітря, м/с	0.1	0.1	0.1	0.1-0.2

Для підтримки необхідних параметрів повітря в приміщенні використовується природна або штучна вентиляція.. Заборонено використовувати чи зберігати в приміщенні шкідливі(особливо летючі) речовини.

Параметри мікроклімату в робочому приміщенні відповідають приведеним вище нормам ДСН 3.3.6.042–99

### **3.3 Вимоги з електробезпеки під час експлуатації ВДТ ПЕОМ**

За способом захисту людини від ураження електричним струмом ЕОМ, ВДТ і периферійні пристрої ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ повинні відповідати I, II та III класу за електрозахистом згідно з вимогами ДСТУ ІЕС 61140:2015 «Захист проти ураження електричним струмом. Загальні аспекти щодо установок та обладнання».

ЕОМ, периферійні пристрої ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники тощо) у робочому приміщені, електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту мають відповідати вимогам ПУЕ-2017 та НПАОП 40.1-1.21-98. Також к робочому приміщені повинні використовуватися пристрої захисту від струму короткого замикання, перевантажень, струмів витоку та дугових замикань.

Електромережа для живлення ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ та іншого електроустаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ виконується як окрема 5-ти провідна трифазна електромережа з глухо заземленою нейтраллю та зануленням (система заземлення TN-S), частотою 50 Гц та фазною напругою 220 В.

Для того, щоб не допустити ураження людини електричним струмом при аварійному режимі роботи електрообладнання, в робочому приміщені встановлені автомати максимального струмового захисту.

Опір нульового проводу повинен бути таким, щоб при замиканні на корпус або нульовий провід виникав струм короткого замикання, сила якого повинна перевищувати в 1.4 рази номінальний струм спрацювання автомата максимального струмового захисту (при струмі короткого замикання менше 100А).

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\phi}}{R_0 + R_{\phi} + \frac{Z_T}{3}},$$

де  $U_{\phi}$  – фазна напруга електромережі,

$R_0$  – опір нульового дроту на ділянці від трансформатора до розетки ( $\sim 1.5$  Ом),



$\frac{Z_T}{3}$  – еквівалентний опір трансформатора ( $= 0.1$  Ом),

$R_\phi$  – опір фазного дроту на тій же ділянці ( $\sim 3$  Ом).

Таким чином:

$$I_{кз} = \frac{220}{1.5 + 3 + 0.1} = 47.8 \text{ A}$$

Мережа обладнана автоматом максимального струмового захисту, розрахованого на струм спрацювання  $I_{авт} = 20 \text{ A}$ . Визначимо кратність відношення  $I_{кз}/I_{авт}$ :

$$K_{кр} = \frac{I_{кз}}{I_{авт}} = \frac{47.8}{20} = 2.4$$

Тобто струм короткого замикання при виникненні аварійної ситуації в 2.4 рази перевищує номінальний струм спрацювання автомата, що задовольняє встановленим нормам ( $K_{кр} > 1.4$  при  $I_{кз} < 100 \text{ A}$ ).

Нульовий захисний провід прокладається від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Використання нульового робочого провідника як нульового заземлюючого захисного провідника забороняється. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового заземлюючого провідників.

Згідно вимог ПУЕ площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в електромережі повинна бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники повинні відповідати номінальним параметрам допустимого навантаження електромережі, умовам навколишнього середовища,

умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту,.

ЕОМ, периферійні пристрої ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ повинні підключатися до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників повинні мати спеціальні контакти для підключення нульового заземлюючого провідника. Конструкція їх має бути такою, щоб приєднання нульового заземлюючого провідника відбувалося раніше ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Неприпустимим є підключення ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ до звичайної 4-х провідної трифазної електромережі.

Мережу штепсельних з'єднань та електророзетки для живлення персональних ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ слід виконувати за магістральною схемою, від 3 до 6 з'єднань або електророзеток в одному електричному колі.

Індивідуальні та групові штепсельні з'єднання та електророзетки необхідно монтувати на негорючих або важкогорючих пластинах з урахуванням вимог ПУЕ та діючих Правил з пожежної безпеки.

Мережу штепсельних розеток для живлення персональних ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ при розташуванні їх уздовж стін приміщення прокладають по підлозі поряд зі стінами приміщення, як правило, в металевих трубах і

гнучких металевих рукавах з відводами відповідно до затвердженого плану розміщення обладнання та технічних характеристик обладнання.

В цілях електробезпеки забороняється:

- експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками;
- застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам ПУЕ до переносних електропроводок;
- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання;
- користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання;
- підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами).

