

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

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

«На правах рукопису»

УДК 621.384.3

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

Н.І. Бурау

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2025 р.

**Магістерська дисертація
на здобування ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
системи та технології в приладобудуванні»
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»
на тему: «Виявлення наземних мін комп'ютерно-інтегрованими оптико-
електронними засобами»**

Виконала:

Студентка II курсу, групи ПГ-41мп

Тоцька Вікторія Олегівна

Науковий керівник:

Д.т.н., проф.

Микитенко Володимир Іванович

Консультант з розробки стартап-проекту:

Зав. каф., д.е.н., проф.

Бояринова Катерина Олександрівна

Рецензент:

К.т.н., доцент

Терещенко Микола Федорович

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

Здобувач _____

Київ – 2025 рік

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма – Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Н. І. БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студента

Тоцької Вікторії Олегівни

1. Тема дисертації **«Виявлення наземних мін комп'ютерно-інтегрованими оптико-електронними засобами»**, науковий керівник дисертації Микитенко Володимир Іванович, д.т.н., професор затверджені наказом по університету від «04» листопада 2025 р. № 4 7 9 3 - с
2. Термін подання студентом дисертації «10» грудня 2025 р.
3. Об'єкт дослідження: процес виявлення поверхневих протипіхотних мін за допомогою комп'ютерно-інтегрованих оптико-електронних систем.
4. Предмет дослідження: методи, алгоритми та моделі оптико-електронного аналізу зображень для автоматизованого виявлення наземних мін у мультисенсорних системах.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 5.1 Провести аналіз сучасних оптико-електронних систем виявлення мін.
 - 5.2 Оглянути методи обробки та злиття зображень з різних сенсорів.
 - 5.3 Розробити математичну модель процесу виявлення мін.
 - 5.4 Створити алгоритм автоматизованого виявлення мін за оптичними даними.

5.5 Провести моделювання роботи системи та оцінити її ефективність.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій: наукова стаття у збірнику праць науково-практичної конференції

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ	Бояринова К.О., Зав. каф.,д.е.н.,проф.		

9. Дата видачі завдання 6 жовтня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Інформаційний пошук за тематикою оптико-електронних систем виявлення наземних мін.	9.10.2025	
2	Аналіз існуючих методів та сенсорних технологій, що застосовуються для виявлення вибухонебезпечних об'єктів.	15.10.2025	
3	Розроблення фізико-математичної моделі процесу оптичного виявлення мін.	24.10.2025	
4	Дослідження методів мультисенсорного злиття даних і вибір оптимальних алгоритмів обробки зображень.	1.11.2025	
5	Створення та моделювання комп'ютерно-інтегрованої системи виявлення мін у середовищі MATLAB.	20.11.2025	
6	Оформлення магістерської дисертації та підготовка презентаційних матеріалів.	10.12.2025	

Студент

Тоцька В.О.

Науковий керівник дисертації

Микитенко В.І.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація «Виявлення наземних мін комп'ютерно-інтегрованими оптико-електронними засобами»

Обсяг роботи – 107 с., 21 ілюстрація, 32 таблиці, 4 додатки 50 джерел посилань.

Актуальність роботи зумовлена потребою у створенні високотехнологічних засобів дистанційного виявлення наземних мін, які залишаються однією з найбільших загроз для цивільного населення та істотно ускладнюють процеси гуманітарного розмінування. Традиційні методи пошуку мін є повільними, небезпечними та малоефективними в умовах великої площі забруднення. Оптико-електронні системи, інтегровані з безпілотними або наземними платформами, забезпечують можливість автоматизованого аналізу місцевості на основі зображень видимого та інфрачервоного діапазонів.

Одним з найперспективніших напрямів є використання мультисенсорного підходу, що поєднує RGB-канал та інфрачервоні тепловізійні дані. Телевізійний канал забезпечує високу деталізацію сцени та можливість аналізу форми й текстурі об'єктів, тоді як тепловізійний канал дозволяє реєструвати температурні аномалії, властиві корпусам мін у різні періоди доби.

Об'єктом дослідження є процес виявлення поверхневих протипіхотних мін.

Предметом дослідження є оптико-електронні методи та алгоритми аналізу зображень для автоматизованого виявлення поверхневих мін.

Мета роботи полягає у розробленні та дослідженні математичної і комп'ютерної моделі мультисенсорної оптико-електронної системи виявлення мін на основі злиття RGB- та інфрачервоних даних, а також у створенні алгоритмів автоматизованої обробки зображень у середовищі MATLAB/Simulink.

У межах роботи створено синтетичну сцену, що моделює ґрунтову поверхню та мінні об'єкти, визначено параметри сенсорів, змодельовано процес формування RGB- та ІЧ-зображень, а також реалізовано алгоритми фільтрації, нормалізації та злиття даних (average fusion, max fusion, wavelet fusion). Проведено оцінювання

отриманих результатів за інтенсивнісними гістограмами, контрастністю та здатністю виділяти теплові та структурні аномалії.

Наукова новизна: запропонована узагальнена модель мультисенсорної системи виявлення мін, яка поєднує оптоелектронні дані двох спектральних діапазонів і включає алгоритмічну інтеграцію каналів у Simulink. Запропоновано підхід до підвищення достовірності виявлення на основі поєднання структурної (RGB) та теплової (ІЧ) інформації з можливістю подальшого використання методів машинного навчання.

Практична цінність одержаних результатів полягає у можливості застосування запропонованих моделей і алгоритмів для створення реальних роботизованих систем гуманітарного розмінування. Результати роботи можуть бути основою для побудови систем дистанційного зондування, здатних зменшувати ризики для персоналу, прискорювати процес очищення територій та підвищувати ефективність виявлення вибухонебезпечних об'єктів у військових та цивільних застосуваннях.

Апробація результатів дослідження:

Тоцька В.О., Микитенко В.І. Виявлення наземних мін комп'ютерно-інтегрованими оптико-електронними засобами // XXI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень в приладобудуванні», 10–11 грудня 2025 р., м. Київ.

ABSTRACT

Master's Thesis: "Detection of Landmines Using Computer-Integrated Optoelectronic Systems"

The thesis volume is 107 pages, 21 illustrations, 32 tables, 4 appendices and 50 references.

The relevance of the research is determined by the urgent need to develop high-technology tools for the remote detection of landmines, which remain one of the greatest threats to civilian populations and significantly complicate humanitarian demining processes. Traditional mine-detection methods are slow, hazardous, and insufficiently effective, especially in areas with large-scale contamination. Optoelectronic systems integrated with unmanned or ground-based platforms enable automated scene analysis using images acquired in the visible and infrared spectral ranges.

One of the most promising directions is the use of a multisensor approach that combines RGB imaging with infrared (thermal) data. The RGB channel provides high scene detail, enabling the analysis of object shape and texture, while the thermal channel makes it possible to detect temperature anomalies characteristic of mine casings at different times of the day.

The **object of the study** is the process of detecting surface-laid antipersonnel landmines.

The **subject of the study** is optoelectronic methods and image-processing algorithms for automated detection of surface landmines.

The **aim of the thesis** is to develop and investigate a mathematical and computational model of a multisensor optoelectronic landmine detection system based on the fusion of RGB and infrared data, as well as to design algorithms for automated image processing in the MATLAB/Simulink environment.

A synthetic scene modelling soil surfaces and mine-like objects was created within the research. Sensor parameters were defined, and the formation of RGB and IR images was simulated. Algorithms for filtering, normalization, and data fusion (average fusion, max fusion, and wavelet fusion) were implemented. The resulting images were evaluated using intensity histograms, contrast analysis, and their ability to highlight thermal and

structural anomalies.

The **scientific novelty** of the obtained results lies in the development of a generalized model of a multisensor landmine detection system that integrates optoelectronic data from two spectral ranges and incorporates algorithmic fusion within Simulink. A method to improve detection reliability through the combination of structural (RGB) and thermal (IR) information is proposed, with the potential for further integration of machine-learning techniques.

The **practical significance** of the results consists in the possibility of applying the proposed models and algorithms to real robotic systems for humanitarian demining. The outcomes of the thesis may serve as a foundation for building remote-sensing systems capable of reducing risks to personnel, accelerating territory clearance, and improving the effectiveness of explosive-hazard detection in both military and civilian contexts.

Presentation of research results:

Totska V.O., Mykytenko V.I. *Detection of landmines using computer-integrated optoelectronic systems* // XXI Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists “*A Look into the Future of Instrument Engineering*”, December 10–11, 2025, Kyiv.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ МІН.....	15
1.1 Мінна небезпека.....	15
1.2 Типи наземних мін.....	18
1.3 Техніки виявлення мін.....	19
1.3.1 Електромагнітні методи	19
1.3.2 Акустичний/сейсмічний метод	20
1.3.3 Радіолокація ґрунту (Ground Penetrating Radar, GPR).....	21
1.3.4 Інфрачервоні/гіперспектральні системи	22
1.3.5 Сенсори парів	23
1.3.6 Ядерний квадрупольний резонанс (NQR)	23
1.3.7 Механічні методи.....	23
1.3.8 Метод виявлення з допомогою собак	24
1.4 Фізичні основи оптичного виявлення мін	24
1.5 Оптичні та оптико-електронні сенсори	26
1.5.1 Телевізійні (RGB) сенсори.....	27
1.5.2 Інфрачервоні (тепловізійні) сенсори.....	27
1.5.3 Гіперспектральні сенсори.....	28
1.5.4 Лазерно-локаційні сенсори (LiDAR).....	28
1.5.5 Порівняльна характеристика сенсорів	29
1.6 Ідея комп'ютерно-інтегрованого підходу	30
Висновок до розділу.....	32
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АРХІТЕКТУРА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН	34

2.1. Загальні принципи побудови моделі системи	34
2.2. Фізичні передумови теплового випромінювання	35
2.3. Математична модель теплового контрасту та процесу виявлення	36
2.4. Оптимальний спектральний діапазон та вибір сенсорів	37
2.5. Математичне моделювання параметрів сканування поверхні з рухомих носіїв	38
2.6. Математичні методи комплексування (злиття) мультисенсорних даних	39
2.7 Спектральні характеристики ґрунту, рослинності та корпусів мін	40
2.7.1 Спектральні характеристики ґрунту	40
2.7.2. Спектральні характеристики рослинності.....	41
2.7.3 Спектральні характеристики корпусів мін.....	43
2.7.4 Модель спектрального контрасту	45
2.8 Математичні методи спектральної селекції та класифікації	45
2.8.1 Spectral Angle Mapper (SAM).....	45
2.8.2 Кореляційна селекція	45
2.8.3 Matched Filtering (MF)	45
2.8.4 Spectral Unmixing (лінійна модель змішування).....	46
2.9 Узагальнена математична модель процесу виявлення мін	46
2.10 Геометричні параметри зйомки та покриття сцени	47
2.11 Платформа-носій оптико-електронної системи	48
Висновок до розділу.....	49
РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МУЛЬТИСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН	51
3.1 Створення синтетичної сцени для моделювання	51
3.1.1 Характеристики телевізійного та тепловізійного каналів	51
3.1.2 Параметри моделювання сенсорів та сцени.....	52
3.1.3 Формування фону сцени (ґрунтової поверхні)	53
3.1.4 Додавання моделі міни до сцени.....	54
3.1.5 Формування RGB-зображення	55

3.1.6 Формування інфрачервоного (ІЧ) зображення	56
3.2 Побудова моделі обробки та підготовки даних у Simulink	57
3.2.1 Завантаження вхідних зображень	57
3.2.2 Перетворення RGB-контенту у інтенсивність	58
3.2.3. Нормалізація даних.....	58
3.2.4 Блок злиття даних (Fusion)	58
3.2.5 Формування вихідного кадру	59
3.3 Злиття інформації.....	60
3.3.1 Результат моделювання методом усереднення каналів	60
3.3.2 Результат моделювання методом максимального інтенсивного злиття .	60
3.3.3 Результат моделювання методом Wavelet.....	62
3.4 Аналіз інтенсивнісних гістограм для оцінки ефективності методів злиття зображень	63
3.5 Застосування методів злиття на реальних зображеннях	65
3.5.1 Результат моделювання методом усереднення каналів	66
3.5.2 Результат моделювання методом максимального інтенсивного злиття .	67
3.5.3 Результат моделювання методом Wavelet.....	67
3.5.4 Аналіз результатів злиття та фізичне пояснення різної видимості мін...	68
3.6 Обмеження моделі мультисенсорного виявлення	70
Висновок до розділу.....	71
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ НА ТЕМУ: «МУЛЬТИСЕНСОРНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН».....	73
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту	73
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	76
4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту	85
4.4 Бізнес-модель та реалізація стартап-проекту	96
Висновок до розділу.....	101
ВИСНОВКИ	103

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	105
ДОДАТКИ	109
Додаток А.....	109
Додаток Б	110
Додаток В.....	110
Додаток Г	111

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

RGB – Red-Green-Blue, телевізійний канал видимого спектра
ІЧ / IR – Інфрачервоний діапазон / Infrared
NIR – Near-Infrared, ближній інфрачервоний діапазон
SWIR – Short-Wave Infrared, короткохвильовий ІЧ-діапазон
MWIR – Mid-Wave Infrared, середньохвильовий ІЧ-діапазон
LWIR – Long-Wave Infrared, довгохвильовий ІЧ-діапазон
GSD – Ground Sample Distance, наземний розмір пікселя
SNR – Signal-to-Noise Ratio, відношення сигнал/шум
DEM – Digital Elevation Model, цифрова модель рельєфу
LiDAR – Light Detection and Ranging, лазерно-локаційна система
SAM – Spectral Angle Mapper, спектрально-кутовий алгоритм
MF – Matched Filtering, метод узгодженого фільтрування
PCA – Principal Component Analysis, метод головних компонент
ANN / NN – Artificial Neural Network, нейронна мережа
UAV / БПЛА – Unmanned Aerial Vehicle, безпілотний літальний апарат
Fusion – Алгоритми злиття даних із різних сенсорів
ROI – Region of Interest, область інтересу

ВСТУП

Мінна небезпека залишається однією з найсерйозніших загроз для людства, особливо в країнах, що постраждали від воєнних конфліктів. За оцінками Організації Об'єднаних Націй та міжнародних гуманітарних організацій, щорічно тисячі людей у світі гинуть або отримують каліцтва внаслідок підриву на вибухонебезпечних залишках війни. Після початку повномасштабної агресії Російської Федерації проти України у 2022 році проблема мінної та вибухонебезпечної контамінації набула безпрецедентного масштабу: за різними оцінками, потенційно забрудненими є близько чверті території країни. Це створює серйозну загрозу життю та здоров'ю цивільного населення, ускладнює економічне відновлення, обмежує доступ до інфраструктури та сільськогосподарських угідь, завдаючи мільярдних збитків державі.

Традиційні методи розмінування, зокрема ручне обстеження територій із використанням металошукачів чи саперних роботів, залишаються надзвичайно трудомісткими, небезпечними й малоефективними в умовах масштабного забруднення. Металодетектори не здатні розпізнавати пластикові або малометалеві міни, а фізична присутність оператора в зоні ризику створює додаткову небезпеку. Використання біологічних методів (собаки, щури) і механічних засобів очищення має суттєві обмеження щодо точності, вартості та впливу на довкілля. Саме тому сьогодні особливої актуальності набувають оптико-електронні технології, які дозволяють здійснювати дистанційне, безконтактне, автоматизоване виявлення вибухонебезпечних об'єктів із високою точністю.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасних систем виявлення мін є застосування оптико-електронних засобів, які працюють у видимому та інфрачервоному діапазонах. Комбіноване використання RGB-зображень і тепловізійної інформації дозволяє виявляти як геометричні особливості поверхневих об'єктів, так і температурні аномалії, які виникають через відмінності у теплових властивостях корпусів мін та навколишнього ґрунту. Поєднання таких даних у межах мультисенсорної комп'ютерно-інтегрованої системи створює можливість автоматизованого аналізу сцени й суттєво підвищує

точність розпізнавання мін у реальних умовах.

Сучасні методи цифрової обробки зображень, алгоритми злиття даних та моделювання у середовищі MATLAB/Simulink відкривають нові можливості для побудови систем дистанційного виявлення наземних мін. Завдяки узгодженому використанню інформації з різних оптичних каналів стає можливим формування узагальненої сцени, у якій мінні об'єкти проявляються чіткіше та контрастніше, ніж на зображеннях окремих сенсорів. Це створює передумови для підвищення ефективності гуманітарного розмінування та розвитку інтелектуальних роботизованих платформ, які здатні працювати без залучення людини до небезпечних зон.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ МІН

1.1 Мінна небезпека

Мінна та вибухонебезпечна контамінація сьогодні є однією з найгостріших проблем для України. За оцінками міжнародних організацій, забрудненими можуть бути близько 20–25 % території країни, що становить приблизно 139 000 км², а в зонах потенційної небезпеки проживає понад шість мільйонів людей. Це створює значний ризик для життя та здоров'я цивільного населення, паралізує розвиток сільського господарства, обмежує доступ до природних ресурсів, інфраструктури та житла, а також призводить до серйозних економічних втрат. Щорічний вплив мінної загрози на економіку оцінюється у 11,2 млрд доларів США, що становить понад п'ять відсотків довоєнного ВВП, а збитки у сфері експорту сягають майже дев'яти мільярдів доларів. Через мінну небезпеку недоступними залишаються близько 28 000 км² сільськогосподарських угідь, що призводить до падіння агроекспорту більш ніж на 4 млрд доларів щороку та завдає щорічних збитків агросектору на понад 11 млрд доларів. З лютого 2022 року до травня 2025-го від мін та інших вибухонебезпечних залишків війни постраждали щонайменше 1 497 цивільних осіб, з яких 442 загинули та 1 055 отримали поранення. Проблема ускладнюється тим, що карти мінних полів часто відсутні або втрачені, а самі міни можуть зсуватися через природні чинники, залишатися активними десятиліттями та вибухати навіть за несприятливих погодних умов. Через це загроза зберігається ще довго після закінчення бойових дій, впливаючи не лише на цивільних, а й на економічну та соціальну стабільність.

Водночас в Україні активно розгортаються гуманітарні програми розмінування: кількість механізованих машин для очищення територій зросла майже до двох сотень, працюють десятки акредитованих державних і міжнародних організацій, впроваджено нові стандарти та процедури закупівель, а держава компенсує витрати аграріям на очищення земель: спочатку на 80 %, а з вересня 2024 року на 100 %, навіть якщо у фермера були податкові борги. Уже понад тисячу

гектарів повернуто до сільськогосподарського використання, але масштаби проблеми залишаються колосальними, і її подолання вимагатиме років роботи та значних фінансових ресурсів.

Як показано в таблиці 1 [1], у країнах, що стикаються з війнами та масштабним насильством, зокрема в Афганістані та Сирії, міни/ВППВ спричинили дуже велику кількість жертв у 2023 році.

Таблиця 1.1 — Кількість жертв від мінної небезпеки

Країна	Кількість жертв
М'янма	1003
Сирія	933
Афганістан	651
Україна	580
Ємен	499

У 2023 році загальна кількість жертв мін та вибухонебезпечних залишків війни становила 5 757 осіб, з них 1 983 загиблих і 3 663 поранених, ще 111 випадків залишилися без підтвердженого стану. Розподіл за типами мін свідчить, що домашні (саморобні) мінні пристрої знову стали найбільш небезпечними, спричинивши 2 071 жертву, що є найвищим показником серед усіх типів. Протипіхотні міни спричинили 833 випадки, що є найвищим рівнем за період з 2011 року. Противотанкові міни викликали 291 жертву. Також зафіксовано 351 випадок у категорії «інші невизначені типи мін». Залишки касетних боєприпасів призвели до 101 жертви, а інші ERW — до 1 173 випадків. Ще 937 випадків пов'язані з невідомими або неідентифікованими типами мін [2].



Діаграма 1.1 – Жертви залежно від типу мін

Коли міна вибухає, сила вибуху зменшується зі збільшенням відстані від неї, оскільки ударна хвиля має максимальну потужність у точці детонації та розсіюється під час поширення в атмосфері. Наприклад, у порівнянні з пристроєм, що містить значно більший небезпечний заряд, міна з невеликою кількістю вибухівки (наприклад, протипіхотна міна під ногою) може мати високу вбивчу силу, водночас завдаючи відносно невеликих пошкоджень у межах кількох метрів. Унаслідок цього кількість поранень від мін та нерозірваних боєприпасів (НВБ) є величезною. Результати ураження мінами або НВБ можна звести до двох основних наслідків: по-перше, вони впливають на життя поранених і їхніх сімей; по-друге, вони позначаються на стані системи охорони здоров'я постраждалої країни. Основним фінансовим наслідком для тих, хто вижив, є втрата можливості заробляти на життя та забезпечувати себе й родину. Ця ситуація також може спричинити психологічну шкоду на додачу до очевидних фізичних травм. Лікування поранень від мін забирає значні ресурси з систем охорони здоров'я країн, що розвиваються, адже такі травми зазвичай потребують кількох хірургічних втручань для належного лікування. Крім того, ці травми часто вимагають забезпечення потерпілих протезами або кріслами колісними, а перед користуванням протезом люди також потребують інтенсивної фізіотерапії.

1.2 Типи наземних мін

Міни поділяються на протипіхотні та протитанкові. Протипіхотні (ПП) міни призначені для ураження людей, тоді як протитанкові (ПТ) міни націлені на бойові танки чи інші захищені транспортні засоби. Протитанкові міни містять велику кількість вибухової речовини (понад 5 кілограмів), мають значну ширину та розраховані на спрацювання від ваги важкої техніки. Такі міни мають достатній заряд, щоб убити людей у транспортному засобі або поблизу нього та знищити сам транспортний засіб, що наїхав на міну. Протитанкові міни зазвичай розташовують у місцях, де очікується рух ворожої техніки: на автомагістралях, мостах і дорогах.

Протипіхотні міни набагато легше привести в дію, і вони призначені для завдання поранень людям, які наступають на них. Вони містять менше вибухівки, є значно меншими та легшими за протитанкові. Типова протипіхотна міна може важити близько 50 грамів і бути завтовшки з палець. ПП-міни виготовляють із різних матеріалів, вони можуть мати будь-яку форму та колір. Хоча протипіхотні міни здатні вбити людину, їх основне призначення — серйозне поранення, оскільки пораненого потрібно рятувати, що вимагає від ворога додаткових часу та ресурсів.

Протипіхотні міни можуть бути встановлені будь-де й активуватися різними способами: при наступанні, натягуванні дроту чи навіть при струшуванні. Вони також можуть здетонувати, якщо якийсь їхній елемент буде зруйнований. Загалом існує два основні типи протипіхотних мін: вибухові та осколкові.

Вибухові міни закопують близько до поверхні ґрунту і зазвичай вони активуються під тиском. Коли хтось наступає на вибухову міну і вона спрацьовує, міна детонує і спричиняє вибухову ударну хвилю гарячих газів, що рухаються з надзвичайно високою швидкістю.

Осколкова міна — це тип міни, яка розкидає уламки в усіх напрямках або може бути спрямована в один бік для ураження фрагментами. Такі міни здатні поранити людину на відстані до 200 метрів від місця встановлення. Уламки зазвичай виготовляють із металу або скла.

Деякі країни та збройні сили застосовують міни для охорони важливих об'єктів та основних баз від противника. Коли військова база зводиться у відкритій місцевості, вона стає вразливою для атак з усіх боків. У таких випадках міни використовують для блокування відкритих ділянок і зосередження оборонних сил на певному напрямку.

Хоча міни можуть мати очевидне військове призначення, їхнє використання неминуче призводить до жертв серед цивільного населення через особливості їхнього призначення, конструкції та способу встановлення.

Знешкодження мін вимагає спеціальної підготовки та залишається повільним і небезпечним процесом. Конструкція мін часто передбачає ускладнення їхнього виявлення.

1.3 Техніки виявлення мін

Найпоширеніший метод виявлення мін базується на тих самих технологіях, що були розроблені під час Другої світової війни і передбачають безпосередню участь людини. Сьогодні стандартний набір сапера майже не відрізняється від того, що був 50 років тому: металошукач і пристрій для проби ґрунту. Розроблено та впроваджено різні техніки розмінування. Кожен метод може бути більш або менш доречним залежно від типу корпусу міни, вибухової речовини та типу ґрунту. Загалом, більшість мін виявляється трьома основними компонентами: детектором сигнатури міни, системою сигналів або зображень для організації зібраної інформації, та блоком прийняття рішень для визначення наявності міни.

Можуть використовуватися електромагнітні, акустичні, атомні, біологічні, хімічні або механічні детектори.

1.3.1 Електромагнітні методи

Сапер знаходиться близько до землі і повільно проводить індукційним електромагнітним детектором (ЕМІ) по полю, що обстежується (рисунок 1). Струм, який протікає через першу котушку («передавальну котушку»), створює змінне магнітне поле в ґрунті. Це магнітне первинне поле спричиняє виникнення електричних (вихрових) струмів у металевих об'єктах. Ці струми породжують

слабше вторинне магнітне поле. Друга котушка («приймальна спіраль») використовується для виявлення змін напруги, викликаних вторинним магнітним полем. Ці зміни електричного потенціалу потім перетворюються детектором у звуковий сигнал [3].



Рисунок 1.1 — Електромагнітний метод виявлення мін [4]

1.3.2 Акустичний/сейсмічний метод

Ці методи унікальні серед способів виявлення, які орієнтовані на виявлення корпусу міни, оскільки базуються на механічних властивостях, а не на електромагнітних характеристиках. Акустично-сейсмічна (А/С) технологія використовується для виявлення мін шляхом їхнього вібрування акустичними або сейсмічними хвилями відповідно, які генеруються та фіксуються безконтактними перетворювачами. Система передачі може складатися з електронних вібраторів або акустичних динаміків. Коли приймач фіксує відбиту енергію, це може свідчити про наявність закопаного об'єкта. Цей метод зображено на рисунку 2 [5].

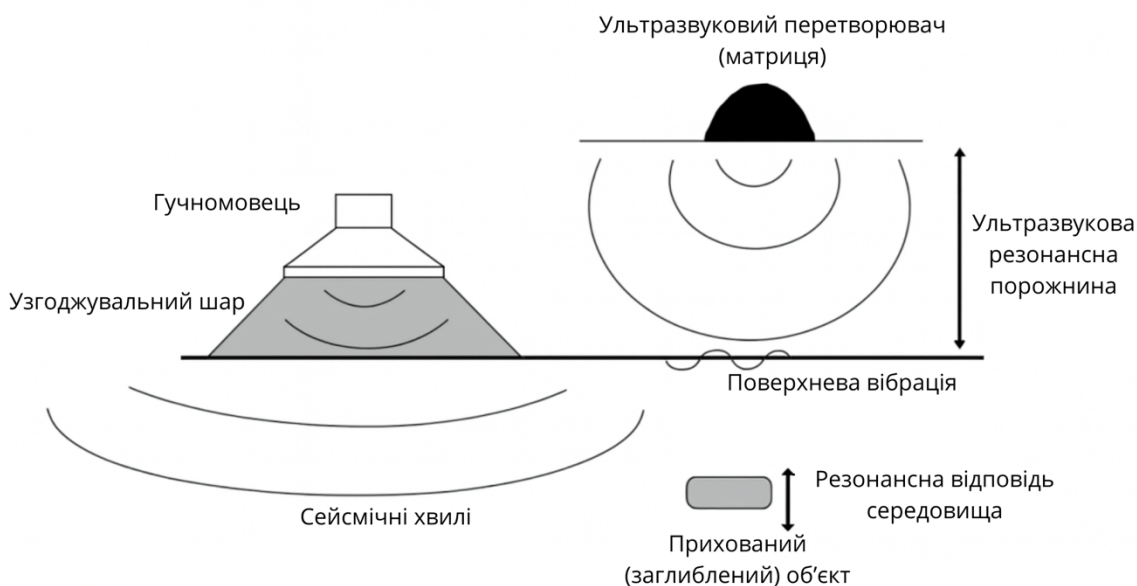


Рисунок 1.2 — Акустичний/сейсмічний метод

1.3.3 Радіолокація ґрунту (Ground Penetrating Radar, GPR)

Цей метод застосовується через складнощі виявлення невеликих кількостей металу в пластикових мінах за допомогою металошукача [6]. GPR оцінює закопані об'єкти шляхом випромінювання радіохвиль (з частотою приблизно від 10 МГц до кількох ГГц) у ґрунт, а потім аналізує відбиті хвилі в зворотних сигналах, які виникають через різницю у показниках заломлення ґрунту — міна або великий камінь, або інші підповерхневі неоднорідності. Система GPR (рисунок 3) використовує пару антен (передавач і приймач, закріплені на малій фіксованій відстані), щоб випромінювати короткі імпульси електромагнітної енергії у ґрунт та фіксувати відбиті сигнали. Комп'ютерна система обробки сигналів перетворює їх на звукове зображення для визначення форми чи розташування об'єкта та інтерпретації зворотного сигналу.

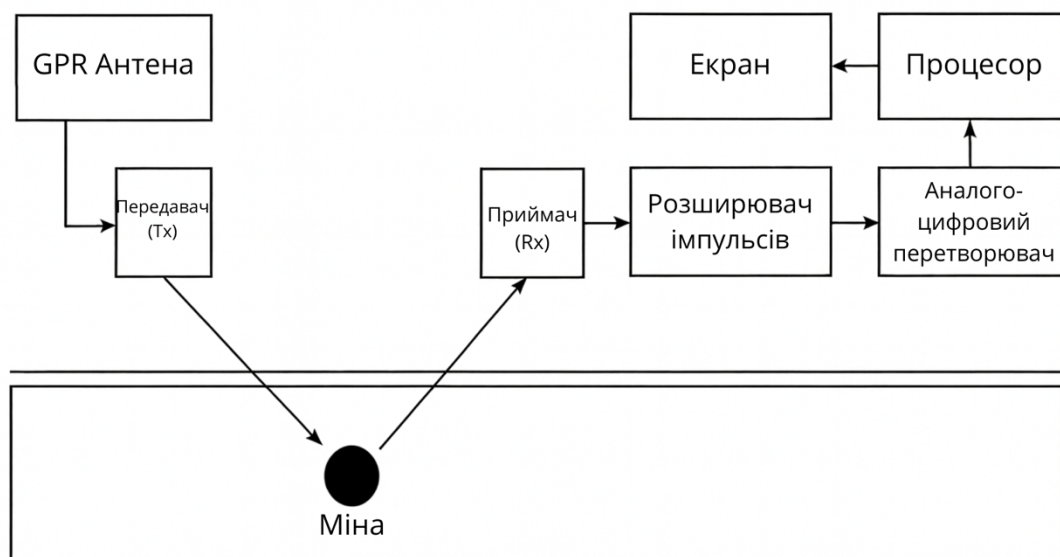


Рисунок 1.3 — Принцип методу (GPR)

1.3.4 Інфрачервоні/гіперспектральні системи

Інфрачервоне випромінювання в мікрохвильовому діапазоні має довжину хвилі від 0,7 мкм до 1 мм. Інфрачервоні та гіперспектральні методи можуть виявляти аномальні зміни у електромагнітному випромінюванні, яке відбивається або миттєво випускається поверхнею мін, ґрунту чи рослинності над закопаними мінами. Існують два режими роботи: активне та пасивне опромінення з використанням широкого діапазону електромагнітних довжин хвиль: пасивна ІЧ-система виявляє природне випромінювання об'єктів, а активна система забезпечує джерело тепла і фіксує випромінювання нагрітих об'єктів. Методи теплового виявлення використовують добові коливання температури в районах поблизу мін. Фізична діяльність процесу розміщення мін впливає на розподіл природних ґрунтових часток, піднімаючи дрібні частинки в повітря, що змінює спосіб розсіювання світла ґрунтом. Також можуть спостерігатися систематичні зміни вологості рослинності безпосередньо над закопаними мінами [7].

1.3.5 Сенсори парів

Невелика кількість вибухової речовини виходить з міни під дією вітру через тріщини та структури міни. Метою є виявлення наявності парів вибухових речовин. У цій сфері існує два напрями досліджень: біологічний та хімічний.

Використання ссавців, комах, мікроорганізмів або рослин — це різні біологічні методи, які можуть застосовуватись для виявлення вибухових речовин [8]. У останні роки вивчено численні небіологічні механізми для виявлення низьких концентрацій вибухових речовин у повітрі або зразках ґрунту та створення високочутливих пристроїв для детектування запахів. Коли зразок вибухової речовини проходить між сенсорними пластинами, частина вибухової речовини прилипає до полімеру, зменшуючи кількість флуоресцентного світла, яке випромінює пластина. Невеликий фотогальванічний підсилювач фіксує наявність вибухової речовини, виявляючи зниження інтенсивності отриманого випромінювання [9].

1.3.6 Ядерний квадрупольний резонанс (NQR)

Ця технологія базується на використанні радіочастот для виявлення певних хімічних сполук, таких як вибухові речовини. Вона складається з передавача, який випромінює радіацію на частоті резонансу вибухового матеріалу. Це збуджує ядро елемента, яке при поверненні до стабільного стану випускає додаткове випромінювання, що викликає електричний потенціал у приймальній котушці. Виявлення цієї радіації свідчить про наявність вибухівки, а отже й міну [10].

1.3.7 Механічні методи

В окремих випадках можливе використання великих броньованих машин для очищення мінних полів, якщо умови місцевості та ґрунту цьому сприяють. Під час війни військові віддають перевагу цьому методу, бо міни не завжди можна вчасно виявити, ідентифікувати та знешкодити вручну. Для цього використовують

великі й дорогі машини. Загроза мінімізується, оскільки сапери перебувають у добре захищеній зоні або керують машинами дистанційно. Проте цей механічний спосіб практично руйнує навколишнє середовище. Крім того, міна може бути закопана глибше або пошкоджена частково і залишатися не вибухнувшою.

1.3.8 Метод виявлення з допомогою собак

Собаки здатні у складних післявоєнних умовах швидше перевіряти забруднений ґрунт, ніж ручні (людські) групи розмінування. Вони забезпечують відносно недорогий і універсальний спосіб виявлення мін, навіть тих, що містять мало або зовсім не містять металу, а також працюють там, де через велику кількість металевих сміття стандартні металошукачі неефективні.

Пошук проводиться з собакою на довгому повідку. Собака може вловлювати запах вибухівки на відстані до 10 см від об'єкта. Після позначення позиції сапери перевіряють місце на глибину до 25 см за допомогою металошукачів [11].

1.4 Фізичні основи оптичного виявлення мін

Оптичні методи виявлення наземних мін ґрунтуються на аналізі взаємодії електромагнітного випромінювання з поверхнею об'єкта та навколишнім середовищем. У разі поверхневих протипіхотних мін, які частково або повністю розташовані над рівнем ґрунту, така взаємодія проявляється у вигляді змін у відбитті, поглинанні чи розсіюванні світла в різних діапазонах спектра. Ці зміни можна зафіксувати за допомогою оптико-електронних приладів: телевізійних камер, тепловізорів, гіперспектральних або лазерно-локаційних систем.

Основою оптичного спостереження є закон відбиття світла, згідно з яким кут падіння дорівнює куту відбиття. Проте реальні поверхні не є ідеально гладкими, тому світло розсіюється у багатьох напрямках. Співвідношення між відбиттям і розсіюванням визначається коефіцієнтами відбиття, поглинання та пропускання, які взаємопов'язані через рівняння енергетичного балансу:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

де (ρ) — коефіцієнт відбиття;

(α) — коефіцієнт поглинання;

(τ) — коефіцієнт пропускання.

Для більшості непрозорих поверхонь $\tau \approx 0$, тому енергія, що падає на поверхню, розподіляється між відбиттям і поглинанням. Саме це співвідношення створює унікальний спектральний підпис кожного матеріалу.

Матеріали, з яких виготовлені корпуси мін (пластик, метал, композити, гума), мають інші спектральні характеристики, ніж навколишній ґрунт або рослинність. Наприклад, пластик відбиває більше світла в ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR, 0.75–1.4 мкм), а металеві поверхні дають високий коефіцієнт дзеркального відбиття у видимому діапазоні. Ґрунт і рослинність, навпаки, мають більш розсіяний спектр відбиття з вираженими піками у певних діапазонах — так званими «спектральними вікнами». Це дозволяє використовувати гіперспектральну зйомку для відрізнєння мін від природного фону [12].

Окрім відбиття, важливу роль відіграє теплове випромінювання об'єктів. Будь-яке тіло, температура якого перевищує абсолютний нуль, випромінює енергію відповідно до закону Планка:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1},$$

де (λ) — довжина хвилі, м;

(T) — температура поверхні, К;

(h) — стала Планка, 6.626×10^{-34} Дж · с;

(c) — швидкість світла, 3×10^8 м/с;

(k) — стала Больцмана, 1.38×10^{-23} Дж/К.

У практичному сенсі це означає, що різниця температур між корпусом міни та навколишнім ґрунтом створює тепловий контраст, який можна зафіксувати тепловізором у середньому інфрачервоному діапазоні (3-5 мкм) або далекому

інфрачервоному (8-12 мкм). Такі контрасти найкраще проявляються у ранкові та вечірні години, коли ґрунт і предмети мають різну швидкість охолодження [13].

Іншим важливим явищем є розсіювання світла. Поверхня землі, під якою приховано міну, часто має незначний мікрорельєф або змінені відбивальні властивості, що виникають унаслідок порушення ґрунту під час її встановлення. Такі зміни особливо помітні в ближньому інфрачервоному й короткохвильовому діапазонах. Поєднання зйомки у видимому, інфрачервоному та гіперспектральному каналах дає змогу отримати просторові й спектральні дані, за якими можна виявити потенційні аномалії [14].

На точність оптичного виявлення істотно впливають зовнішні умови: освітленість, вологість повітря, наявність тіней, кут падіння сонячного проміння, рельєф місцевості. Для підвищення достовірності результатів зазвичай проводять калібрування сенсорів, нормалізацію освітлення та цифрову компенсацію атмосферних впливів [15].

У мультисенсорних системах, де одночасно використовуються телевізійна, інфрачервона й гіперспектральна камери, вплив зовнішніх чинників можна істотно зменшити: кожен сенсор реагує на середовище по-своєму, і це дає можливість компенсувати слабкі сторони окремих каналів.

Отже, фізичні основи оптичного виявлення мін полягають в аналізі взаємодії світлового потоку з поверхнею об'єкта та у визначенні характерних оптичних і теплових відмінностей. Саме ці властивості лежать в основі сучасних мультисенсорних систем, що поєднують кілька оптичних каналів спостереження та забезпечують високу точність і надійність розпізнавання вибухонебезпечних предметів.

1.5 Оптичні та оптико-електронні сенсори

Ефективність оптичних систем виявлення мін значною мірою визначається типом і характеристиками сенсорів, які застосовуються для збору первинної інформації. Сенсор є ключовим елементом будь-якої комп'ютерно-інтегрованої

системи, оскільки саме він перетворює фізичне випромінювання у цифровий сигнал, придатний для подальшого аналізу [15].

Для виявлення поверхневих протипіхотних мін використовуються сенсори різних типів: телевізійні, інфрачервоні, гіперспектральні та лазерно-локаційні. Кожен із них працює у певному діапазоні електромагнітного спектра і забезпечує отримання специфічної інформації про об'єкт спостереження [16].

1.5.1 Телевізійні (RGB) сенсори

Телевізійні камери працюють у видимому діапазоні (0.4–0.7 мкм) і формують зображення, подібне до того, що сприймає людське око [17]. Вони дозволяють виявляти об'єкти за геометричними ознаками: формою, контуром, тінню або кольоровим контрастом із фоном.

У разі поверхневих мін це можуть бути:

- нехарактерні форми на поверхні ґрунту;
- різниця відтінків між корпусом міни і навколишнім середовищем;
- зміни в структурі рослинного покриву над місцем встановлення міни.

Перевагою RGB-камер є висока роздільна здатність і низька вартість, що дозволяє використовувати їх у великих кількостях. Основним недоліком є залежність від освітлення: уночі, при тумані чи густій рослинності ефективність помітно знижується.

1.5.2 Інфрачервоні (тепловізійні) сенсори

Інфрачервоні камери реєструють власне теплове випромінювання об'єктів у середньому (3–5 мкм) або далекому (8–12 мкм) діапазоні [18]. Вони здатні виявляти температурні аномалії, що виникають через різницю у теплових властивостях матеріалів.

Для мін це означає, що їхній корпус, який має іншу теплоємність і теплопровідність, ніж ґрунт, нагрівається та охолоджується по-іншому. Унаслідок

цього в певні періоди доби (зазвичай на світанку або після заходу сонця) міна створює помітний тепловий контраст, який легко фіксується тепловізором [19].

До переваг тепловізійних сенсорів належить можливість роботи вночі і незалежність від зовнішнього освітлення. Недоліками є вплив погодних умов (вологість, туман, дощ) і нижча просторово-роздільна здатність порівняно з RGB-камерами [20].

1.5.3 Гіперспектральні сенсори

Гіперспектральна камера — це прилад, який реєструє зображення у десятках або сотнях вузьких спектральних смуг одночасно. Кожен піксель такого зображення містить повний спектр відбиття у діапазоні від 0.4 до 2.5 мкм, що дозволяє визначити матеріальний склад об'єкта [21].

У випадку з мінами цей метод дозволяє:

- розрізняти матеріали корпусу (пластик, метал, гума) за спектральними характеристиками;
- ідентифікувати змінений ґрунт над місцем встановлення міни;
- відрізняти штучні об'єкти від природних за формою та спектром.

Гіперспектральна зйомка забезпечує надзвичайно високу інформативність, однак генерує великі обсяги даних, а це, в свою чергу, потребує складної обробки (наприклад, методів зменшення розмірності PCA або LDA). Крім того, такі сенсори зазвичай мають високу вартість і вимагають стабільної платформи спостереження.

1.5.4 Лазерно-локаційні сенсори (LiDAR)

Системи LiDAR (Light Detection and Ranging) вимірюють відстань до об'єкта за часом повернення відбитого лазерного імпульсу. Працюючи у ближньому інфрачервоному діапазоні (0.9–1.5 мкм), вони створюють тривимірну модель рельєфу поверхні з точністю до кількох сантиметрів [22].

Для задач виявлення мін LiDAR дає можливість:

- виявляти дрібні нерівності рельєфу або мікровиступи, характерні для встановлених мін;
- розпізнавати сліди порушення поверхні ґрунту;
- створювати цифрову модель місцевості для кореляції з даними з інших сенсорів.

Перевагою LiDAR є висока точність вимірювань незалежно від освітлення, але система потребує значного енергоспоживання та складного калібрування.

1.5.5 Порівняльна характеристика сенсорів

Порівняємо сенсори у таблиці 1.2:

Таблиця 1.2 — Порівняння характеристик різних сенсорів

Тип сенсора	Робочий діапазон	Основна інформація	Переваги	Обмеження
RGB-камера	0.4–0.7 мкм	Видиме зображення	Висока роздільна здатність, дешевизна	Залежність від освітлення
ІЧ-камера (тепловізор)	3–5 мкм, 8–12 мкм	Температурні контрасти	Робота вночі, нечутливість до світла	Вплив погоди, нижча точність
Гіперспектральна камера	0.4–2.5 мкм	Спектральний підпис матеріалу	Висока інформативність, точна ідентифікація	Великий обсяг даних, висока вартість
Гіперспектральна камера	0.4–2.5 мкм	Спектральний підпис матеріалу	Висока інформативність, точна ідентифікація	Великий обсяг даних, висока вартість

Таким чином, для надійного виявлення поверхневих мін доцільно поєднувати декілька типів сенсорів у єдиній мультисенсорній системі. RGB-камера забезпечує геометричну точність, ІЧ-канал — температурну контрастність, гіперспектральна камера — спектральну селективність, а LiDAR — просторову деталізацію. Такий підхід дозволяє створити повноцінний образ об'єкта, зменшити кількість хибних спрацьовувань і підвищити достовірність детектування.

1.6 Ідея комп'ютерно-інтегрованого підходу

Комп'ютерно-інтегрований підхід у цій сфері передбачає створення багатокомпонентної системи, у якій об'єднані оптичні сенсори, електронні вузли збору даних та обчислювальні алгоритми аналізу. Його сутність полягає у тому, що кожен елемент системи не працює окремо, а є частиною єдиного інформаційного контуру, який забезпечує автоматичний збір, синхронізацію, обробку й інтерпретацію даних[23].