### ***3.3.1 Вимоги до організації робочого місця та безпеки праці користувача ВДТ ПЕОМ***

Вимоги до робочого місця робіт з використанням ВДТ ПЕОМ регламентує нормативний документ ДСанПіН 3.3.2.007-98.

Конструкція робочого столу відповідає сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання (дисплея, клавіатури, принтера) і документів.

В якості робочого стільця використовується підйомно-поворотне крісло, регульоване за висотою, з кутом і нахилу сидіння та спинки. Регулювання за

кожним із параметрів здійснюється незалежно, легко і надійно фіксується. Для зниження статичного напруження м'язів використовуються стаціонарні підлокітники, що регулюються за висотою над сидінням. Поверхня сидіння і спинки крісла напівм'яка з нековзним покриттям.

Дисплей розташований на оптимальній відстані від очей користувача з урахуванням розміру літерно-цифрових знаків і символів. Розташування дисплея забезпечує зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом  $+30^0$  до нормальної лінії погляду працюючого. Клавіатура розташована на поверхні столу на відстані 100...300 мм від краю. У конструкції клавіатури передбачений опорний пристрій, який дає змогу змінювати кут нахилу поверхні клавіатури у межах  $5...15^0$ . Таке положення клавіатури зручне для праці обома руками.

Приміщення для роботи з ВДТ ПЕОМ повинні мати природне та штучне освітлення. Природне освітлення має здійснюватись через світлові прорізи. Штучне освітлення у приміщеннях здійснюється системою загального рівномірного освітлення. Як джерело штучного освітлення мають застосовуватись люмінесцентні лампи ЛБ.

Працюючі з ВДТ ПЕОМ підлягають обов'язковим попереднім медичним оглядам під час влаштування на роботу і періодичним – один раз на два роки комісією у складі терапевта, невропатолога та офтальмолога. Медогляди мають на меті перевірку стану здоров'я працівника і виявлення відсутності у нього медичних протипоказань, які перешкоджають виконанню роботи з ПК.

Облаштування робочих місць користувачів ВДТ ПЕОМ, повинно виконуватись з урахуванням вимог:

– ДСТУ ISO 9241-3-2001\_Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 3. Вимоги до відеотерміналів (ISO 9241-31992, IDT);

– ДСТУ ISO 9241-62004\_Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 6. Вимоги до робочого середовища;

Розміщення принтера або іншого пристрою введення-виведення інформації на робочому місці має забезпечувати добру видимість екрана ВДТ, зручність ручного керування пристроєм введення-виведення інформації в зоні досяжності моторного поля згідно з вимогами ДСанПіН 3.3.2.007-98.

За потреби особливої концентрації уваги під час виконання робіт суміжні робочі місця користувачів необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою **1.5 ... 2** м.

Щодня перед початком роботи необхідно очищати екран ВДТ від пилу та інших забруднень. Після закінчення роботи ВДТ ПЕОМ повинні бути відключені від електричної мережі.

У разі виникнення аварійної ситуації необхідно негайно відключити ВДТ ПЕОМ від електричної мережі.

Не допускається:

- виконувати обслуговування, ремонт та налагодження ВДТ ПЕОМ безпосередньо на робочому місці користувача;
- зберігати біля ВДТ ПЕОМ папір, дискети, інші носії інформації, запасні блоки, деталі тощо, якщо вони не використовуються для поточної роботи;
- відключати захисні пристрої, самочинно проводити зміни у конструкції та складі ВДТ ПЕОМ або їх технічне налагодження;
- працювати з ВДТ, у яких під час роботи з'являються нехарактерні сигнали, нестабільне зображення на екрані тощо;
- працювати з матричним принтером за відсутності вібраційного килимка та зі знятою (піднятою) верхньою кришкою.

### **3.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях**

Безпека в надзвичайних ситуаціях регламентується планом локалізації і ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС), основними складовими якого є розробка технічних рішень та організаційних заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій (НС) і визначення основних заходів з пожежної безпеки.

#### ***3.4.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи системи оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації***

Для підвищення безпеки в НС встановлюються системи оповіщення (СО) виробничого персоналу. Оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення НС, наприклад при пожежі, здійснюється відповідно до вимог НАПБ А.01.003-2009. Необхідність обладнання виробничих приміщень певним типом СО визначається згідно з додатком Е до ДБН В.1.1-7-2016 "Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва". Оповіщення про НС та управління евакуацією людей здійснюється наступними способами, а також їх комбінацією:

- поданням звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямки руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;
- розміщенням знаків безпеки на шляхах евакуації згідно з ДСТУ ISO 6309;
- ввімкненням евакуаційних знаків "Вихід";
- ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових показників;
- зв'язком оперативного (чергового) персоналу СО (диспетчера пожежного поста) із зонами оповіщення.