Така система функціонує на трьох взаємопов'язаних рівнях:

- 1) Оптичний рівень забезпечує спостереження за поверхнею за допомогою мультисенсорного комплексу, до складу якого входять:
 - телевізійна камера для отримання зображення у видимому спектрі;
 - тепловізор (інфрачервона камера) для фіксації температурних контрастів між міною і навколишнім середовищем;
 - гіперспектральна камера, що дозволяє виявляти матеріали за їхнім спектральним підписом;
 - лазерно-локаційна система (LiDAR), яка формує тривимірну карту поверхні та виявляє дрібні нерівності, характерні для місць закладання мін.
- 2) Електронний рівень включає модулі попередньої обробки сигналів, синхронізації роботи сенсорів і передачі даних у центральний процесор. Сюди входять аналого-цифрові перетворювачі, мікроконтролери

та інтерфейси зв'язку, що забезпечують стабільну роботу системи в реальному часі.

3) Обчислювальний (аналітичний) рівень реалізує програмні алгоритми обробки даних: фільтрацію шумів, зменшення розмірності, виділення ознак та розпізнавання цілей. На цьому етапі виконується інтеграція (fusion) зображень із різних сенсорних каналів для отримання узагальненої сцени, де потенційні міни виділяються за спектральними, тепловими й геометричними ознаками.

Основна перевага такого підходу полягає у поєднанні різних типів інформації, що суттєво підвищує достовірність і точність виявлення. Наприклад, якщо телевізійна камера фіксує об'єкт із підозрілою формою, а гіперспектральна камера підтверджує його матеріальний склад, система автоматично підвищує рівень ймовірності наявності міни в цій зоні.

Мультисенсорна система може бути реалізована на різних носіях:

- наземних мобільних платформах (роботах), які рухаються по поверхні й здійснюють локальне обстеження території;
- безпілотних літальних апаратах (БПЛА) малого або середнього класу, що забезпечують огляд великих площ із повітря.

У кожному з випадків система функціонує автономно, передаючи результати аналізу до віддаленого центру управління без присутності людини в небезпечній зоні.

Для оцінки ефективності запропонованої системи передбачається моделювання процесу виявлення мін у середовищі MATLAB. Зокрема, з використанням Image Fusion Toolbox буде змодельовано процес об'єднання даних із телевізійних, інфрачервоних та гіперспектральних каналів, а також досліджено вплив параметрів сенсорів і кутових полів огляду камер при русі носія. Це дозволить кількісно оцінити характеристики системи, її точність, роздільну здатність і часові затримки при обробці даних.

Отже, комп'ютерно-інтегрований оптико-електронний підхід забезпечує інтелектуальну автоматизацію процесу розмінування, поєднуючи переваги різних

сенсорних технологій, електроніки та обчислювальних методів. Така система здатна працювати автономно, швидко і безпечно, мінімізуючи людський фактор та підвищуючи ефективність виявлення наземних мін на великих площах.

Висновок до розділу

У першому розділі проведено аналіз проблеми мінної небезпеки та сучасних методів її подолання. Встановлено, що традиційні технології розмінування — ручне обстеження, металодетектори та біологічні методи — є малоефективними, небезпечними та не здатні забезпечити високий рівень точності виявлення неметалевих мін. Це обґрунтовує необхідність розроблення нових дистанційних систем, заснованих на оптико-електронних принципах.

Розглянуто фізичні основи оптичного виявлення мін, зокрема явища відбиття, розсіювання та теплового випромінювання. Встановлено, що зміни структури ґрунту під час встановлення вибухового пристрою впливають на його спектральні та теплові властивості, що дає змогу виявляти потенційні аномалії за допомогою сенсорних систем. Визначено найбільш інформативні діапазони, а саме ближній інфрачервоний та короткохвильовий, де спостерігається підвищена контрастність сигналів.

Проаналізовано сучасні типи оптичних сенсорів: телевізійні, інфрачервоні та гіперспектральні. Визначено їхні переваги та обмеження, а також вплив зовнішніх чинників, таких як освітленість, вологість повітря, тіні та рельєф місцевості. Показано, що для підвищення достовірності аналізу необхідно застосовувати калібрування, нормалізацію освітлення та цифрову компенсацію атмосферних впливів.

Обґрунтовано доцільність використання комп'ютерно-інтегрованого підходу, який поєднує різні сенсорні системи та алгоритми машинного навчання для обробки даних. Показано, що мультисенсорні комплекси, які інтегрують телевізійні, інфрачервоні та гіперспектральні канали, здатні істотно підвищити точність і надійність виявлення вибухонебезпечних об'єктів.

Отже, у результаті проведеного аналізу визначено наукові та технічні передумови для розроблення комп'ютерно-інтегрованої мультисенсорної системи виявлення мін. У подальших розділах буде розглянуто архітектуру запропонованої системи, принципи її роботи та алгоритми злиття інформації, а також результати моделювання ефективності запропонованого підходу.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АРХІТЕКТУРА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН

2.1. Загальні принципи побудови моделі системи

Комп'ютерно-інтегрована оптико-електронна система виявлення наземних мін призначена для дистанційного безконтактного аналізу поверхні землі з метою ідентифікації ділянок, що мають оптичні або теплові аномалії. Її функціонування базується на об'єднанні даних із кількох сенсорних каналів — телевізійного, інфрачервоного та гіперспектрального — у єдиному інформаційному просторі. Це дозволяє підвищити достовірність розпізнавання та мінімізувати вплив зовнішніх чинників.

Основна структура системи складається з таких модулів:

- Оптичний сенсорний блок, який включає RGB-камеру, ІЧ-детектор та гіперспектральний модуль.
- Блок попередньої обробки даних — виконує калібрування, шумозаглушення та нормалізацію сигналів.
- Аналітичний модуль, який реалізує алгоритми сегментації та класифікації зображень.
- Підсистема злиття інформації (Fusion), де здійснюється інтеграція даних різних сенсорів у спільне представлення.
- Блок візуалізації та управління, який забезпечує інтерфейс оператора і виведення результатів.

Загальний принцип взаємодії елементів показано у структурній схемі на рисунку 2.1.

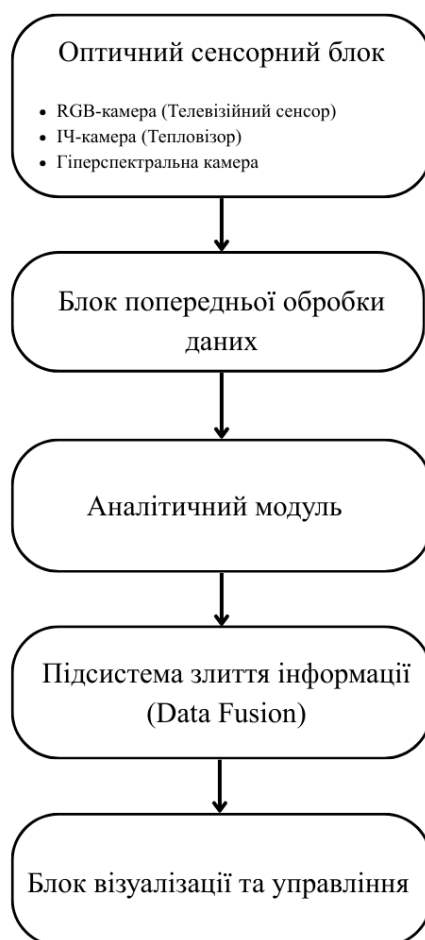


Рисунок 2.1 — Структурна схема комп’ютерно-інтегрованої системи виявлення мін

2.2. Фізичні передумови теплового випромінювання

Будь-яке тіло, температура якого перевищує абсолютний нуль, випромінює електромагнітну енергію. Цей процес описується законом Планка, що задає спектральну густину енергетичної світності:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)},$$

де M_{λ} — спектральна густина енергетичної світності, Вт/(м²·м);

λ — довжина хвилі, м;

T — температура поверхні, К;

h — стала Планка, 6.626×10^{-34} Дж·с;

c — швидкість світла, 3×10^8 м/с;

k — стала Больцмана, 1.38×10^{-23} Дж/К.

Для поверхонь із температурою близько 300 К максимум енергії випромінювання спостерігається у довгохвильовому ІЧ-діапазоні 8–12 мкм, який найчастіше застосовується у тепловізійних системах спостереження [24]. Інтегральне випромінювання описується законом Стефана–Больцмана:

$$M = \sigma T^4,$$

де $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Таким чином, незначні температурні зміни спричиняють суттєву різницю в інтенсивності ІЧ випромінювання, що лежить в основі теплового виявлення підповерхневих об'єктів.

2.3. Математична модель теплового контрасту та процесу виявлення

Наявність міни змінює тепловий баланс поверхні. Корпус міни має іншу теплопровідність та теплоємність, ніж ґрунт, що призводить до різниці температур між цими ділянками. Різницю температур можна виразити як:

$$\Delta T(x, y, t) = T_g(x, y, t) - T_m(x, y, t),$$

де T_g — температура поверхні ґрунту;

T_m — температура ділянки над міною.

Енергетичний контраст, який фіксує ІЧ-сенсор:

$$\Delta M = \sigma(T_g^4 - T_m^4).$$

Зміна температури в часі характеризується градієнтом:

$$E_d(x, y) = \frac{dT(x, y, t)}{dt},$$

що є індикатором аномальних теплових зон.

Інтенсивність сигналу, який реєструє ІЧ-детектор, описується рівнянням:

$$I(x, y, t) = \varepsilon(x, y)\sigma T^4(x, y, t) + N(x, y, t),$$

де ε — коефіцієнт випромінювальної здатності поверхні;

N — шум детектора та атмосфери.

Ця модель використовується для розрахунку теплової контрастності та визначення зон із аномальними параметрами випромінювання [25].

2.4. Оптимальний спектральний діапазон та вибір сенсорів

В сучасних тепловізійних системах використовуються здебільшого три основних типи детекторів: мікроболометрах, фотодетекторах на основі HgCdTe та InSb-матрицях [24]. Їхні параметри порівняно у таблиці 4.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики інфрачервоних сенсорів

Тип сенсора	Спектральний діапазон, мкм	Температура роботи	Переваги	Недоліки
VO ₂ /a-Si мікроболометр	8–14	кімнатна	Неохолоджуваний, низьке енергоспоживання	Менша чутливість (NETD $\approx$ 0.05–0.1 K)
HgCdTe (охолоджуваний)	3–5 або 8–12	$\approx$ 77 K (охолодження азотом)	Висока чутливість, широкий спектр	Висока вартість, потребує охолодження
InSb матриця	3–5	$\approx$ 77 K	Висока швидкодія, добрий сигнал-шум	Обмежений діапазон спостереження

Залежно від умов застосування (день/ніч, тип поверхні, атмосферні параметри) обирають сенсор із відповідним спектральним діапазоном і чутливістю [24]. Для моніторингу великих площ доцільним є використання неохолоджуваних мікроболометрів, а для високоточних стаціонарних комплексів – систем на основі охолоджуваних HgCdTe детекторів.

2.5. Математичне моделювання параметрів сканування поверхні з рухомих носіїв

Оскільки запропонована мультисенсорна система призначена для встановлення на рухомі платформи (безпілотні літальні апарати або наземні роботизовані платформи), критично важливим етапом моделювання є розрахунок геометричних параметрів зйомки. Від цих параметрів залежить здатність системи виявити міну заданого розміру. Основним параметром, що визначає детальність зображення, є проекція пікселя на місцевість (GSD — Ground Sample Distance). Згідно з основами фотограмметрії, для надійного виявлення об'єкта (міни) діаметром D_{mine} , необхідно, щоб її зображення займало не менше 5–10 пікселів [25]. Значення GSD розраховується за класичною формулою фотограмметрії

$$GSD = \frac{H * p}{f}$$

де: H — висота польоту БПЛА або висота встановлення камери на наземному роботі, м;

p — фізичний розмір пікселя матриці сенсора, мкм;

f — фокусна відстань об'єктива, мм.

Ширина смуги захвату на місцевості L_{swath} визначається розміром матриці сенсора W_{sensor} та висотою зйомки [24]:

$$L_{swath} = \frac{H * W_{sensor}}{f}$$

Для забезпечення суцільного покриття території без «сліпих зон» під час руху носія зі швидкістю $V_{carrier}$, частота зйомки (FPS) повинна забезпечувати перекриття кадрів (overlap). Часовий інтервал між кадрами Δt розраховується так, щоб забезпечити повздовжнє перекриття не менше 60–80% для побудови ортофотопланів, або 20–30% для моніторингу [24]:

$$\Delta t \leq \frac{L_H * (1 - k_{overlap})}{V_{carrier}}$$

Де L_H — розмір кадру на місцевості вздовж напрямку руху;

$k_{overlap}$ — коефіцієнт перекриття.

Кутові поля огляду (FOV) розраховуються для узгодження сенсорів:

$$FOV = 2 \arctg \left(\frac{d}{2f} \right)$$

де d — розмір активної області матриці. Ці розрахунки є базою для налаштування віртуальних камер у середовищі моделювання MATLAB. — розмір активної області матриці. Ці розрахунки є базою для налаштування віртуальних камер у середовищі моделювання MATLAB.

2.6. Математичні методи комплексуювання (злиття) мультисенсорних даних

Для реалізації комп'ютерно-інтегрованого підходу в третьому розділі буде використано методи об'єднання зображень (Image Fusion). Метою є створення композитного зображення I_{fused} , яке поєднує просторову деталізацію видимого спектра та теплові сигнатури інфрачервоного [25].

Найпростішим методом є лінійне зважене усереднення, яке, згідно з теорією мультисенсорного злиття, описується формулою [26]:

$$I_{fused}(x, y) = w_1 \cdot I_{VIS}(x, y) + w_2 \cdot I_{IR}(x, y),$$

де w_1, w_2 — вагові коефіцієнти.

Цей метод є обчислювально простим, але може знижувати контрастність дрібних деталей.

Більш ефективним є метод на основі вейвлет-перетворення (Discrete Wavelet Transform — DWT), який дозволяє об'єднувати зображення на рівні частотних компонент.

Математична модель включає такі етапи:

1. Декомпозиція зображень I_{VIS} та I_{IR} на:
 - апроксимуючі (низькочастотні, A)
 - деталізуючі (високочастотні, D) коефіцієнти.
2. Формування об'єднаних коефіцієнтів за правилом максимуму абсолютної

величини для збереження чітких меж (країв мін):

$$D_{\text{fused}}(x, y) = \max(|D_{\text{VIS}}(x, y)|, |D_{\text{IR}}(x, y)|).$$

3. Усереднення низькочастотних складових для збереження загальної освітленості сцени:

$$A_{\text{fused}}(x, y) = \frac{A_{\text{VIS}}(x, y) + A_{\text{IR}}(x, y)}{2}.$$

4. Обернене вейвлет-перетворення (IDWT) для отримання результуючого зображення.

Такий метод дозволяє мінімізувати втрату інформації та підвищити ймовірність правильного виявлення цілі.

2.7 Спектральні характеристики ґрунту, рослинності та корпусів мін

Оптичні методи ідентифікації наземних мін спираються на те, що різні матеріали мають унікальні спектральні властивості [27]. У гіперспектральному зображенні кожен піксель визначається вектором:

$$\vec{\rho} = [\rho(\lambda_1), \rho(\lambda_2), \dots, \rho(\lambda_n)]$$

де $\rho(\lambda)$ — коефіцієнт відбиття на певній довжині хвилі. Форма цього вектора і є «спектральним підписом».

2.7.1 Спектральні характеристики ґрунту

Спектральна реакція ґрунту залежить від його типу (глина, пісок), вологості, вмісту органіки, гранулометричного складу. Класичні роботи у сфері дистанційного зондування показують:

- загальний тренд відбиття ґрунту — плавне зростання від VIS до SWIR (0.4–2.5 мкм);
- дві глибокі водяні смуги поглинання: 1,4 мкм та 1,9 мкм;
- наявність мінеральних піків у діапазоні 2,2–2,3 мкм (глина, каолінит).

Аналітична модель спектра ґрунту:

$$\rho_{\text{soil}}(\lambda) = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + \sum_{i=1}^2 A_i e^{-\frac{(\lambda-\lambda_i)^2}{2\sigma_i^2}}$$

де $\lambda_1 = 1.4 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.9 \mu\text{m}$ — водяні смуги.

Таку модель широко застосовують для синтетичного генерування спектрів у MATLAB [28].

На рисунку 2.2 подано типовий спектр відбиття сухого та вологого ґрунтів у діапазоні 0.4–2.5 мкм [29]. Добре видно плавне зростання відбиття у NIR-області та характерні провали у зонах 1.4 та 1.9 мкм. Зволожений ґрунт демонструє нижчі значення відбиття через підвищену абсорбцію води. Рисунок наочно демонструє причину низької контрастності ґрунтового фону у видимому діапазоні та доцільність використання SWIR-області для селекції об’єктів.

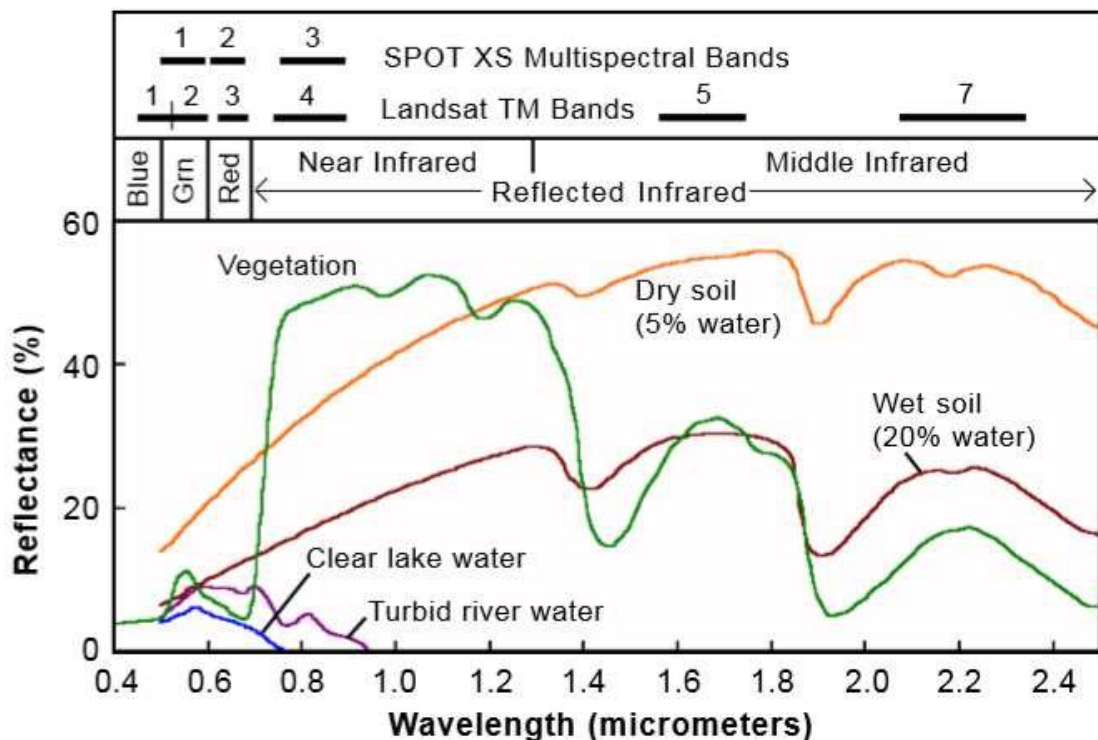


Рисунок 2.2 — Спектр відбиття сухого та вологого ґрунту [29]

2.7.2. Спектральні характеристики рослинності

Зелена рослинність має дуже характерний спектральний підпис[30]:

- сильне поглинання у синьому (хлорофіла) — 0.45 мкм;
- ще сильніше поглинання у червоному — 0.67 мкм;
- різкий «red-edge» стрибок у 0.7–0.74 мкм;
- високий пік відбиття у NIR (0.8–1.3 мкм)
 $\rho \approx 40\text{--}60\%$;
- водяні смуги поглинання 1.4 та 1.9 мкм;
- SWIR показує чутливість до вологи.

Аналітичний опис red edge:

$$\rho_{\text{veg}}(\lambda) = \begin{cases} k_1\lambda + c_1, & \lambda < 0.7 \\ k_2(1 - e^{-s(\lambda-0.7)}) + c_2, & \lambda \geq 0.7 \end{cases}$$

На рисунку 2.3 зображено типовий спектр зеленого листа [31].

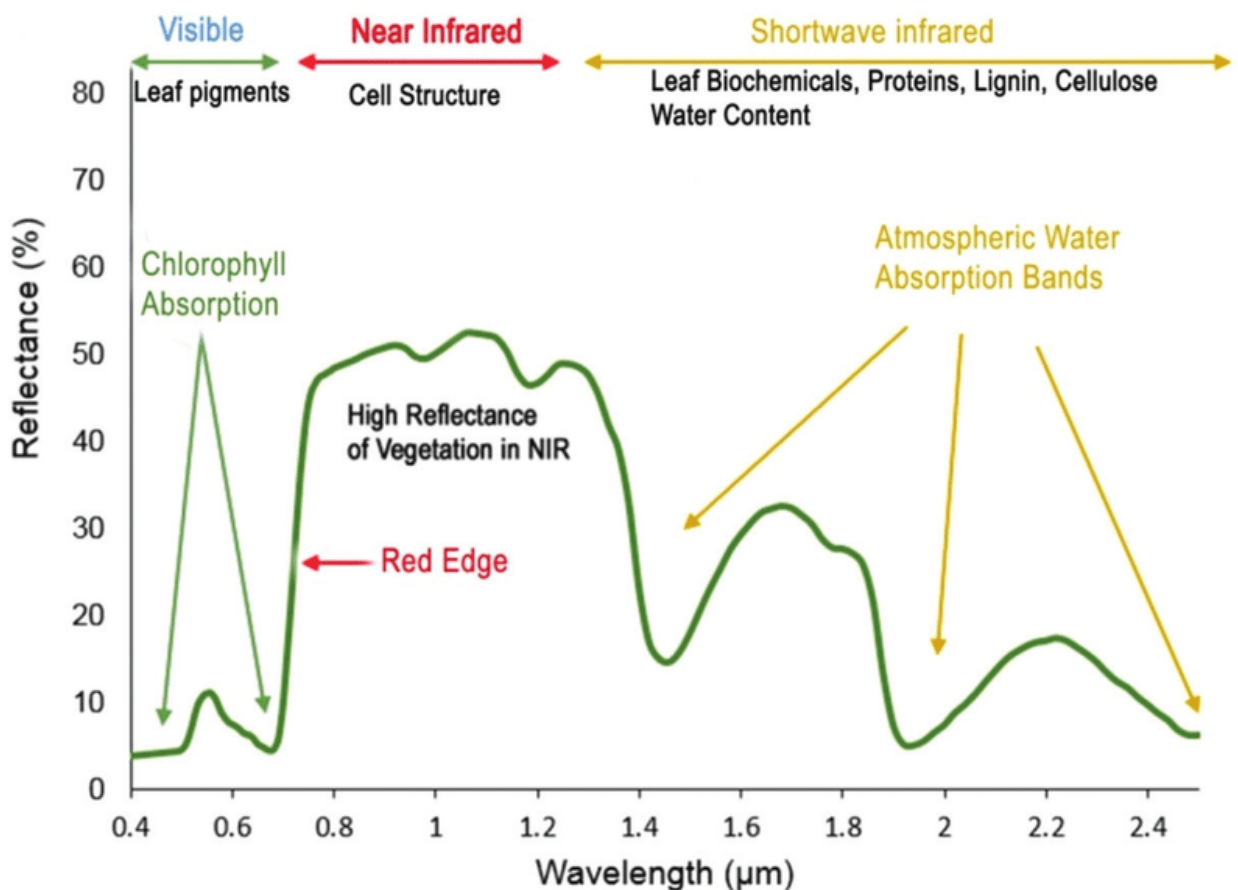


Рисунок 2.3 – Спектральна крива відбиття рослинності [31]

У видимому діапазоні рослинність має низьке відбиття, що пояснює слабку контрастність об'єктів на фоні трав'яного покриву у RGB-зображеннях. Порівняно з ґрунтом, значення відбиття в NIR у 3–5 разів вище, що дозволяє ефективно сегментувати рослинний покрив.

Гіперспектральні знімки ділянок з мінами часто показують[32]:

- зниження відбиття рослинності над міною (ґрунт прогрівається сильніше → стрес рослинності);
- зміщення red-edge вліво.

2.7.3 Спектральні характеристики корпусів мін

Корпуси мін виготовляються з:

- пластику (найчастіше)
- гуми
- фарбованого металу
- композитів

Спектральні властивості пластмас визначаються полімерними групами (C–H, N–H, O–H), які мають чіткі смуги поглинання у [33]:

- 1,15 μm
- 1,65 μm
- 2,3 μm

Модель спектра пластику[34]:

$$\rho_{\text{mine}}(\lambda) = A_0 + A_1 e^{-\alpha\lambda} + \sum_{i=1}^3 B_i \sin(\omega_i \lambda + \phi_i)$$

Ця модель добре апроксимує спектральні криві поліетилену та гуми (часті матеріали корпусів мін).

У роботах з HSI-виявлення мін [32],[35] встановлено:

- спектри мін мають низьку мінливість у VIS;
- відсутній red-edge;
- є характерні синусоїдні осциляції у NIR/SWIR.

На рисунку 2.4 подано зведений графік спектральних кривих полімерів, що застосовуються в корпусах мін, та різних поверхонь (рослинність, ґрунт, вода, пісок) [36].

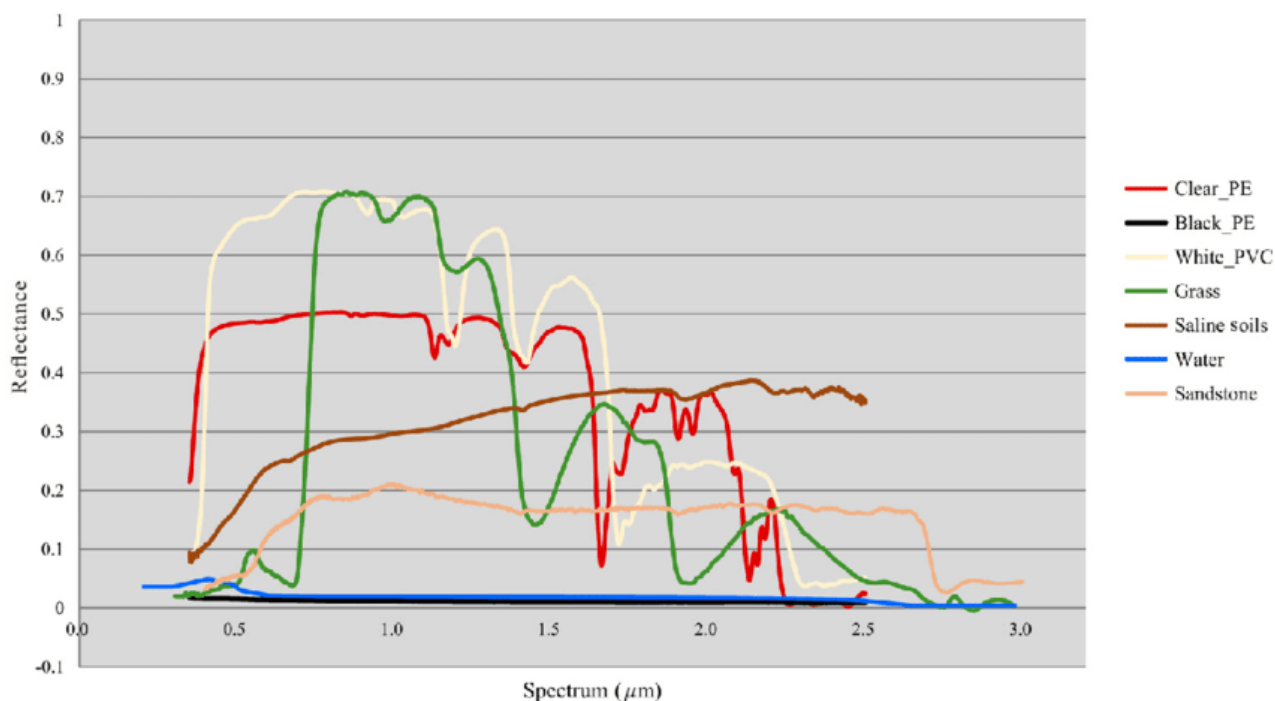


Рисунок 2.4 – Спектральні характеристики пластиків

Видно, що рослинність різко «вистрибує» у NIR-області, полімер демонструє низку характерних піків у SWIR, тоді як ґрунт має плавний характер без різких змін. Такий тип графіка наочно демонструє потенціал спектральної селекції для пошуку мін: корпус міни має спектральний підпис, який не накладається на природні об’єкти.

У таблиці 2.2 наведено порівняльну характеристику матеріалів у різних ІЧ-діапазонах.

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика поверхонь

Матеріал	VIS	NIR	SWIR	Особливості
Ґрунт	низьке	середнє	зростає	водяні смуги
Рослинність	низьке	дуже високе	падає	red-edge
Полімер	низьке	середнє	піки	C–H абсорбція

2.7.4 Модель спектрального контрасту

Контраст між корпусом міни та фоном [37]:

$$\Delta\rho(\lambda) = \rho_{\text{mine}}(\lambda) - \rho_{\text{soil}}(\lambda)$$

Критерій помітності:

$$|\Delta\rho(\lambda)| \geq 0.05 - 0.1$$

Цей критерій застосовується у IEEE-роботах [34].

2.8 Математичні методи спектральної селекції та класифікації

2.8.1 Spectral Angle Mapper (SAM)

Класичний метод для гіперспектральної детектування [38]:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sum S_i R_i}{\sqrt{\sum S_i^2} \sqrt{\sum R_i^2}} \right)$$

де S — спектр пікселя,

R — спектр еталона.

Чутливий до форми спектра, а не до інтенсивності.

Піксель вважається міною, якщо:

$$\theta < \theta_{\text{thr}} \in [0,05, 0,15]$$

2.8.2 Кореляційна селекція

$$C = \frac{\sum (S_i - \bar{S})(R_i - \bar{R})}{\sqrt{\sum (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum (R_i - \bar{R})^2}}$$

Кореляція наближається до 1 → висока подібність [39].

2.8.3 Matched Filtering (MF)

Matched Filtering (MF) — один з найкращих методів для виявлення

малоконтрастних спектрів [40].

$$w = \frac{K^{-1}(R - \bar{R})}{(R - \bar{R})^T K^{-1}(R - \bar{R})}$$
$$y = w^T S$$

де K — коваріаційна матриця фону.

MF часто найефективніший у задачах виявлення мін.

2.8.4 Spectral Unmixing (лінійна модель змішування)

Піксель над міною містить суміш [38]:

$$S(\lambda) = a_{\text{soil}}\rho_{\text{soil}}(\lambda) + a_{\text{veg}}\rho_{\text{veg}}(\lambda) + a_{\text{mine}}\rho_{\text{mine}}(\lambda)$$
$$a_i \geq 0, \sum a_i = 1$$

Розв'язується через NNLS (non-negative least squares) [38].

2.9 Узагальнена математична модель процесу виявлення мін

Нижче наведено повну математичну формалізацію роботи всієї системи[39], [40].

— Етап 1. Формування вимірних сигналів

$$I_{RGB}(x, y, \lambda), I_{IR}(x, y), H(x, y, \lambda)$$

— Етап 2. Радіометрична нормалізація

$$H_n = \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}$$

— Етап 3. Виділення спектральних ознак

PCA:

$$Z = W^T H$$

де W — матриця власних векторів.

MNF:

$$Z = A^{-1}H$$

— Етап 4. Спектральна селекція

SAM:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{S \cdot R}{\|S\| \|R\|}$$

MF:

$$y = w^T S$$

Unmixing:

$$S(\lambda) = \sum a_i \rho_i(\lambda)$$

— Етап 5. Тепловий аналіз

$$\Delta T = T_{\text{soil}} - T_{\text{mine}}$$

ІЧ-інтенсивність:

$$I_{IR} = \epsilon \sigma T^4 + n$$

— Етап 6. Комплексування

$$F = w_1 H_{\text{feat}} + w_2 I_{IR}$$

— Етап 7. Прийняття рішення

$$P(\text{mine} | F) = \frac{1}{1 + e^{-k(F-F_0)}}$$

Поріг:

$$P(\text{mine} | F) > 0.5$$

2.10 Геометричні параметри зйомки та покриття сцени

Для проєктування системи важливе значення мають геометричні параметри сенсорів:

Поле зору (FOV):

$$FOV = 2 \arctan \left(\frac{d}{2f} \right),$$

де d — розмір матриці,

f — фокусна відстань.

Просторова розрізнявальна здатність (GSD):

$$GSD = \frac{H \cdot p}{f},$$

де H — висота встановлення камери,

p — розмір пікселя.

Ширина смуги захоплення при русі платформи:

$$W = 2H \tan \left(\frac{FOV}{2} \right).$$

Ці параметри визначають:

- мінімальний розмір міни, який можна розпізнати;
- темп оновлення оглядової зони;
- умови моделювання в розділі 3 (вплив висоти, кута огляду та GSD на ймовірність виявлення).

2.11 Платформа-носії оптико-електронної системи

Для практичної реалізації системи можливе встановлення сенсорного комплексу на:

- наземний робот (UGV)
 - a) стабільний рух;
 - b) низька висота → висока роздільність;
 - c) найбільш підходить для огляду локальних ділянок.
- безпілотний літальний апарат (БПЛА)
 - a) велика площа огляду;

- b) змінна висота → можливість тестувати GSD;
- c) доречно для пошуку мін на відкритих територіях.

У роботі як базову платформу розглядається UGV та/або низьковисотний БПЛА, що дозволяє моделювати різні геометричні умови.

Висновок до розділу

У другому розділі було сформовано математичну та функціональну основу мультисенсорної оптико-електронної системи виявлення наземних мін. Детально розглянуто фізичні закономірності, що лежать в основі роботи телевізійних, тепловізійних та гіперспектральних сенсорів, а також наведено моделі, які описують формування оптичних, спектральних та теплових ознак поверхні. Особливу увагу приділено спектральним характеристикам ґрунту, рослинності та матеріалів корпусів мін, оскільки саме їх відмінності забезпечують можливість автоматизованої селекції об'єктів.

У розділі також подано математичні моделі теплового контрасту, геометричні співвідношення для розрахунку параметрів зйомки з рухомих платформ (GSD, FOV, ширина смуги огляду), а також алгоритми спектрального аналізу — SAM, matched filtering, кореляційні методи та лінійну модель змішування спектрів. Ці моделі є ключовими для подальшої комп'ютерної реалізації. Важливо, що наведені формалізми дозволяють не лише описати поведінку сигналів у кожному сенсорному каналі, але й визначити ефективні ознаки для мультисенсорного злиття даних.

Окремо розглянуто організацію модулів системи та взаємодію між ними — від отримання даних до формування інтегрованої карти загроз. Така архітектура створює узгоджену основу для переходу до програмної реалізації в середовищі MATLAB. Представлені моделі, алгоритми та структурні елементи забезпечують можливість проведення подальших експериментів зі спектрального аналізу, теплового моделювання та мультисенсорного злиття зображень.

Отже, у цьому розділі сформовано повний математичний апарат і логічну

організацію системи, які необхідні для проведення комп'ютерного моделювання в третьому розділі, а також для обґрунтованого вибору сенсорів, параметрів зйомки та методів обробки даних.

РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МУЛЬТИСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН

3.1 Створення синтетичної сцени для моделювання

Для дослідження роботи мультисенсорної оптико-електронної системи було створено штучну (синтетичну) сцену у середовищі Matlab, що імітує фрагмент поверхні ґрунту з розміщеною на ньому протипіхотною міною (Дод.А). Такий підхід дозволяє проводити експерименти у контрольованих умовах, змінювати параметри поверхні, освітлення та сенсорів, а також досліджувати ефективність алгоритмів виявлення без роботи з реальними небезпечними об'єктами.

3.1.1 Характеристики телевізійного та тепловізійного каналів

У процесі моделювання роботи мультисенсорної системи було необхідно врахувати типові параметри телевізійних та інфрачервоних сенсорів, з якими працюють сучасні роботизовані комплекси гуманітарного розмінування. Оскільки в роботі використовується синтетична сцена, характеристики сенсорів були підібрані на основі відкритих технічних специфікацій комерційно доступних камер, що забезпечує реалістичність моделювання.

— Телевізійний канал (RGB-камера)

Для моделювання було прийнято характеристики, що відповідають поширеним модулям машинного зору, а саме камерам типу Sony IMX219 [41].

Табл. 3.1 – Характеристики телевізійного каналу

Тип матриці	CMOS
Роздільна здатність	1280 × 720
Розмір пікселя	1.12–1.5 мкм
Динамічний діапазон	~65–70 дБ
Частота кадрів	30 fps
Спектральний діапазон чутливості	400–700 нм
Тип об'єктива	фіксований фокус, ЕФР 6–8 мм

Ці параметри визначають просторове розділення, рівень шуму та деталізацію сцени, що впливає на якість RGB-складової у процесі злиття зображень.

— Тепловізійний канал (IR-камера)

Для моделювання було прийнято характеристики, подібні до популярних тепловізійних модулів, таких як FLIR Lepton 3.5 [42].

Табл. 3.2 – Характеристики тепловізійного модуля

Тип детектора	неохолоджуваний мікроболометр
Роздільна здатність	320 × 240 пікселів
Розмір пікселя	12–17 мкм
Чутливість (NETD)	< 50 мК
Частота кадрів	30 fps
Спектральний діапазон	8–14 мкм
Динамічний діапазон температур	–10...+140 °C
Тип оптики	германієва лінза, фокусна відстань 3–6 мм

Саме ця група параметрів визначає теплову контрастність об'єктів сцени та рівень шуму, характерний для ІЧ-каналу, що було враховано при генерації синтетичної теплової карти та подальшому злитті даних.

3.1.2 Параметри моделювання сенсорів та сцени

Для забезпечення відтворюваності експериментів було визначено параметри синтетичної сцени та сенсорних каналів, що використовуються у моделюванні. Вони включають:

- Просторове розділення RGB-каналу: 512×512 пікселів.
- Просторове розділення ІЧ-каналу: 512×512 пікселів (з урахуванням теплового шуму).
- Модель шуму: до RGB-каналу додано невелике зерно шуму, до

- інфрачервоного — адитивний Gaussian noise, що імітує неоднорідність теплового поля [43].
- GSD: умовно прийнято 1–3 см/піксель, що відповідає низьковисотній зйомці з UGV або БПЛА [44], [45].
- Температурний контраст: різниця між фоном і міною моделювалася у межах 5–10%, що відповідає реальним умовам пасивної інфрачервоної зйомки.
- Альbedo фону та об'єкта: для RGB-каналу змодельовано різні коефіцієнти відбивання, що дозволяє оцінити вплив текстури ґрунту на якість виявлення [46].

Ці параметри забезпечили можливість проведення стабільного та контрольованого порівняння методів злиття мультисенсорних даних.

3.1.3 Формування фону сцени (ґрунтової поверхні)

На першому етапі було змодельовано текстуру ґрунту, яка відтворює природну неоднорідність поверхні. Для цього було згенеровано шумову структуру з подальшим згладжуванням та нормалізацією. Такий підхід дозволяє наблизити вигляд поверхні до реальних ґрунтових ділянок, де спостерігаються дрібні варіації яскравості, зернистість і локальні нерівності.

Отримане зображення на рис.3.1 використовується як базовий фон сцени.

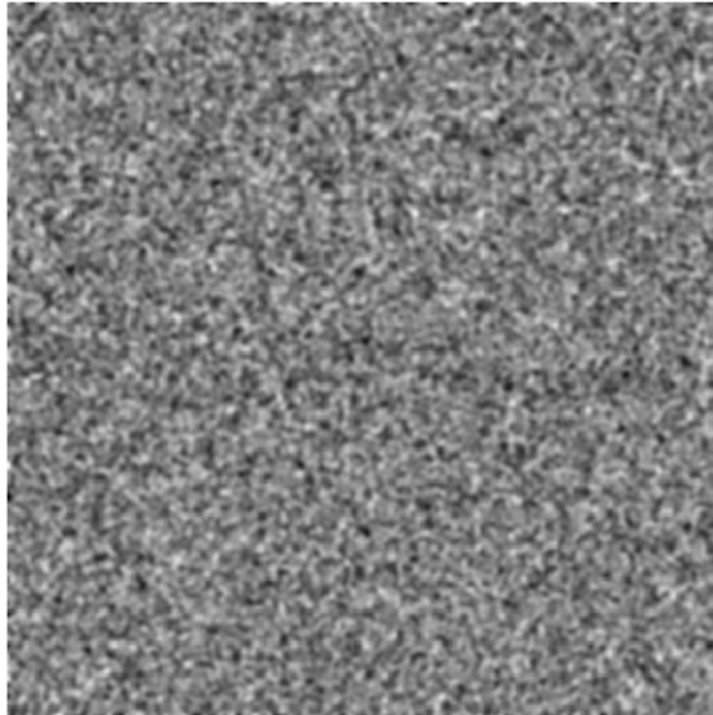


Рисунок 3.1 — Синтетична текстура ґрунту

3.1.4 Додавання моделі міни до сцени

Після формування фону було змодельовано об'єкт-аномалію — корпус типового вибухонебезпечного предмета, що зображено на рис.3.2. Міну представлено у вигляді круглої області з фіксованим радіусом та заданими координатами центру. Її інтенсивність було змінено відносно фону, щоб створити характерний оптичний контраст. Така модель дозволяє оцінити, наскільки добре алгоритми можуть виявити об'єкт, який лише незначно відрізняється від навколишньої поверхні.

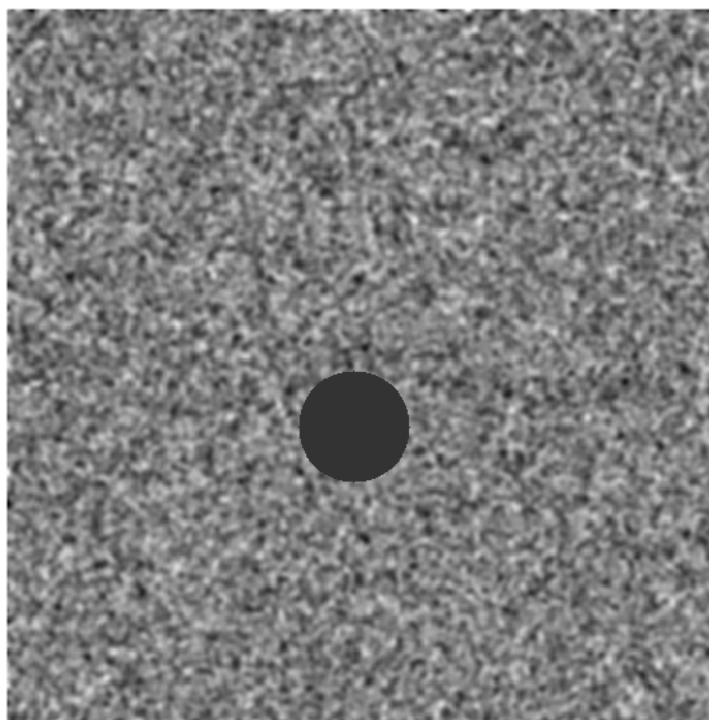


Рисунок 3.2 — Оптична сцена: ґрунт із розміщеною міною

3.1.5 Формування RGB-зображення

Для імітації вихідного сигналу телевізійної камери створене оптичне зображення було перетворене у трьохканальне RGB-представлення. Кольорові канали сформовано таким чином, щоб відтворити природний відтінок ґрунту та зберегти візуально розпізнавану структуру поверхні. Отримане на рис. 3.3 зображення відповідає типовому вигляду сцени, яку може зафіксувати камера видимого діапазону на безпілотному літальному апараті або наземній роботизованій платформі.