Оповіщення виробничого персоналу про НС здійснюється за допомогою світлових та/або звукових оповіщувачів – обладнуються всі виробничі

приміщення. СО розпочинає трансляцію сигналу оповіщення про НС, не пізніше трьох секунд з моменту отримання сигналу про НС. Для трансляції мовних повідомлень використовуються повідомлення, які записані заздалегідь на відповідному носії інформації або сирени.

### **3.4.2 *Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС***

У разі виявлення ознак НС працівник, який її помітив, повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв'язку чергового працівника державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС). Вказати при цьому адресу кількість поверхів, місце виникнення НС, наявність людей, а також своє прізвище;
- повідомити про НС керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;
- організувати оповіщення людей про НС;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та адміністрація підприємства чи організації, яким повідомлено про виникнення НС, повинні:

- перевірити, чи викликано підрозділи ДСНС;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію та їх рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації наслідків НС;
- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;
- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації НС;

- організувати зустріч підрозділів ДСНС та надати їм допомогу у локалізації та ліквідації НС.

Після прибуття на пожежу підрозділів ДСНС повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла НС.

### **3.4.3 Пожежна безпека**

Небезпечними факторами пожежі для людей є відкритий вогонь, іскри, підвищена температура повітря і предметів, токсичні продукти горіння, дим, знижена концентрація кисню, обвалення й ушкодження будинку, приміщення, установки, а також вибух. Оскільки в приміщенні розташовані прилади і тверді пальні матеріали (підлога - паркет, столи, стільці, шафи, фарба та інші), то за вибухопожежною небезпекою згідно з ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 робоче приміщення відноситься до категорії В (пожежонебезпечне), а відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-98, а робочі зони мають клас П-ІІ а за пожежонебезпечною.

Джерелами загоряння в приміщенні лабораторії можуть бути: коротке замикання, перевантаження електромереж, несправність освітлювальних приладів, діяльність оператора. Тому для запобігання пожежі прийняті наступні міри:

- застосовуються плавкі запобіжники, автомати максимального струмового захисту із електромагнітними розчеплювачами для захисту від короткого замикання і струмів тривалих перевантажень;
- мережа з напругою 220 В виконана проводами у вогнетривких трубах, прокладена в підлозі і стінах;
- освітлювальні установки піддаються постійному нагляду: регулярному очищенню освітлювальних приладів, своєчасній заміні перегорілих ламп, поточному і профілактичному ремонту;



- проводиться контроль за справністю електропроводки.

Технічні рішення системи протипожежного захисту спрямовані на обмеження поширення пожежі, захист людей і матеріальних цінностей.

Приміщення лабораторії, згідно вимог ДСТУ 3675-98 та ISO 3941-2007, обладнане первинними засобами пожежогасіння (вогнегасник ОП - порошковий). При пожежі в електроустановках, що знаходяться під напругою, рекомендується застосовувати порошки типу СИ, що являють собою зерна силікагелю, насичені галоїдвуглецевими рідинами. Також використовується стаціонарна установка порошкова з автоматичним пускачем, приєднана до щитів. Також маютья вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-8, призначені для гасіння пожежі, що виникла в електроустановках, що знаходяться під напругою – клас пожежі «Е» (тривалість випуску заряду близько 15 сек., довжина струменя 4 м, дозволяють вести гасіння без відключення установки).

Автоматична пожежна сигналізація виконана відповідно до вимог ДБН В.2.5-56-2014. До її складу входять звукові оповіщувачі та комбіновані (теплові і димові) сповіщувачі, що підключені до центральної прийомної станції з живленням від ББЖ та електро мережі змінного струму 220 В. Передбачена можливість відключення за допомогою центральної станції автоматичної пожежної сигналізації вентиляційних систем у випадку виникнення пожежі. В робочому приміщенні виконані усі вимоги НАПБ А.01.001.2004 «Правила пожежної безпеки в Україні».

## ВИСНОВОК

Основними науковими результатами, які отримані особисто і виносяться на захист магістерської роботи, є:

1. Запропоновано принцип роботи та структуру радіолокаційної системи виявлення зброї на тілі людини.
2. На основі аналізу двох методів формування зображення (його відновлення), а саме методу з обертанням у часі сигналу та методу часових затримок. Встановлено, що метод вимірювання в частотній області забезпечує більший динамічний діапазон, а метод обертання у часі може також фокусуватися одночасно у часі та просторі.
3. Удосконалено та об'єднано порівняння тривимірних зображень та двовимірного зображення для виявлення і уточнення виявлення прихованої зброї, що дозволяє більш точно аналізувати області виявлення зброї.
4. Показано обробка сигналів та в подальшому зображення за допомогою аналізу та порівняння зображень з еталонами для виявлення зброї дозволяє більш точно класифікувати об'єкти виявлення.