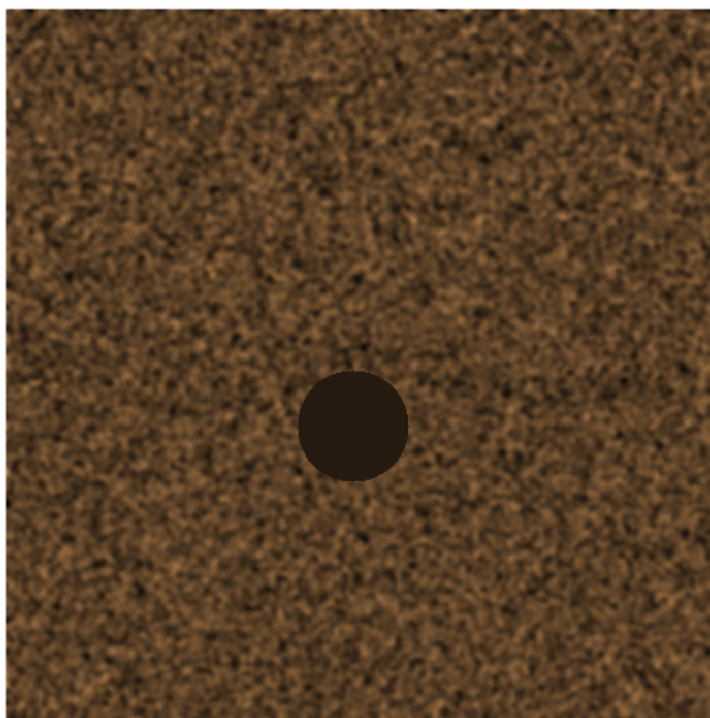


Рисунок 3.3 — RGB-зображення синтетичної сцени

3.1.6 Формування інфрачервоного (ІЧ) зображення

Окремо було змодельовано теплову картину поверхні. Для цього кожній точці сцени було призначено температуру, що відповідає середній температурі ґрунту з урахуванням природної випадкової варіації. Ділянка, де розташована міна, отримала підвищену температуру, що відображає реальний фізичний ефект: матеріал корпусу міни має інші теплові властивості, ніж навколишній ґрунт, і тому нагрівається та охолоджується інакше.

На основі температурної карти було сформовано інфрачервоне зображення. Для підвищення його реалістичності до моделі додано:

- тепловий шум сенсора,
- неоднорідність теплового поля,
- оптичне розмиття, характерне для матриць тепловізорів,
- кольірну палітру, аналогічну до тепловізорів FLIR (типу *hot colormap*), що дозволяє відобразити градування температур у вигляді кольорів.

Це забезпечило максимально наближене відтворення того, як реальна ІЧ-

камера реєструвала б поверхню з міною.

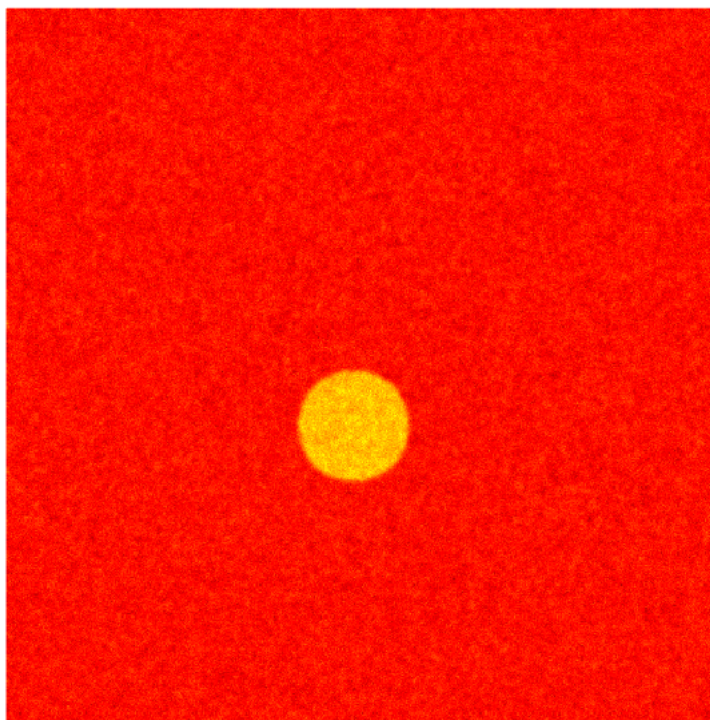


Рисунок 3.4 — ІЧ-зображення синтетичної сцени

3.2 Побудова моделі обробки та підготовки даних у Simulink

Для подальшої реалізації процесу мультисенсорного злиття було створено модель у середовищі Simulink (рис. 3.5), яка виконує попередню обробку даних від двох джерел — RGB-камери та інфрачервоного (ІЧ) каналу. Цей етап є необхідним для забезпечення коректного об'єднання зображень, оскільки різні сенсори мають різні формати, діапазони значень та типи представлення даних.

3.2.1 Завантаження вхідних зображень

У моделі використовуються дві синтетичні сцени, отримані на попередньому етапі:

- `model_rgb.png` — зображення у видимому спектрі, що симулює вихід RGB-камери;
- `model_ir.png` — інфрачервоне зображення, що моделює тепловий канал.

Завантаження цих даних у Simulink здійснюється за допомогою блоків *Image From File*. Це дозволяє працювати з реальними графічними файлами як із сигналами в рамках моделі.

3.2.2 Перетворення RGB-контенту у інтенсивність

Оскільки подальші алгоритми злиття базуються на аналізі яскравості та структурних характеристик, RGB-зображення проходить перетворення у формат інтенсивності (grayscale). Для цього використовується блок *RGB to Intensity*, який виконує лінійну комбінацію кольорових каналів відповідно до стандартної моделі яскравості:

$$I = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B.$$

Таким чином отримується одноканальне зображення, придатне для обробки у спільному просторі яскравості разом із ІЧ-даними.

3.2.3. Нормалізація даних

Обидва канали — і RGB-інтенсивність, і ІЧ-зображення — конвертуються у формат *double*.

Це дозволяє:

- забезпечити однаковий числовий діапазон значень;
- уникнути втрат інформації під час обчислень;
- коректно застосовувати математичні операції всередині користувацького функціонального блоку.

3.2.4 Блок злиття даних (Fusion)

Перед застосуванням методів злиття для обох каналів було виконано низку процедур попередньої обробки, спрямованих на покращення якості сигналу:

- Згладжування ІЧ-каналу за допомогою Gaussian-фільтра для зменшення

високочастотного шуму.

- Переведення RGB та IR зображень у спільний діапазон яскравостей шляхом нормалізації гістограм.
- Видалення фонів, що торкаються межі зображення (алгоритм border clearing), що запобігає хибному визначенню яскравих артефактів як потенційних мін.
- Маскування перенасичених областей, якщо інтенсивність перевищує допустимий поріг (наприклад, через маркування або бликові плями).
- Стандартизація розмірів каналів для забезпечення коректної передачі сигналів у блок злиття.

Таке попереднє опрацювання дозволяє покращити стабільність алгоритмів злиття та зменшити кількість хибних спрацювань.

Підготовлені зображення надходять до функціонального блоку F_{cn} , який реалізує алгоритм злиття. У межах цього дослідження блок виконує комбінування двох каналів за заданим правилом (метод визначено у наступному підрозділі). Обчислення проводяться над двома вхідними матрицями:

- $img1$ — перетворене RGB-зображення;
- $img2$ — ІЧ-канал.

У результаті формується інтегроване зображення, що поєднує структурні характеристики оптичного каналу та теплову інформацію інфрачервоного.

3.2.5 Формування вихідного кадру

Оскільки результати злиття можуть містити значення у форматі *double*, на завершальному етапі зображення перетворюється у формат *uint8*. Це дає можливість використовувати інтегроване зображення як стандартне цифрове зображення, зберігати його у файл або передавати на подальші етапи аналізу.

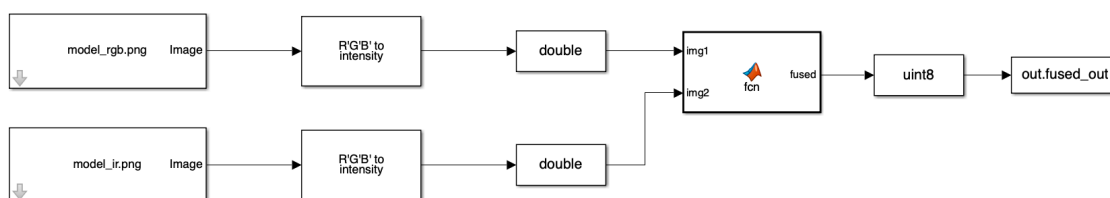


Рисунок 3.5 — Модель попередньої обробки RGB та ІЧ-даних у Simulink

3.3 Злиття інформації

3.3.1 Результат моделювання методом усереднення каналів

У початковому варіанті алгоритму злиття в Simulink використовувалося просте усереднення каналів RGB та IR:

$$f = \frac{I_{RGB} + I_{IR}}{2}$$

Такий підхід зберігав лише базовий рівень інформативності: структура фону передавалася коректно, однак теплові сигнатури мін помітно згладжувалися, а динамічний діапазон результату звужувався, що можна побачити на рисунку 3.6.

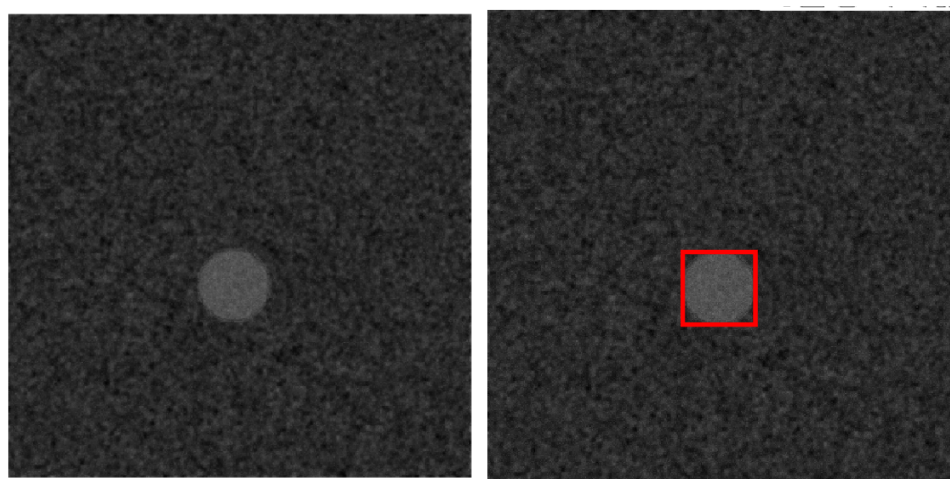


Рисунок 3.6 - Результат моделювання методом усереднення каналів

3.3.2 Результат моделювання методом максимального інтенсивного злиття

Для забезпечення кращого результату було реалізовано комплекс модифікацій, спрямованих на підвищення інформативності злитого зображення:

— Нормалізація кожного каналу

Обидва зображення приводяться до діапазону $[0; 1]$, що усуває перекоси масштабів між RGB та IR, запобігає «засвічуванню» або затемненню результату та забезпечує коректність подальшого злиття.

— Використання max-fusion компоненти:

$$M = \max(I_{RGB}, I_{IR})$$

Це гарантує збереження теплових максимумів, більш чітку передачу сигнатур мін та відсутність їх згладжування, як це відбувалось при усередненні.

— Додавання текстурної компоненти:

$$T = 0.3 \cdot I_{IR} + 0.7 \cdot I_{RGB}$$

Це дозволяє підсилити структуру ґрунту з RGB, одночасно зберегти невеликий внесок IR для локальної контрастності та уникнути «провалів» у плоскі області.

Результат модернізованого моделювання зображено на рис.3.7.

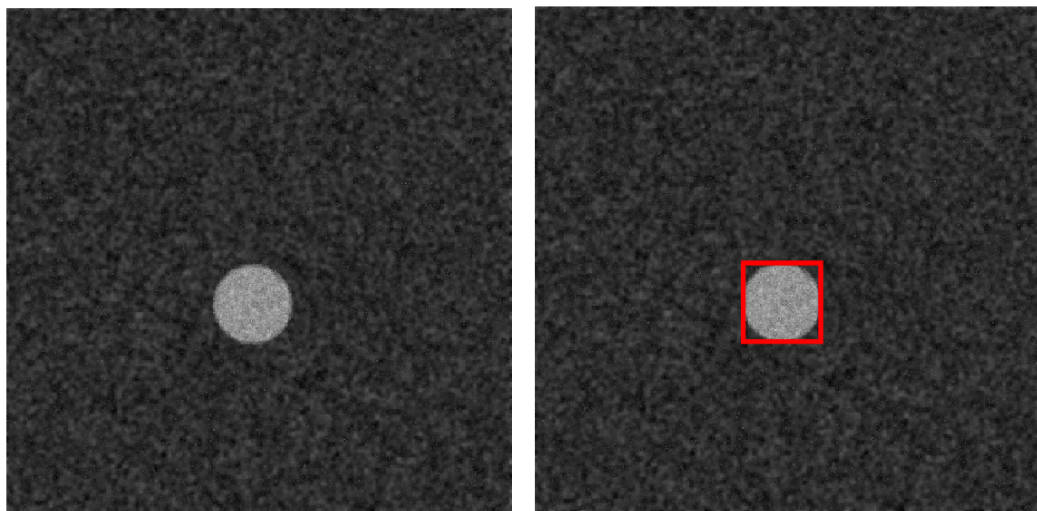


Рисунок 3.7 - Результат моделювання методом максимального інтенсивного
ЗЛИТТЯ

3.3.3 Результат моделювання методом Wavelet

Для підвищення інформативності комбінованого зображення телевізійного та інфрачервоного каналів було також застосовано метод злиття на основі дискретного вейвлет-перетворення (DWT). Дискретне вейвлет-перетворення дозволяє розкласти зображення на піддіапазони частот, що відповідають його апроксимаційним компонентам (низькочастотна складова) та деталям по горизонталі, вертикалі та діагоналі (високочастотні складові). Такий підхід забезпечує можливість незалежної обробки структурної інформації та локальних змін інтенсивності, що є важливим для задач виявлення температурних аномалій на фоні текстурованої поверхні.

Кожне з двох вхідних зображень (телевізійного та інфрачервоного каналів) було піддане двовимірному дискретному вейвлет-перетворенню з використанням вейвлета Daubechies 2-го порядку. У результаті кожне зображення було подано у вигляді чотирьох матриць коефіцієнтів: SA (апроксимаційна складова), SH (горизонтальні деталі), SV (вертикальні деталі) та SD (діагональні деталі). Після цього здійснювалося злиття відповідних компонент обох каналів шляхом вибору максимальних значень коефіцієнтів, що дозволяє зберегти найбільш інформативні елементи структури та температурного розподілу. Особлива увага приділялася апроксимаційній складовій, оскільки саме вона містить низькочастотну інформацію, пов'язану з тепловими аномаліями. Для підсилення теплових сигнатур мін було використано додатковий коефіцієнт масштабування SA-компоненти, що забезпечило збільшення контрастності теплових областей без суттєвого впливу на деталізацію фону.

Після виконання операцій злиття було здійснено зворотне вейвлет-перетворення (IDWT) для реконструкції зображення у просторовій області. В отриманому зображенні на рис.3.4 поєднуються текстурні характеристики телевізійного каналу та теплові особливості інфрачервоного, при цьому зберігається чіткість контурів і підсилюється відносний тепловий контраст мін.

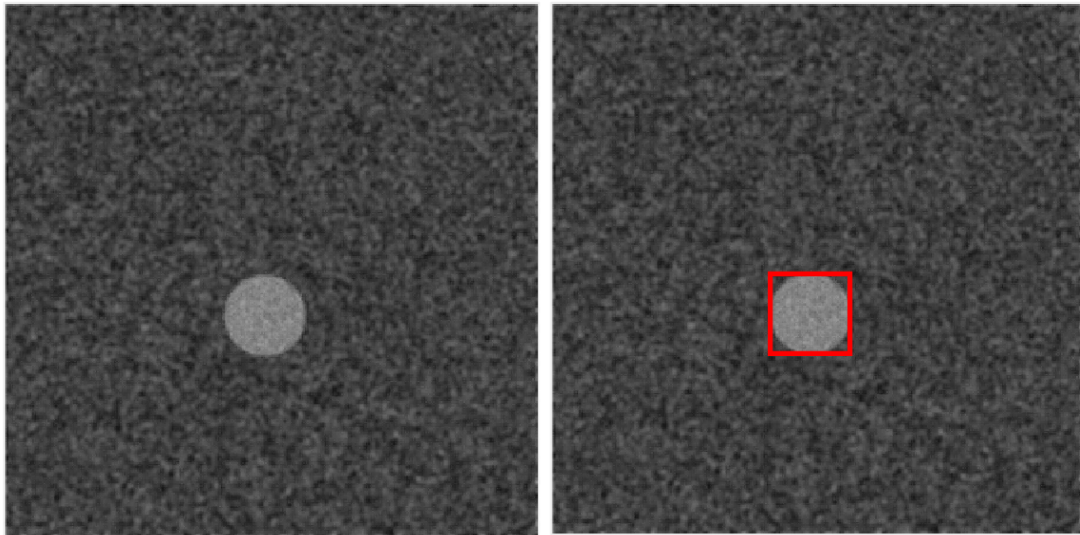


Рисунок 3.8 - Результат моделювання методом Wavelet

3.4 Аналіз інтенсивнісних гістограм для оцінки ефективності методів злиття зображень

Для кількісної оцінки інформативності різних сенсорних каналів та методів їх злиття було проведено аналіз гістограм інтенсивності. Гістограма відображає розподіл яскравісних значень пікселів у зображенні та дозволяє встановити, наскільки добре окремі області (зокрема, теплова аномалія, що відповідає міні) виділяються на фоні. Висока концентрація значень у певному діапазоні свідчить про однорідність сцени, тоді як наявність окремих піків або відгалужень вказує на присутність об'єктів, що суттєво відрізняються від фону.

У рамках дослідження було проаналізовано п'ять гістограм, що зображені на рис. 3.9, що відповідають:

- RGB-каналу,
- ІЧ-каналу,
- злиттю методом усереднення,
- злиттю типу MAX-fusion із нормалізацією та текстурною складовою,
- вейвлет-злиттю,

Отримані результати дозволили зробити низку важливих висновків.

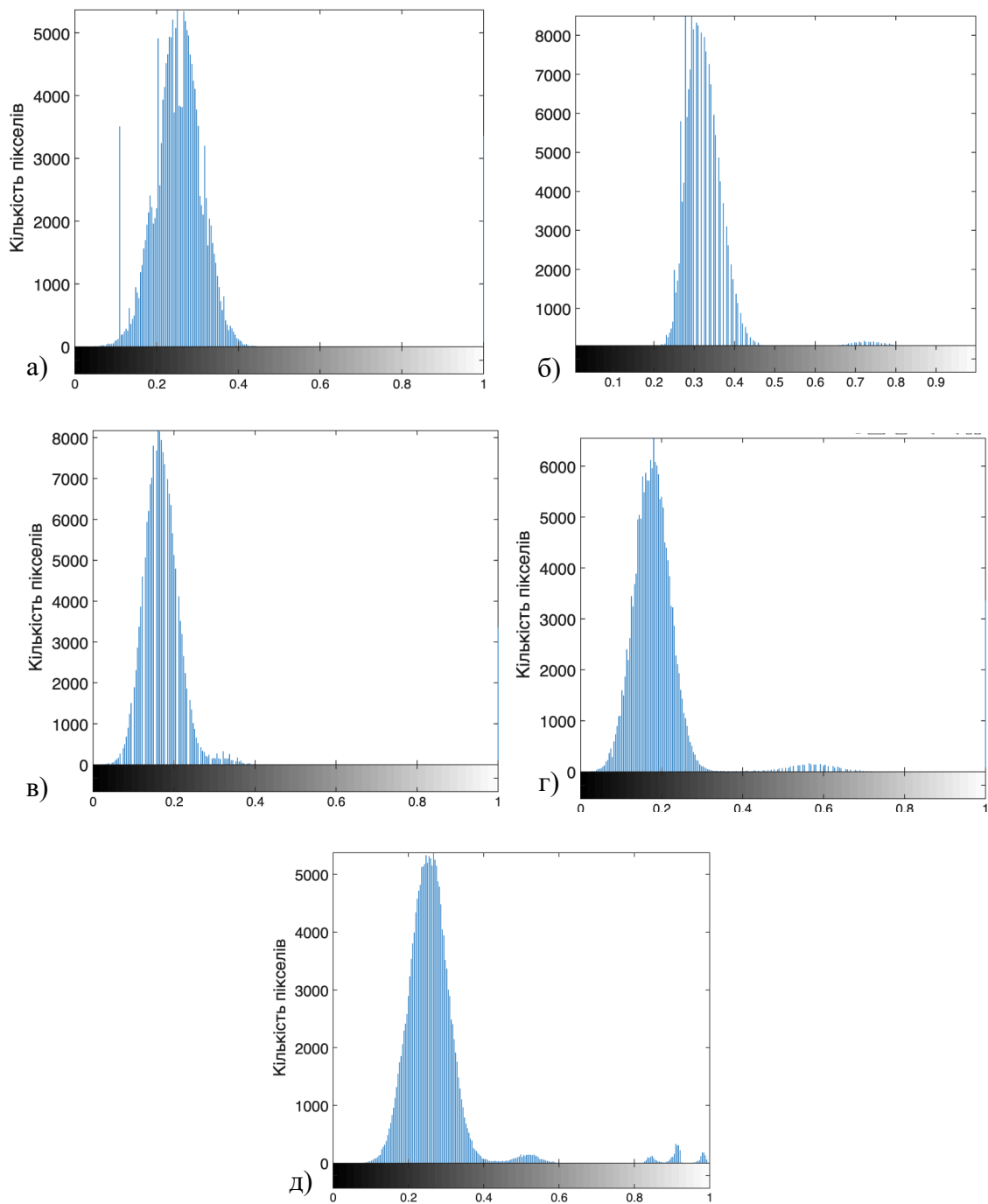


Рисунок 3.9 - Гістограми, що відповідають: а) RGB-каналу; б) ІЧ-каналу; в) злиттю методом усереднення; г) злиттю типу MAX-fusion із нормалізацією та текстурною складовою; д) вейвлет-злиттю.

Гістограма RGB-зображення містить один різко виражений вузький пік у межах низьких інтенсивностей. Це свідчить про низький контраст сцени у видимому діапазоні. Міна не формує окремого кластера яскравостей і тому практично не відрізняється від фону. Таким чином, RGB-канал має обмежену

цінність для задачі детектування мін.

Гістограма інфрачервоного зображення демонструє наявність основного піка (температура ґрунту) та невеликого, але чітко відокремленого другого піка, що відповідає тепловій аномалії — міні. Незважаючи на значний шум та обмежений динамічний діапазон, саме ІЧ-канал забезпечує найбільш явне виділення об'єкта. Це підтверджує доцільність використання температурної інформації як базової ознаки для виявлення мін.

Гістограма злиття шляхом усереднення демонструє один домінуючий пік без помітних додаткових кластерів. Теплові відмінності пригнічуються, а контраст між об'єктом і фоном суттєво знижується. Це означає, що *average fusion* фактично "розмиває" теплову аномалію та є найменш ефективним для задачі детектування.

Гістограма *MAX-fusion* містить додаткові піки в області високих інтенсивностей, яких не було у попередніх методах. Це свідчить про покращене виділення аномальних ділянок, зокрема теплової сигнатури міни. Текстурний компонент сприяє збереженню деталей фонового зображення, підвищуючи наочність структури сцени.

Вейвлет-злиття забезпечило найкращий баланс між структурною інформацією RGB-каналу та тепловою інформацією ІЧ-каналу. Його гістограма демонструє не лише розширений основний пік (завдяки збереженню текстур), але й наявність відокремленого піка, що відповідає об'єкту. Це означає, що метод зберігає як просторові частоти, так і теплові аномалії, що робить його одним з найбільш придатних для подальшої сегментації та автоматичного виявлення мін.

3.5 Застосування методів злиття на реальних зображеннях

Для практичної реалізації методів виявлення наземних мін було сформовано набір вихідних зображень на рис. 3.10, що містить два типи даних: звичайні телевізійні зображення (RGB) та теплові зображення у діапазоні LWIR.

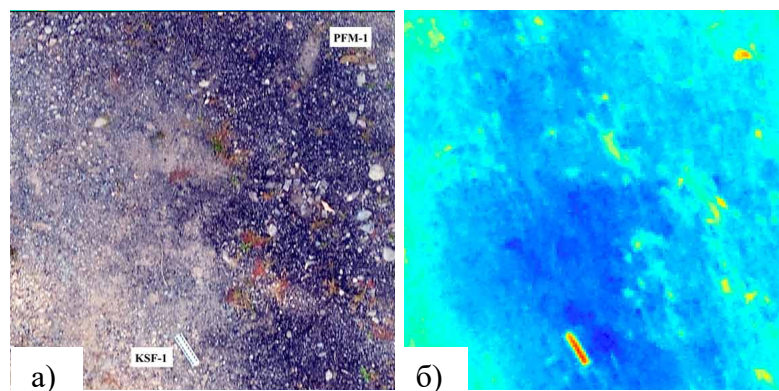


Рис.3.10 – а) Телевізійне зображення мін; б) Теплове зображення[47]

Важливо підкреслити, що перед виконанням моделювання було забезпечено відповідність розмірів, масштабів та типів даних вхідних зображень, що унеможливило появу некоректних значень під час моделювання. Така архітектура дозволила оцінити поведінку алгоритму у відтворюваному середовищі без впливу сторонніх факторів.

3.5.1 Результат моделювання методом усереднення каналів

Усереднення послаблювало інтенсивні теплові відмінності, через що об'єкти KSF-1 та особливо PFM-1 ставали менш виразними. Результат моделювання можна побачити на рис. 3.11.

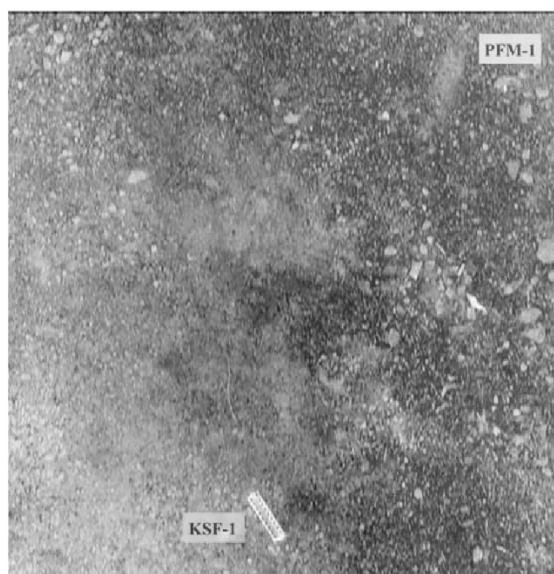


Рисунок 3.11 – Результат моделювання методом усереднення каналів

3.5.2 Результат моделювання методом максимального інтенсивного злиття

Метод максимального інтенсивного злиття дозволив підсилити структуру ґрунту з RGB, одночасно зберегти внесок IR для локальної контрастності. Результат моделювання зображено на рис. 3.12.

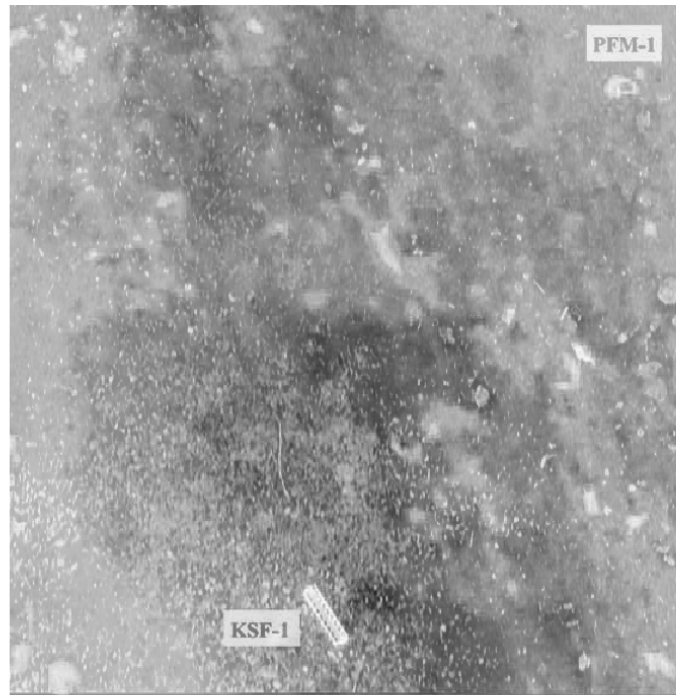


Рисунок 3.12 – Результат модернізованого моделювання

3.5.3 Результат моделювання методом Wavelet

Метод Wavelet виявився ефективним для покращення локальної інформативності сцени, особливо в умовах, коли теплові об'єкти мають слабку амплітуду або частково зливаються з фоном.

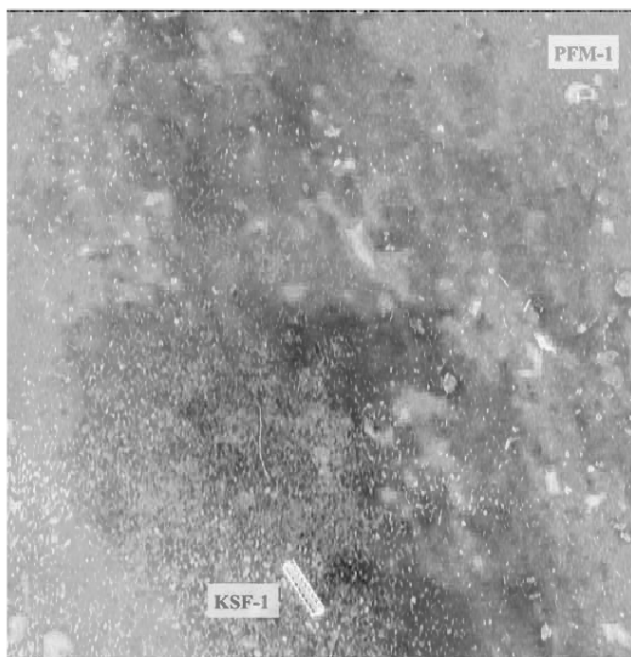


Рисунок 3.13 - Результат моделювання методом Wavelet

3.5.4 Аналіз результатів злиття та фізичне пояснення різної видимості мін

Отримані результати моделювання показали, що метод максимального інтенсивного злиття та Wavelet суттєво підсилює теплову сигнатуру міни KSF-1, тоді як контрастність міни PFM-1 зростає незначно. Така нерівномірність у якості виявлення не є наслідком програмної або математичної помилки — вона обумовлена реальними фізичними властивостями об'єктів, що впливають на їх інфрачервону помітність.

KSF-1 характеризується більшою масою та виготовлена з матеріалу з вищою теплопровідністю, ніж природний ґрунт. Це призводить до:

- швидших процесів нагрівання/охолодження,
- формування чіткого теплового перепаду відносно фону,
- виокремлення добре помітної термографічної плями на ІЧ-зображенні.

Натомість PFM-1 ("метелик") виготовлена зі звичайного полімерного матеріалу, теплопровідність якого близька до теплопровідності ґрунту [48]. Тому її температура швидко вирівнюється з навколишньою поверхнею, що робить

тепловий контраст мінімальним. Для ІЧ-камери така міна стає практично «невидимою».

Крім того, PFM-1 має пласку та розгалужену геометрію, що збільшує площу її теплового контакту з ґрунтом. Це сприяє інтенсивному теплообміну та зменшує локальні температурні відхилення.

У свою чергу, KSF-1 торкається ґрунту точково, має повітряні проміжки під корпусом і акумулює тепло інакше, ніж поверхня. Це створює аномалію, яку ІЧ-сенсор фіксує значно краще.

Крім того, під час аналізу результатів автоматичного виділення мін за температурними максимумами було встановлено, що алгоритм некоректно визначив кілька областей на зображенні як потенційні об'єкти. Зокрема, система обвела прямокутниками білі текстові написи та інші яскраві артефакти, які не мають стосунку до реальних мін, що можна побачити на рис. 3.14.

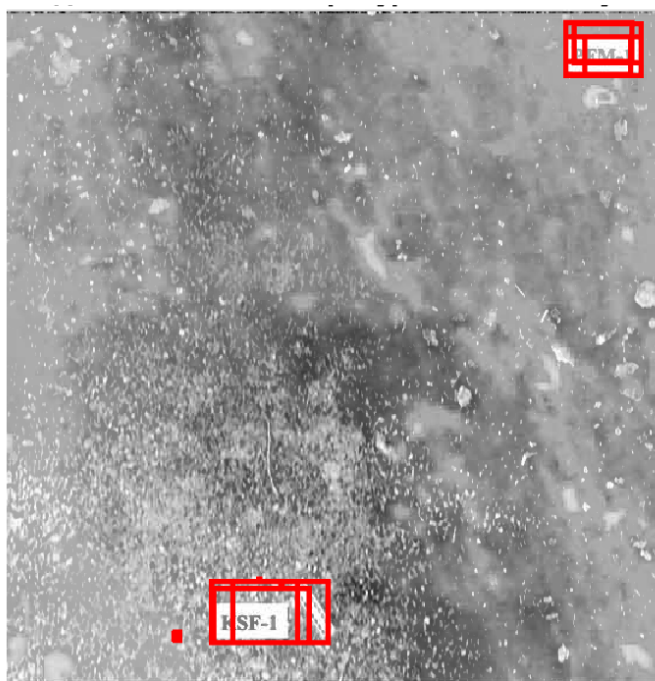


Рисунок 3.14 – Хибне спрацювання детектування потенційних мін

Це відбулося через те, що метод детектування, побудований на пошуку локальних температурних максимумів, реагує на будь-які області підвищеної інтенсивності. На представленому зображенні такі області виникають не лише в

місцях розташування мін, але й у зонах з:

- високою відбивною здатністю поверхні;
- білими маркувальними написами;
- локальними перевисвітленнями сенсора.

Візуальні елементи з високою яскравістю мають значення інтенсивності, співставні або навіть вищі, ніж температурні сигнатури мін, тому алгоритм помилково класифікує їх як потенційні об'єкти. Це призводить до появи хибних спрацювань та надлишкових областей обведення.

Такий результат підкреслює необхідність подальшої оптимізації алгоритму, зокрема:

- введення маскування високояскравісних текстових фрагментів;
- використання просторових ознак (форма, розмір, круглість);
- застосування обмеження на мінімальний та максимальний розмір температурної аномалії;
- комбінування температурної інформації з іншими сенсорними каналами.

Таким чином, наявні хибні обведення пояснюються не відсутністю температурної різниці між мінною та фоном, а присутністю сторонніх яскравих об'єктів, що порушують чистоту температурного профілю сцени.

3.6 Обмеження моделі мультисенсорного виявлення

Попри ефективність запропонованої моделі, під час моделювання було виявлено низку обмежень, що можуть впливати на точність детектування:

- Яскраві маркувальні написи та високовідбивні об'єкти можуть створювати інтенсивності, подібні до температурних максимумів, що призводить до хибних спрацювань.
- Синтетична сцена є спрощеною, і не враховує дрібні неоднорідності ґрунту, тіньові ефекти, вологість та динамічні зміни температури.
- Тепловий контраст може значно змінюватися залежно від часу доби, що

ускладнює використання однієї моделі пороговування.

- Відсутність моделі рослинності у синтетичній сцені спрощує задачу й не відображає реальних умов гуманітарного розмінування.
- Похибки злиття можуть збільшуватися при різних GSD, особливо при знятті з великої висоти.

Урахування цих обмежень є важливим для переходу від моделювання до створення прототипу системи.

Висновок до розділу

У третьому розділі було виконано комп'ютерне моделювання мультисенсорної системи виявлення наземних мін, що поєднує телевізійний (RGB) та інфрачервоний (ІЧ) канали. На основі створеної синтетичної сцени сформовано набір тестових даних, які відтворюють характерні прояви теплового та оптичного контрасту між міною та фоновною поверхнею ґрунту. За допомогою середовища MATLAB/Simulink побудовано програмну модель обробки, що включає етапи завантаження даних, перетворення інтенсивності, нормалізації, злиття каналів трьома методами (усереднення, MAX-fusion, вейвлет-злиття) та формування вихідного кадру.

Експериментальні результати показали суттєву відмінність у поведінці методів злиття. Усереднення каналів призводить до пригнічення теплової аномалії та майже повної втрати інформативності щодо мін. MAX-fusion покращує контраст між міною та фоном, але може створювати надлишкові яскравісні артефакти. Найбільш ефективним методом виявилось Wavelet-злиття, яке забезпечило оптимальний баланс між структурними характеристиками RGB-зображення та температурними максимумами ІЧ-каналу.

Аналіз гістограм підтвердив отримані спостереження: лише вейвлет-злиття формує окремий кластер інтенсивностей, що відповідає тепловій сигнатурі міни, тоді як RGB-канал та усереднення практично не дозволяють її виокремити. Додатково встановлено, що на реальних зображеннях хибні спрацювання можуть

виникати через наявність яскравих текстурних елементів і маркувань, які створюють пік інтенсивності, близький до теплових максимумів.

Отже, проведене моделювання підтвердило доцільність використання мультисенсорного підходу та застосування методів злиття збереженням просторово-частотної інформації (зокрема, вейвлет-методу) для задачі автоматизованого виявлення наземних мін.

Окремим перспективним напрямом розвитку є застосування нейромережевих методів аналізу зображень, зокрема CNN та U-Net, які здатні автоматично навчатися особливостям теплових і текстурних ознак мін [41]. Використання таких моделей може суттєво підвищити точність сегментації та зменшити кількість хибних спрацювань у складних польових умовах.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ НА ТЕМУ: «МУЛЬТИСЕНСОРНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН»

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

Стартап-проект спрямований на створення інноваційної комп'ютерно-інтегрованої оптико-електронної системи, яка забезпечує автоматизоване дистанційне виявлення поверхневих протипіхотних мін за допомогою поєднання RGB-зйомки, інфрачервоної термографії та гіперспектрального аналізу. Система передбачає встановлення мультисенсорного модуля на безпілотні літальні апарати або наземні роботизовані платформи та подальшу обробку отриманих даних алгоритмами аналізу зображень та методами злиття інформації.

Концепція проекту логічно базується на результатах попередніх досліджень (розділи 1–3), де було визначено найбільш інформативні діапазони спостереження, математичні моделі теплового контрасту та принципи мультисенсорного комплексування даних.

У стартап-проекті ці результати трансформуються в практичний технологічний продукт, здатний працювати в реальному середовищі та забезпечувати високу точність детектування мін без присутності людини у небезпечній зоні.

Суть ідеї полягає у створенні інтелектуальної платформи, яка автоматично:

- збирає дані з декількох сенсорів;
- виконує фільтрацію та калібрування сигналів;
- аналізує оптичні, спектральні та теплові ознаки;
- приймає рішення щодо наявності поверхневих мін;
- формує карту небезпечних ділянок у режимі реального часу.

Таким чином, стартап пропонує перетворити традиційний ручний процес розмінування на автоматизовану систему дистанційного спостереження, що мінімізує ризики для людей, скорочує час обстеження територій та підвищує точність виявлення мін різних типів.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для користувачів
Створення мультисенсорної комп'ютерно-інтегрованої системи дистанційного виявлення поверхневих мін, яка поєднує RGB-зйомку, інфрачервону термографію та гіперспектральний аналіз з алгоритмами злиття даних (Fusion).	Військові операції	Підвищення безпеки під час розмінування, зменшення ризику для саперів
	Гуманітарні місії	Прискорення процесу очищення територій від мін
	Дослідницькі установи	Аналіз спектральних характеристик для розробки нових методів виявлення небезпечних об'єктів

Основна перевага запропонованої системи – комбінація різних сенсорних каналів та їхня синхронна обробка, що дозволяє значно підвищити точність класифікації об'єктів і зменшити кількість хибних спрацювань. Далі у табл 4.2. було проведено техніко-економічне порівняння проєкту з існуючими рішеннями.

Таблиця 4.2 – Техніко-економічне порівняння проєкту з існуючими рішеннями

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари / концепції конкурентів	Мій проєкт	MineWolf Sensor Suite / FLIR Systems	SpectralVision Defense / HyperSpec Labs	W	N	S
1	Інтеграція з різними типами сенсорів (TV, IR, HSI, LiDAR)	Обмежена	Універсальна інтеграція	Працює лише з власними сенсорами	Інтеграція лише з HSI-системами			S
2	Швидкість аналізу та обробки даних	Висока	Висока (реальний час)	Середня	Висока			S
3	Робота у реальному часі	Часткова підтримка	Повноцінна підтримка	Підтримка з обмеженнями	Відсутня		N	
4	Комплексний ф'южн мультисенсорних даних	Відсутній або базовий	Повний ф'южн	Лише термальні + RGB	Лише спектральний аналіз			S
5	Гнучке налаштування під нові типи ґрунтів і умов	1–2 тижні	1–3 дні	До 1 місяця	Відсутнє			S

Порівняльний аналіз індикаторів показав, що запропонована мультисенсорна

оптико-електронна система значно переважає існуючі аналоги за ключовими техніко-економічними параметрами. Найбільші переваги проєкту – універсальна інтеграція з різними типами сенсорів, висока швидкість аналізу, повна підтримка роботи в реальному часі та наявність комплексного ф'южну даних. Крім того, система здатна швидко адаптуватися до нових умов середовища, що є критично важливим для виявлення мін у змінних польових ситуаціях. Конкуренти мають часткову або обмежену функціональність, що підкреслює конкурентні переваги розробленої технології та її перспективність на ринку.

Для визначення технічної здійсненності системи було проведено аудит доступних технологій, результати якого наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проєкту

Зміст ідеї	Технології реалізації	Наявність	Доступність
Мультисенсорна ОЕС	ТВ-камери, тепловізори, LiDAR, HSI-модулі	Технології існують, потребують інтеграції	Частково доступні
Обробка даних	Алгоритми ф'южн, CNN, класифікація	Алгоритми існують, потребують адаптації	Доступні
Управління системою	Python, C++, MATLAB, ROS	Наявні	Доступні
Моделювання сцени	Симулятори MATLAB/Simulink, ANSYS	Наявні	Доступні
Прототипування	3D-моделювання, тестові полігони	Наявні	Доступні

Отримані дані свідчать, що всі основні технології, необхідні для реалізації проєкту, вже існують і є доступними на ринку, хоча деякі з них потребують адаптації та інтеграції. Це підтверджує технічну здійсненність стартапу та створює підґрунтя для подальших етапів розробки і прототипування.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Наступним етапом проведено оцінку ринкових умов, що визначають можливості виходу стартапу на ринок технологій розмінування. Аналіз включає ключові показники, такі як кількість конкурентів, обсяги продажів, специфічні вимоги та бар'єри входження. Узагальнені характеристики ринку наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Попередні характеристики ринку

Показник	Характеристика
Кількість основних гравців	3–4
Обсяг продажів	~2000 одиниць на рік
Динаміка ринку	Зростаюча
Обмеження	Сертифікація, патентний захист
Специфічні вимоги	Перевірка точності, безпечність роботи
Середня норма прибутку	~85 %

Результати аналізу демонструють, що ринок технологій розмінування є перспективним та характеризується зростаючим попитом, зумовленим актуальністю розмінування територій України та інших регіонів. Незважаючи на наявність сертифікаційних та регуляторних обмежень, ринок залишається відкритим до інноваційних рішень, що створює сприятливі умови для запуску стартапу.

Далі було проведено аналіз потреб користувачів та специфічних вимог різних груп, які можуть бути зацікавлені у впровадженні мультисенсорної системи виявлення наземних мін. Враховано поведінкові особливості клієнтів, їхні ключові пріоритети та умови експлуатації обладнання. Узагальнені результати подано в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Особливості потенційних клієнтів

Потреба	Цільова аудиторія	Поведінкові особливості	Вимоги
Автоматизація виявлення мін	Військові, ДСНС	Потребують швидкості та точності	Робота в реальному часі
Моніторинг та дослідження	Наукові установи	Потребують адаптації під нові сцени	Гнучкі налаштування

Державні та військові організації зацікавлені в точному та швидкому виявленні мін для безпеки територій. Вимоги включають високу точність, швидкість аналізу та надійність системи, що є критичним для застосування у польових умовах.