Сукупність наукових положень, сформульованих і обґрунтованих у магістерській роботі, складає вирішення наукового завдання розробки оригінального алгоритму обробки сигналів у радарних системах виявлення зброї на тілі людини.

## ЛІТЕРАТУРА

1. «B. Yang, A. Yarovoy, P. Aubry, and X. Zhuge, “Experimental Verification of 2D UWB MIMO Antenna Array for Near-field Imaging Radar”, Proc. of 39th European Microwave Conference, 2009, Rome, Italy».
2. «X. Zhuge, A.G. Yarovoy, “A Sparse Aperture MIMO-SAR-Based UWB Imaging System for Concealed Weapon Detection”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.49, No.1, January 2011».
3. «M.Fink. “Time-reversal of ultrasonic fields I:basic principles”. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.9, No.5: 555-666, September 1992».
4. «Stanko, S., Kloppel, F., Huck, J., Notel, D., Hagelen, M., Briese, G., Gregor, A., Erukulla, S., Fuchs, H.-H., Essen, H., Pagels, “A. Remote concealed weapon detection in the millimeterwave region: Active and passive,” in Proc. SPIE, 2006, vol. 6396».
5. «S. E. Clark, J. A. Lovberg, C. A. Martin, and V. Kolinko, “Passive millimetrewave imaging for airborne and security applications,” in Proc. SPIE, Aug. 2003, vol. 5077».
6. «R.J. Chignell, and M. Hatef, “LOTUS - a Real Time Integrated Sensor Suite for Anti-Personnel Mine Detection, Incorporating the MINEREC GPR,” in Proc. Xth Int. Conf. Ground Penetrating Radar, Delft, the Netherlands, June 21-24, 2004».
7. «R. Appleby, “Passive millimetre-wave imaging and how it differs from terahertz imaging,” The Royal Society, 10.1098/rsta.2003.1323, 2003».
8. «N. A. Salmon, “A W-band real-time passive millimetre-wave imager for

- helicopter collision avoidance,” in Proc. SPIE on Passive Milli.-Wave Imaging Tech. III, Orlando, Florida, Apr. 1999, USA, vol. 3703».
9. «L. Yujiri, M. Shoucri, and P. Moffa, “Passive Millimeter-Wave Imaging,” IEEE microwave magazine, Sep. 2003».
  10. «J. E. McFee, V. C. Aitken, R. Chesney, Y. Das, and K. L. Russell, “Multisensor vehicle-mounted teleoperated mine detector with data fusion,” in Proc. SPIE Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets III, 1998, vol. 3392».
  11. «A. Schiessl, S.S. Ahmed, “W-band imaging of explosive substances,” in Proc. European Microwave Conference (EuMC), 2009».
  12. «A.G. Yarovoy, T.G. Savelyev, P.J. Aubry, P.E. Lys, and L.P. Ligthart, “UWB Array-Based Sensor for Near-Field Imaging”, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 55, no. 6, Jun. 2007».
  13. «Appleby, R. and R. N. Anderton, “Millimeter-wave and submillimeter-wave imaging for security and surveillance,” in Proc. IEEE, vol. 95, no. 8, Aug. 2007».
  14. «D. Miller, M. Oristaglio, and G. Beylkin, “A new slant on seismic imaging: migration and integral geometry,” Geophysics, vol. 52, 1987».
  15. «J. C. Wiltse, “History of millimeter and submillimeter waves,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 32, no. 9, 1984».
  16. «J. E. McFee, V. C. Aitken, R. Chesney, Y. Das, and K. L. Russell, “Multisensor vehicle-mounted teleoperated mine detector with data fusion,” in Proc. SPIE Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets III, 1998, vol. 3392».
  17. «N. Bleistein, “On the imaging of reflectors in the earth,” Geophysics, vol. 52, 1987».

18. «P. F. Goldsmith, C.-T. Hsieh, G. R. Huguenin, J. Kapitzky, and E. L. Moore, “Focal plane imaging systems for millimeter-wavelengths,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 41, Oct. 1993».
19. «R.B. Cosgrove, P. Milanfar, and J. Kositsky, “Trained detection of buried mines in SAR images via the deflection-optimal criterion”, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 42, no. 11 Nov. 2004».
20. «W.A. Schneider, “Integral formulation for migration in two and three dimensions,” Geophysics, vol. 43, 1978».