Науково-дослідні організації та екологічні компанії потребують технології, що дозволяє здійснювати моніторинг та аналіз стану навколишнього середовища, виявляючи мінні загрози для екології. Вони очікують на гнучкість у налаштуваннях та інтеграцію з іншими дослідницькими системами.

Система мультисенсорного підходу аналізу має великий потенціал для успішного запуску на ринку завдяки високому попиту на точні та швидкі технології для виявлення мін. Продукт має бути адаптований під конкретні потреби різних клієнтських груп, що дозволить ефективно зайняти нішу на ринку та підвищити конкурентоспроможність. Основними напрямками просування продукту є співпраця з державними і військовими організаціями, а також науковими та екологічними установами, що мають потребу в точному моніторингу. Таким чином, стартап має вигідні перспективи для реалізації та інтеграції на ринку, враховуючи високу прибутковість, розвиток ринку та значний попит.

При ринковому впровадженні існують певні загрози, які можуть вплинути на успіх реалізації проєкту. Для їх мінімізації важливо враховувати потенційні ризики та визначити ефективні стратегії для протидії їм. Результати аналізу наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

Фактор	Загроза	Реакція
Поява нових технологій	Імовірне застаріння	Постійні оновлення
Копіювання	Патентні ризики	Захист ІВ
Конкуренція	Великі компанії	Робота в нішах
Відсутність попиту	Низька готовність користувачів	Навчання та демонстрації

Було виділено 4 фактори загроз, до яких компанія повинна бути готовою та мати стратегії для їх усунення або адаптації до нових умов, зокрема шляхом постійного вдосконалення продукту та інвестування в розвиток команди.

Поряд із загрозами існують і певні можливості, які представлені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Реакція
Менша вартість	Доступність для замовників	Оптимізація виробництва
Технічні заходи	Виставки, форуми	Участь та демонстрації
Гранти	Держпідтримка	Подання заявок
Міжнародна співпраця	Ринки країн, що розмінуються	Експорт

Таким чином, існують значні можливості для розвитку та масштабування проєкту завдяки державній підтримці та співпраці з різними організаціями. Таким чином, проведений аналіз показує, що в сучасних умовах України, особливо звертаючи увагу на державну підтримку технологічних стартапів, проєкт має високий потенціал для успішної реалізації. Співпраця з організаціями у суміжних сферах та участь у державних програмах можуть значно прискорити впровадження продукту та його адаптацію до реальних потреб потенційних користувачів на ринку.

Після аналізу загроз та можливостей, необхідно провести ступеневий аналіз конкуренції на ринку, щоб зрозуміти за яких умов буде існувати проєкт. Це наведено в табл. 4.8

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції (олігополія)	На ринку є лише декілька компаній, що займаються системами виявлення мін (міжнародні оборонні корпорації, виробники сенсорів та розмінувального обладнання).	Необхідність виділятися за рахунок інновацій, мультисенсорності, ф'южну даних та нижчої вартості. Акцент на адаптивності та гнучких рішеннях.
2. За рівнем конкурентної боротьби (глобальний)	Конкуренція поширюється на міжнародний рівень, адже більшість конкурентів – іноземні виробники обладнання безпеки.	Потрібно відповідати міжнародним стандартам, брати участь у тендерах, виставках, проходити сертифікацію, демонструвати переваги у польових умовах.
3. За галузевою ознакою (міжгалузева)	Технологію можуть використовувати у військовій справі, гуманітарному розмінуванні, екологічному моніторингу, робототехніці.	Адаптація системи під потреби різних галузей, розширення функцій, модульність та масштабованість рішень.
4. Конкуренція за видами товарів (товарно-видова)	Конкуренти пропонують окремі сенсори або вузькоспеціалізовані системи (лише тепловізори, лише HSI, лише металодетектори).	Перевага – створення комплексної системи, що поєднує декілька спектральних каналів та знижує кількість хибних спрацювань.
5. Характер конкурентних переваг (цінова + нецінова)	Цінова конкуренція – через високу вартість імпортованих систем; нецінова – точність, автономність, адаптивність, робота з різними типами ґрунтів.	Забезпечити нижчу кінцеву вартість за рахунок локальної розробки ПЗ, а також виділитися якістю, точністю, швидкістю роботи та сервісом.
6. Інтенсивність конкуренції (марочна)	Відомі гравці ринку мають сильні бренди, що впливає на довіру клієнтів (наприклад, міжнародні системи розмінування).	Формування власного бренду, довготривала підтримка користувачів, польові випробування, демонстрації, сертифікація та маркетингові кейси.

Аналіз конкурентного середовища показав, що ринок систем виявлення мін характеризується обмеженою кількістю сильних гравців та високими вимогами до технологічних рішень. Конкуренція має глобальний характер, а споживачі орієнтуються на міжнародні стандарти, надійність та ефективність обладнання. За умов міжгалузевого застосування технологій та наявності різних типів обладнання-замінників, проєкт може бути конкурентоспроможним за рахунок мультисенсорного підходу, високої точності, адаптивності та помірної вартості. Для успішної роботи на ринку стартапу необхідно зосередитися на інноваціях, сертифікації, формуванні власного бренду та активній демонстрації переваг системи у реальних польових умовах. Наступним етапом є аналіз конкуренції в галузі за М. Портером, що наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	MineWolf Systems, DOK-ING, Pearson Engineering.	Стартапи в галузі роботизації та автономних систем; лабораторії, що розробляють системи аналізу ґрунтів і штучного інтелекту для розпізнавання мін.	Постачальники оптичних сенсорів, тепловізорів, HSI-камер, LiDAR, обчислювальних модулів (NVIDIA, Hikvision).	Військові структури; ДСНС; гуманітарні організації з розмінування; приватні оператори робототехніки.	Металодетектори, георадарні системи, механічні трали, дрони з моноспектральними сенсорами.
Висновки	Концентрація на унікальних характеристиках продукту, які не пропонують конкуренти	Постійна модернізація для збереження конкурентоспроможності	Забезпечення альтернативних постачальників для надійності	Оцінка та врахування специфічних потреб кожного сегмента ринку	Створення переваг за точністю та швидкістю роботи для випередження замінників

Висновки за складовими М. Портера:

— Інтенсивність конкурентної боротьби (прямі конкуренти)

Конкуренція помірна, оскільки ринок вузькоспеціалізований і дорогий, а гравців мало.

Але ті, що є – дуже сильні, здебільшого міжнародні й дорогі.

Перевага проєкту: нижча ціна, мультисенсорність, адаптивність.

— Можливості входу в ринок (потенційні конкуренти)

Бар'єри високі:

- а) складність технології;
- б) необхідність сертифікації;
- с) військові стандарти;
- д) потреба у польових випробуваннях.

Можливі нові гравці – через 2–4 роки.

— Сила постачальників

Постачальники сенсорів мають середню силу, бо:

- а) обладнання дороге;
- б) залежність від імпорту;
- с) обмежена кількість виробників.

Компанія має адаптуватися, закуповуючи сумісні сенсори різних брендів.

— Сила споживачів (клієнтів)

Клієнти сильні, бо:

- а) обирають лише сертифіковані системи;
- б) мають високі вимоги до точності;
- с) проводять тендери.

Тому проєкту потрібно показати польові переваги, надійність, точність, сертифікати.

— Загроза замінників

Замінники сильні:

- а) металодетектори дешеві;
- б) георадар – поширений;

с) механічні трали вже використовуються.

Але жоден не об'єднує мультисенсорні канали, тому проєкт має унікальність.

Отже, проєкт може успішно працювати на ринку, адже:

- існує потреба в точних мультисенсорних системах;
- конкуренція висока, але гравців мало;
- бар'єри входження значні, але технологічна інновація створює перевагу;
- система повинна мати: точність, стабільність, модульність, сертифікованість, низьку ціну.

Щоб працювати на рівні з конкурентами, необхідно обґрунтувати фактори конкурентоспроможності, що наведено в Таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Мультисенсорність системи (TV + ІЧ + HSI + LiDAR)	Забезпечує вищу точність, ніж односпектральні системи; знижує хибні спрацювання; дозволяє працювати у складних умовах.
Точність і швидкість виявлення	Ключовий критерій для військових та ДСНС; визначає конкурентоспроможність та практичну цінність системи.
Вартість впровадження	Імпортні аналоги коштують значно дорожче; нижча ціна – перевага для державних структур.
Можливість інтеграції з дронами/роботами	Підвищує гнучкість використання; дозволяє застосовувати систему в безконтактному режимі.
Надійність та стабільність у польових умовах	Умови експлуатації складні; потрібна захищеність від температур, вібрацій, пилу.
Сертифікація та стандартизація	Без сертифікації продукт не допускається у військові закупівлі та тендери.
Підтримка та оновлення ПЗ	Клієнти очікують довгострокову технічну підтримку, яка забезпечує довіру.

Аналіз факторів конкурентоспроможності показує, що запропонована мультисенсорна система має суттєві технологічні та ринкові переваги над існуючими аналогами. Поєднання високої точності, роботи у складних польових

умовах, можливості інтеграції з безпілотними платформами та доступнішою вартості робить проєкт привабливим для державних структур і гуманітарних організацій. Наявність сервісної підтримки, сертифікації та регулярного оновлення ПЗ додатково підсилює довіру користувачів і формує стійкі позиції на ринку. Сукупність цих факторів свідчить про високий потенціал успішного впровадження стартап-проєкту.

Наступним етапом необхідно провести порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту, результат якого відображений в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали (1–20)	–3	–2	–1	0	+1	+2	+3
1	Сучасність	20							+
2	Точність і швидкість	18						+	
3	Вартість системи	17				0			
4	Інтеграція з UAV/роботами	15						+	
5	Надійність у полі	16							
6	Сертифікація	14	-						
7	Технічна підтримка	12			-				

Поступове вдосконалення технічної підтримки та швидке опрацювання звернень користувачів сприятимуть формуванню надійних та довготривалих взаємин із клієнтами. Виокремлення ключових технологічних переваг мультисенсорної системи дозволить проєкту впевнено утримувати свої позиції та виділятися серед конкурентів. Загалом, «Виявлення наземних мін комп'ютерно-інтегрованими оптико-електронними засобами» має значні перспективи впровадження на ринку завдяки своїй інноваційності, високій точності та комплексному підходу до аналізу об'єктів.

Проведений в табл. 4.12 SWOT-аналіз забезпечує всебічне розуміння поточного стану стартапу, оскільки враховує сильні й слабкі сторони технології, а

також зовнішні можливості та загрози, що можуть вплинути на реалізацію проєкту [50]. Такий аналітичний підхід допомагає визначити оптимальні напрями розвитку: зосередитися на використанні конкурентних переваг, розширенні можливостей для зростання та мінімізації ризиків, пов'язаних із внутрішніми недоліками чи ринковими чинниками.

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони (S):	Слабкі сторони (W):
мультисенсорна система з високою точністю;	відсутність формальної сертифікації;
можливість роботи в реальному часі;	обмежений виробничий ресурс;
адаптивність та масштабованість;	залежність від імпортованих сенсорів;
нижча ціна порівняно з конкурентами;	невідомий бренд.
можливість дистанційного застосування (UAV/UGV).	
Можливості (O):	Загрози (T):
високий попит у військовій сфері;	вихід нових стартапів;
гуманітарне розмінування в Україні та світі;	конкуренція з боку великих міжнародних корпорацій;
державні та міжнародні гранти;	технологічні заміники (георадари, металодетектори);
розширення на цивільні ринки аналізу ґрунтів.	логістичні ризики постачання комплектуючих.

Проведений SWOT-аналіз показав, що проєкт має виражені сильні сторони – інноваційну мультисенсорну технологію, високу точність виявлення та можливість дистанційної роботи, що створює значні переваги перед традиційними системами. Ринкові можливості, зокрема високий попит у сфері гуманітарного розмінування та міжнародні програми підтримки, підсилюють перспективність впровадження

рішення. Водночас проєкт стикається з низкою викликів: необхідністю сертифікації, залежністю від імпорتنих компонентів та конкуренцією зі світовими виробниками. Однак за умови ефективного використання сильних сторін стартап має високі шанси успішно вийти на ринок та зайняти свою нішу. Наступним кроком є аналіз альтернатив ринкового впровадження стартап-проєкту, результати якого наведені в табл. 4.13.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Розробка MVP (мінімального життєздатного продукту) + тестування з ДСНС	Висока	6–9 міс
2	Вихід на військові тендери після сертифікації	Середня	12–18 міс
3	Партнерство з виробниками дронів та роботів	Висока	8–12 міс
4	Пошук грантів (Horizon Europe, USAID, NATO)	Висока	3–6 міс
5	Комерціалізація ПЗ як окремого продукту	Середня	6 міс

Альтернатива №1 + №3 + №4:

- найбільш ймовірне отримання ресурсів,
- найшвидший вихід на ринок,
- створює репутацію та базу для подальшої сертифікації.

4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту

З метою розроблення ринкової стратегії проєкту перш за все було обрано цільові групи потенційних споживачів.

Результати проведеного аналізу наведено в табл. 4.14.

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Державні військові структури (Міноборони, ЗСУ, інші силові відомства)	Висока: потреба у сучасних технологіях дистанційного виявлення мін, підтримка інновацій для збереження життя	Високий, системний, довгостроковий попит у вигляді серійних закупівель комплексів	Висока: присутні зарубіжні рішення та класичні засоби розмінування	Низька/середня: складні процедури тендерів, сертифікація, необхідність полігонних випробувань
ДСНС України та підрозділи гуманітарного розмінування	Висока: постійна потреба в очищенні територій, відкритість до технологічних рішень, які прискорюють роботи	Високий: велика кількість замінованих територій, багаторічні програми розмінування	Середня: обмежене коло постачальників спеціалізованих систем, конкуренція між імпортерами рішеннями	Середня: необхідність пілотних проєктів, підтвердження ефективності, але нижчі бюрократичні бар'єри порівняно
Міжнародні гуманітарні організації та донорські фонди, що фінансують розмінування	Середньо-висока: позитивне ставлення до інновацій, але висока вимогливість до доказовості результатів	Середній/високий: потреба в ефективних технологіях для реалізації програм розмінування у різних країнах	Середня: конкуренція між різними технологічними підрядниками, але висока цінність унікальних рішень	Середня: потрібні кейси успішного застосування в Україні, наявність сертифікації, відповідність міжнародним стандартам
Компанії-інтегратори безпілотних та наземних роботизованих платформ	Середня: зацікавленість у “розумних” корисних навантаженнях для своїх платформ	Середній: попит формується разом із замовленнями кінцевих клієнтів (військових/ДСНС)	Низька/середня: небагато рішень з мультисенсорним ф'юзном для мін	Відносно висока: можлива співпраця через пілотні інтеграційні проєкти, партнерські угоди

Згідно з проведенням аналізом та результатами таблиці основними цільовими

сегментами обираються:

- Державна служба України з надзвичайних ситуацій, а також підрозділи гуманітарного розмінування (сегмент 2);
- компанії-інтегратори безпілотних та наземних роботизованих платформ (сегмент 4) як канал виходу на кінцевих замовників;
- із перспективою подальшого виходу на міжнародні гуманітарні організації (сегмент 3).

Стратегія охоплення ринку – диференційований маркетинг: для кожної цільової групи формуються окремі програми ринкового впливу (формат співпраці, демонстрації, умови постачання).

Визначення базової стратегії розвитку

Визначення базової стратегії розвитку є ключовим етапом формування ринкової поведінки стартап-проекту та забезпечує узгодженість між обраними напрямками діяльності, потребами клієнтів і конкурентним середовищем. Для цього здійснено аналіз можливих альтернатив розвитку, які враховують специфіку ринку технологій розмінування та потенціал мультисенсорної оптико-електронної системи. Кожна альтернатива оцінювалася за рівнем охоплення ринку, конкурентними перевагами та можливістю практичного впровадження у різних умовах експлуатації. Особливу увагу приділено сценаріям, що дозволяють оптимізувати вихід на ринок, забезпечити швидку демонстрацію ефективності продукту та сформувати довіру серед потенційних користувачів.

Представлений аналіз створює основу для вибору оптимальної стратегії розвитку, результати якої наведені в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Запуск пілотних проєктів з ДСНС та гуманітарними організаціями в Україні	Концентрований маркетинг на внутрішньому ринку з фокусом на одному ключовому сегменті на старті	Демонстрація ефективності мультисенсорної системи в реальних умовах, адаптація під вимоги користувачів, локальна підтримка	Стратегія спеціалізації (концентрація на потребах одного сегменту)
Партнерство з виробниками дронів та наземних роботів для комплексних рішень “платформа + система виявлення мін”	Диференційований маркетинг (робота з кількома сегментами через партнерів)	Унікальність мультисенсорного корисного навантаження, модульність, інтеграція з різними платформами	Стратегія диференціації (відмінні технічні характеристики)
Вихід на міжнародні програми гуманітарного розмінування	Диференційований маркетинг на зовнішніх ринках	Висока точність та обґрунтований ф’южн даних, досвід застосування в Україні, відповідність стандартам, нижча ціна порівняно з провідними конкурентами	Стратегія диференціації у межах обраних сегментів

Основною базовою стратегією розвитку для проекту є стратегія диференціації з елементами спеціалізації на сегменті гуманітарного розмінування.

Визначення стратегії конкурентної поведінки

Для визначення найбільш ефективної ринкової поведінки стартапу було

проведено аналіз стратегічних підходів до конкуренції з урахуванням поточної ситуації на ринку технологій розмінування. Оцінювання включає визначення ступеня новизни продукту для ринку, можливостей залучення нових споживачів та необхідності адаптації характеристик конкурентних товарів. Результати цього аналізу відображено в таблиці 4.16.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Частково: на ринку України майже відсутні комплексні мультисенсорні системи виявлення мін з ф'южном даних та інтеграцією з роботизованими платформами	Переважно пошук нових споживачів у сегментах, де ще не застосовуються мультисенсорні системи (нові програми гуманітарного розмінування, нові платформи), із частковим перехопленням замовлень у виробників моноспектральних рішень	Копіювання не передбачається; можливе використання окремих сумісних інтерфейсів та стандартів даних, але ключові алгоритми ф'южну та аналізу сцени є оригінальними	Стратегія заняття конкурентної ніші з елементами наслідування лідеру за стандартами якості та безпеки

Проведений аналіз показує, що розроблюваний проєкт частково має характеристики «першопрохідця» на українському ринку, оскільки подібні комплексні мультисенсорні системи з автоматизованим ф'южном даних фактично відсутні серед існуючих рішень. Це дозволяє орієнтуватися переважно на формування нових сегментів споживачів, де потреба в сучасних технологіях гуманітарного розмінування лише починає формуватися. Водночас конкуренція з

виробниками моноспектральних або менш інноваційних систем буде мінімальною та носитиме радше характер перехоплення окремих замовлень.

Оскільки ключові алгоритми ф'южну, аналізу сцени та виявлення мін мають оригінальний характер, копіювання характеристик конкурентів не є необхідним. Стратегія розвитку зосереджується на зайнятті конкурентної ніші з дотриманням міжнародних стандартів якості й безпеки, що дозволяє позиціонувати продукт як високотехнологічне рішення нового покоління.

Враховуючи визначену конкурентну поведінку та характер ринку, наступним кроком є формування стратегії позиціонування, яка дозволить чітко окреслити унікальні переваги продукту та визначити його оптимальне місце серед наявних і потенційних рішень. Результати дослідження наведені в табл. 4.17.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Висока точність і надійність виявлення мін, мінімізація хибних спрацювань	Стратегія диференціації	Мультисенсорність (TV + ІЧ + HSI + LiDAR), алгоритми ф'южну, моделювання сцени, робота в реальному часі	«Високоточне рішення», «мінімум хибних спрацювань», «технологія, якій можна довірити життя саперів»
Безпечність – можливість дистанційного розмінування, зменшення ризиків для персоналу	Спеціалізація на сегменті гуманітарного розмінування	Інтеграція з дронами та наземними роботами, дистанційний режим роботи, можливість роботи на небезпечних ділянках без участі людини	«Розмінування на відстані», «людина поза зоною ризику», «технологія безпечного поля»

Ринкова позиція проекту: «Українська мультисенсорна система високоточного та безпечного дистанційного виявлення мін, що забезпечує максимальну ефективність розмінування при оптимальних витратах».

На основі проведеного аналізу ринкових умов, конкурентного середовища та визначених ключових переваг концепції товару, виникає необхідність детальніше охарактеризувати стратегічні аспекти поведінки майбутнього продукту на ринку. Узагальнення таких параметрів, як ступінь новизни розробки, характер конкуренції, очікувані групи споживачів та можливість використання елементів існуючих технологічних стандартів, дає змогу сформувати цілісне розуміння потенційної ринкової позиції проєкту.

У табл. 4.18 наведено опис основних характеристик конкурентної поведінки, що дозволяє визначити напрямки подальшого розвитку продукту.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Зменшення ризику для життя і здоров'я саперів та персоналу	Дистанційне виявлення мін з використанням роботизованих платформ	Мультисенсорність, інтеграція з UAV/UGV, можливість роботи без прямої присутності людини
Підвищення точності та швидкості розмінування	Автоматизований аналіз сцени, ф'южн даних і формування карти ймовірності розташування мін	Менше хибних спрацювань порівняно з моноспектральними системами та металодетекторами; використання нейромережевих алгоритмів
Оптимізація фінансових витрат на розмінування	Зменшення кількості виїздів, часу роботи груп, витрати ресурсів	Нижча вартість системи у порівнянні з імпортними аналогами, можливість локального сервісу та модернізації
Необхідність документування результатів та аналітики	Збереження даних, побудова карт, звітів, інтеграція з GIS	Гнучкий програмний модуль, який може інтегруватися з інформаційними системами замовника
Адаптація до різних типів ґрунтів та умов	Налаштування параметрів під конкретні умови, використання моделей сцени	База навчальних даних, адаптивні моделі, можливість донавчання системи під задачі клієнта

Результати таблиці демонструють, що концепція товару повністю відповідає ключовим потребам цільових користувачів, пропонуючи як функціональні, так і технологічні переваги над існуючими рішеннями. Сформовані конкурентні переваги створюють основу для успішної комерціалізації системи та її подальшого розвитку.

Подальшим кроком виступає формування трирівневої моделі товару, яка дає змогу всебічно охарактеризувати продукт — від його ключового призначення до розширених сервісів і післяпродажної підтримки, що визначають цінність та сприйняття системи користувачами. Результати наведені в табл. 4.19.

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Мультисенсорна система для виявлення наземних мін, що поєднує телевізійний та інфрачервоний канали з алгоритмами злиття даних для підвищення точності детектування.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості / характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Візуалізація процесу виявлення	М	Тх
	2. Якість	Нм	Тх
	3.	М	Е
	4. Довговічність	Нм	Вр
	5. Надійність	М	Тл
	Якість: відповідає вимогам українського законодавства та міжнародним рекомендаціям у сфері гуманітарного розмінування.		
	Пакування: програмне забезпечення, встановлюване на комп'ютер або планшет.		
	Марка: «Mine-Eye»		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: консультації щодо вибору конфігурації, інструкція користувача, налаштування системи.		
	Після продажу: технічна підтримка, оновлення алгоритмів, додаткові модулі для аналізу даних.		

Трирівнева модель дає змогу виділити головні властивості продукту, важливі

для моєї цільової аудиторії: точність роботи системи, її надійність, простоту використання та наявність технічної підтримки. Додаткові послуги: консультації, супровід та оновлення ПЗ формують довірчі відносини з користувачами та підвищують цінність рішення на ринку.

Після визначення моделі товару наступним кроком є встановлення цінових меж. Для цього потрібен аналіз ринку, порівняння з аналогічними технологіями та врахування купівельної спроможності цільових споживачів.

Наступним етапом є визначення цінових меж, що необхідні для встановлення конкурентоспроможної ціни на товар. Це включає детальний аналіз ринкових умов, таких як ціни на товари-аналоги, а також оцінку рівня доходів цільової аудиторії. Результати даного аналізу наведені в табл. 4.20.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
Металодетектори, георадарні системи, механічні трали – відносно дешевші одиничні рішення, але менш точні або потребують великої кількості людських ресурсів	Іноземні мультиспектральні системи та комплекси розмінування – значно дорожчі, включають повні платформи і закриті програмні рішення	Державні замовники (військові, ДСНС) та міжнародні організації – мають доступ до бюджетного та грантового фінансування, але орієнтуються на оптимальне співвідношення «ціна–ефективність»	Орієнтовно: нижня межа – рівень вищий за вартість окремих замінників, але значно нижчий за комплексні імпорتنі рішення; верхня межа – рівень, що забезпечує економію порівняно з аналогами. Для базового програмно-апаратного комплексу: 50–80 тис. грн за модуль ПЗ (без урахування вартості платформ і сенсорів) з можливістю поетапної комплектації

Визначені цінові межі свідчать, що запропонований продукт може зайняти

конкурентну нішу між дешевими, але малоефективними замінниками та дорогими імпортними системами. Обраний діапазон ціни забезпечує баланс між доступністю для державних замовників і достатнім рівнем прибутковості проєкту.

Для забезпечення успішного впровадження продукту також формується система збуту, яка враховує специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів та необхідні функції постачальника.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Державні структури здійснюють закупівлі через тендери, довгострокові контракти, потребують офіційної звітності, сертифікації	Підготовка технічної та тендерної документації, участь у конкурсах, проведення демонстрацій, навчання персоналу, сервіс	Канал нульового рівня (прямий продаж) або однорівневий через офіційних дистриб'юторів спецтехніки	Власна система збуту з можливим залученням спеціалізованих дистриб'юторів у сфері оборонних технологій
Гуманітарні організації та міжнародні фонди часто закуповують через партнерів, інтеграторів техніки або у рамках проєктів з розмінування	Координація з партнерами-інтеграторами, адаптація рішення під їхні платформи, спільна участь у грантових програмах	Однорівневий або дворівневий канал: виробник – інтегратор – кінцевий замовник	Комбінована система збуту: прямі продажі + партнерські угоди з інтеграторами роботизованих систем
Компанії-виробники дронів/роботів шукають готові модулі, що додають цінність їхнім платформам	Надання SDK/API, технічної підтримки, ко-брендинг, спільний маркетинг	Однорівневий канал	Партнерський збут як вбудований модуль у продукт інтегратора

Система збуту базується на прямому постачанні обладнання замовникам, що дозволяє зменшити витрати, забезпечити оперативну підтримку та високий рівень сервісу. Такий підхід найбільше відповідає потребам організацій, які займаються розмінуванням, і підвищує довіру до продукту.

Маркетингові комунікації орієнтовані на професійну аудиторію та використовують конференції, технічні форуми й онлайн-платформи. Рекламні повідомлення підкреслюють інноваційність, точність і надійність мультисенсорної системи, формуючи позитивний імідж стартапу на ринку. Концепція маркетингових комунікацій наведена в табл. 4.22.

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Державні замовники (військові, ДСНС) орієнтуються на офіційні джерела, експертні висновки, результати випробувань	Офіційні листи, галузеві конференції, полігонні демонстрації, професійні видання	Висока точність, безпечність, економічна ефективність	Донести, що система реально зменшує ризики для особового складу та скорочує час розмінування	«Жоден сапер не повинен ризикувати життям там, де може працювати технологія» (демонстрація кейсів, до/після)
Гуманітарні організації та донори орієнтуються на соціальний ефект, прозорість, звітність, довгостроковий вплив	Презентації проєктів, участь у міжнародних форумах, грантові заявки, онлайн-зустрічі, професійні мережі	Соціальна значущість, ефективність, масштабованість	Показати, що система дозволяє швидше повертати території до безпечного використання	«Кожен квадратний метр очищеної землі – це повернуті додому люди. Технологія, що прискорює шлях до безпечної країни»
Інтегратори робототехніки шукають технічні переваги, що допомагають виділити їхні платформи	Технічні воркшопи, спільні демо-польоти, технічна документація, профільні онлайн-спільноти	Модульність, сумісність, додана цінність для їхніх продуктів	Показати, що інтеграція дає змогу пропонувати унікальний продукт на ринку	«Додайте розумне мультисенсорне “серце” до вашої платформи – і перетворіть її на комплекс для розмінування нового покоління»

Розроблена концепція маркетингових комунікацій дозволяє ефективно взаємодіяти з різними групами цільових клієнтів, враховуючи їхні мотиви, потреби та критерії прийняття рішень. Чітко визначені канали комунікації та меседжі забезпечують послідовне позиціонування системи як високоточного, безпечного та соціально значущого рішення, що підсилює довіру та сприяє успішному виходу продукту на ринок.

4.4 Бізнес-модель та реалізація стартап-проєкту

На фінальному етапі розроблення стартап-проєкту ключовим завданням є формування цілісної та ефективної бізнес-моделі, що забезпечить стабільні доходи, масштабованість та стійкість проєкту у довгостроковій перспективі. Бізнес-модель має демонструвати, яку цінність отримують користувачі, яким чином продукт приносить прибуток, як розподілятимуться витрати, та які ресурси необхідні для підтримки роботи системи.

Для стартап-проєкту «Мультисенсорна система виявлення наземних мін із ф'юзном даних та інтеграцією з роботизованими платформами» бізнес-модель ґрунтується на унікальних характеристиках розробки: поєднанні декількох спектральних каналів (TV, ІЧ, HSI, LiDAR), інтелектуальних алгоритмів аналізу сцени, автоматизованого формування карти ймовірності розташування мін та можливості інтеграції з різними типами безпілотних і наземних платформ. Важливою перевагою є модульність системи та її адаптивність до різних умов ґрунтів і завдань, що дозволяє задовольнити потреби військових, ДСНС, гуманітарних організацій і виробників робототехніки.

Завдяки цьому стартап може вийти на кілька перспективних ринкових сегментів, де критично важливі точність, швидкість та безпечність розмінування, а також можливість дистанційного виконання операцій без ризику для персоналу.

Нижче у табл. 5.23 наведено структуровану бізнес-модель стартап-проєкту «Мультисенсорна система виявлення наземних мін».

Таблиця 4.23 – Бізнес-модель

Ключові партнери Постачальники сенсорів (TV, IR, HSI, LiDAR); виробники обчислювальних модулів; партнери-дрони та роботизовані платформи; сертифікаційні центри; гуманітарні організації; інтегратори робототехніки. Мотивація для партнерста Зменшення витрат і пришвидшення виробництва Підвищення ефективності завдяки інтеграції технологій Оптимізація ризиків і перевірка технології в реальних умовах	Ключові види діяльності Виробництво та інтеграція системи; розробка алгоритмів ф'южну; тестування; сертифікація; навчання операторів; пілотні впровадження. Ключові ресурси Мультисенсорне обладнання; програмне забезпечення; база даних для аналізу; команда інженерів та фахівців з ML; виробничі потужності	Ціннісна пропозиція Точне та швидке виявлення мін у реальному часі; зниження ризиків для персоналу; дистанційне застосування; зменшення кількості хибних спрацювань; адаптація до різних типів ґрунтів Характеристики Інноваційність Безпечність Продуктивність і точність	Відносини з клієнтами Технічна підтримка; навчання операторів; супровід впровадження; сервісне обслуговування; постійна комунікація Канали Закупівля сенсорів; розробка ПЗ; виготовлення модулів; маркетинг; сертифікація; техпідтримка; резерв.	Сегменти користувачів ДСНС України; військові підрозділи; міжнародні гуманітарні організації з розмінування; приватні оператори дронів та робототехнік Ринок Нішевий ринок Сегментований ринок гуманітарного та військового розмінування
Структура витрат Бізнес більше залежить від цін на закупівлі оптичних/HSI/IR/LiDAR сенсорів, розробки сенсорних модулів і алгоритмів ф'южну Характеристики: Фіксовані витрати: зарплати інженерів, оренда й сервери Змінні витрати: комплектуючі, польові випробування, демонстрації. Економія на масштабі: зменшення собівартості при серійному виробництві.		Джерела доходів Продаж систем; підписка на ПЗ; технічне обслуговування; навчання; партнерські інтеграції; оновлення ПЗ. Типи: Продаж сенсорних систем; Підписка на ПЗ та аналітичні сервіси; Оренда обладнання; Ліцензування ПЗ / API; Технічне обслуговування й навчання. Фіксована ціна: Залежить від комплектації системи й типу замовника; Формується з урахуванням економії порівняно з імпортними аналогами.		

Сформована бізнес-модель демонструє цілісну та життєздатну структуру функціонування стартапу, де чітко визначені ключові партнери, ресурси та види діяльності забезпечують створення конкурентного продукту. Орієнтація на державних та міжнародних замовників, поєднана з прямими каналами збуту й сервісною підтримкою, формує стабільну основу для масштабування та довгострокового розвитку проєкту.

Для реалізації наданої бізнес-моделі в життя необхідно структурувати часові межі та послідовність основних етапів реалізації. Календарний план визначає

логічну послідовність етапів створення стартапу. Календарний план проєкту наведено в табл. 4.24.

Таблиця 4.24 – Календарний план проєкту

Етап	Тривалість	Опис робіт
Проектування та оптимізація мультисенсорної системи	3 місяці	Розробка архітектури системи TV + IR + HSI + LiDAR; вибір сенсорів і обчислювальних модулів; моделювання параметрів сцени; оптимізація розміщення сенсорів для зменшення хибних спрацювань. Створення 3D-моделей та розрахунок робочих характеристик.
Створення базової версії програмного забезпечення	3 місяці	Реалізація алгоритмів ф'южну, попередньої обробки даних, класифікації та формування карти ймовірностей мін. Створення UI для операторів, підготовка API для інтеграції з роботизованими платформами та наземними системами.
Тестування, калібрування та відлагодження	3 місяці	Випробування на полігоні, калібрування системи під різні типи ґрунтів, перевірка роботи в реальному часі. Виявлення помилок, оптимізація моделі, підтвердження стабільності та точності. Спільне тестування з експертами ДСНС та саперами.
Маркетинг, демонстрації та пілотні впровадження	3 місяці	Підготовка презентацій та демонстраційних матеріалів, участь у галузевих виставках та форумах. Проведення показів для військових, гуманітарних організацій та партнерів у сфері робототехніки. Запуск пілотних випробувань на базі партнерських установ.
Комерційний запуск та вихід на ринок	2 місяць	Перші постачання системи, підписання угод із державними та міжнародними замовниками. Оформлення ліцензій, сертифікаційних документів, партнерських договорів. Організація сервісної підтримки та запуск оновлень ПЗ.

Запропонований календарний план дозволяє послідовно пройти всі ключові етапи — від технічної розробки до комерційного запуску. Така структура мінімізує ризики, забезпечує високу якість продукту та створює умови для швидкого впровадження системи в умовах реальної експлуатації.

Команда стартапу складається з ключових спеціалістів, кожен із яких відповідає за конкретний напрямок розробки, виробництва, просування та реалізації продукту. Структура команди, наведена в табл. 4.25, забезпечує ефективну координацію дій, мінімізує ризики та дозволяє досягати поставлених цілей в оптимальні терміни.

Таблиця 4.25 – Команда стартапу

Роль	Вміння і вклад у розробку
Керівник проєкту	Координація роботи команди; стратегічне планування; взаємодія з інвесторами, державними структурами та міжнародними організаціями; контроль виконання етапів проєкту
Інженер-оптик	Розробка архітектури мультисенсорної оптико-електронної системи; вибір параметрів камер (TV, ІЧ, HSI), підбір матеріалів; контроль якості оптичних модулів
Інженер-конструктор	Проектування корпусу та механічних компонентів системи; розробка технічної документації; забезпечення сумісності з дронами та наземними платформами
Інженер-програміст	Розробка алгоритмів ф'южну даних та моделі сцени; створення програмного забезпечення для аналізу та візуалізації даних; оптимізація роботи системи в реальному часі
Фахівець із даних / ML-інженер	Створення нейромережевих моделей для класифікації мін; підготовка навчальних датасетів; тестування точності й адаптація моделі під різні типи ґрунтів
Спеціаліст з виробництва	Організація виготовлення сенсорних модулів; контроль збірки; забезпечення відповідності стандартам якості та військовим вимогам
Фахівець із випробувань	Проведення лабораторних і польових випробувань; аналіз надійності; сертифікаційні процедури; співпраця з ДСНС та полігонами
Маркетолог	Аналіз ринку; розробка ринкової стратегії; позиціонування продукту; просування технології серед державних структур та міжнародних організацій
Менеджер з продажів	Пошук клієнтів; ведення перемовин; розширення дистриб'юторської мережі; підготовка комерційних пропозицій та тендерної документації
Менеджер по роботі з партнерами	Співпраця з виробниками дронів, роботизованих платформ, інтеграторами; підготовка спільних рішень “платформа + сенсорна система”
Юрист	Патентний захист; оформлення документації; супровід контрактів і міжнародних угод
Фінансовий менеджер	Планування бюджету; контроль витрат; фінансове моделювання; підготовка запитів для грантів і програм міжнародної допомоги

Така структура команди дозволяє:

- забезпечити повний цикл створення системи – від оптичного дизайну до програмних алгоритмів;
- мінімізувати технічні ризики на виробничих етапах;
- гарантувати відповідність системи стандартам безпеки;
- ефективно вийти на ринок військових та гуманітарних технологій.

Наявність фахівців із ML, випробувань та партнерської взаємодії особливо важлива через інноваційність проєкту та складність інтеграції з безпілотними платформами.

Реалізація стартап-проєкту вимагає чіткого розуміння витрат, пов'язаних з розробкою продукту, маркетингом, тестуванням та впровадженням. Їхнє прогнозування дозволяє планувати бюджет, контролювати грошові потоки та приймати обґрунтовані фінансові рішення. У табл. 5.26 наведено структуру витрат проєкту.

Таблиця 5.26 – Структура витрат

Категорія витрат	Сума (у грн)	Коментар
Розробка та оптимізація ПЗ і апаратної частини системи	120 000	Оплата роботи інженерів-розробників, спеціалістів з обробки даних та ф'южну, ML-фахівців; створення алгоритмів класифікації, калібрування сенсорів, інтеграція модулів TV/IR/HSI/LiDAR, розробка API та інтерфейсу оператора.
Закупівля сенсорів, комплектуючих і обчислювальних модулів	80 000	Придбання ТВ-камер, тепловізорів, HSI-модулів, LiDAR-сенсорів, обчислювальних процесорів, накопичувачів даних; закупівля кабельної інфраструктури; оренда хмарних серверів для зберігання та аналізу даних.
Тестування, калібрування та пілотні випробування	70 000	Полеві випробування, полігонні тести з саперами; калібрування під різні типи ґрунтів; аналіз хибних спрацювань; організація пілотних запусків спільно з ДСНС, військовими або гуманітарними організаціями.
Маркетинг, демонстрації та комунікації	50 000	Участь у галузевих виставках, підготовка демонстрацій, створення відеоматеріалів, просування у професійних мережах, розробка презентацій для державних і міжнародних замовників.
Юридичні та адміністративні витрати	20,000	Сертифікація технології, оформлення дозвільної документації, реєстрація інтелектуальної власності, юридичний супровід договорів та тендерної документації.
Непередбачені витрати	15 000	Резерв на додаткові закупівлі, ремонт або оновлення комплектуючих, форс-мажорні обставини.
Загальна сума:	355 000	—

Сформована структура витрат охоплює всі ключові етапи реалізації стартапу — від технічної розробки до маркетингу та сертифікації. Такий розподіл коштів

забезпечує збалансоване використання ресурсів, мінімізує ризики та створює умови для ефективного виходу продукту на ринок.

Висновок до розділу

Проведений аналіз підтвердив, що ринок технологій розмінування перебуває на етапі активного зростання та має стратегічне значення для України, де масштабність замінованих територій формує довготривалу потребу у впровадженні інноваційних рішень. Запропонований стартап, спрямований на створення мультисенсорної системи виявлення мін з використанням комп'ютерно-інтегрованих оптико-електронних засобів, демонструє високий потенціал комерціалізації. Це зумовлено поєднанням сучасних технологій ф'южну, можливістю дистанційної роботи на роботизованих платформах та суттєвим підвищенням рівня безпечності для персоналу.

Дослідження цільових сегментів підтвердило наявність сталого та фінансово спроможного попиту з боку державних структур, міжнародних гуманітарних організацій та компаній-інтеграторів робототехніки. У конкурентному середовищі система займає перспективну нішу мультисенсорних рішень, яка мало заповнена через високі технологічні бар'єри входу. Переваги продукту — точність, модульність, безпечність та доступність порівняно з імпортними аналогами — створюють передумови для формування сильних ринкових позицій.

Ринкова стратегія проєкту базується на диференціації та спеціалізації, що дозволяє ефективно працювати у сегментах військового та гуманітарного розмінування. Партнерства з виробниками дронів і роботизованих платформ відкривають можливості масштабування, а маркетингова концепція, орієнтована на доказовість, надійність і соціальну значущість, сприяє формуванню довіри до технології.

Порівняння альтернатив впровадження показало, що найбільш раціональним є поетапний розвиток — від створення та перевірки MVP у співпраці з ДСНС та гуманітарними структурами до розширення через інтеграторів і виходу на міжнародні програми розмінування. У сукупності отримані результати свідчать,

що подальша імплементація проєкту є доцільною та здатна забезпечити формування конкурентоспроможного рішення як на національному, так і на міжнародному ринку технологій розмінування, за умови залучення ресурсів для дослідно-конструкторських робіт, сертифікації та пілотних впроваджень.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було досліджено та розроблено комп'ютерно-інтегровану оптико-електронну систему для виявлення поверхневих протипіхотних мін на основі мультисенсорного аналізу даних видимого та інфрачервоного діапазонів. Виконаний аналіз сучасних оптико-електронних засобів підтвердив, що найбільш ефективним напрямом розвитку є використання комплексних систем, здатних поєднувати структурну інформацію RGB-зображень із тепловими характеристиками ІЧ-каналу. Такий підхід усуває недоліки окремих сенсорів та відкриває можливість отримання більш повної та інформативної картини сцени.

У ході роботи було розглянуто сучасні методи цифрової обробки та злиття зображень, які дозволяють підвищити контрастність та помітність мінних об'єктів на фоні неоднорідного ґрунту. Вивчення алгоритмів нормалізації, фільтрації та інтеграції даних показало важливість коректної попередньої обробки сигналів та обґрунтованого вибору методу fusion, що безпосередньо впливає на якість подальшого детектування.

У межах дослідження було запропоновано математичну модель процесу виявлення мін, яка враховує властивості ґрунту, параметри сенсорів та природу утворення теплового контрасту. На основі цієї моделі створено синтетичну сцену, що дозволило відтворити характерні умови функціонування системи в реальному середовищі. Подальша реалізація алгоритмів у середовищі MATLAB/Simulink забезпечила можливість побудови та дослідження динамічної моделі мультисенсорної системи.

У результаті моделювання було встановлено, що об'єднання RGB- та ІЧ-даних дає змогу значно підвищити достовірність виявлення поверхневих мін, зменшити кількість хибних спрацювань і покращити видимість мінних сигнатур на зображеннях. Найвищу ефективність продемонстрував wavelet fusion, який забезпечив найкращий баланс між контрастністю та стабільністю результатів. Це підтверджує перспективність мультисенсорної інтеграції для задач дистанційного розмінування.

Таким чином, поставлені на початку роботи завдання були виконані повністю, а отримані результати засвідчили доцільність використання комп'ютерно-інтегрованих оптико-електронних систем для підвищення ефективності та безпеки процесів гуманітарного розмінування. Розроблені моделі та алгоритми можуть слугувати основою для створення реальних роботизованих та безпілотних платформ виявлення мін, а також для подальших досліджень із застосуванням адаптивних методів та технологій машинного навчання.

Окремо варто зазначити, що результати дослідження були представлені у вигляді короткої доповіді на науково-технічній конференції КПП ім. Ігоря Сікорського, що дозволило і підтвердити загальну актуальність обраного напрямку.

Загалом, виконана робота демонструє можливість створення ефективної програмної мультисенсорної системи для первинного виявлення мін та формує науково-практичну основу для майбутнього впровадження технології у реальні гуманітарні операції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] “Explosive Contamination Threatens Safety and Recovery in Ukraine”. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.hi-us.org/en/explosive-contamination-threatens-safety-and-recovery-in-ukraine>
- [2] “Landmine Monitor 2024: States Must Reaffirm their Commitment to the Mine Ban Treaty”. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.hi-us.org/en/states-must-reaffirm-their-commitment-to-the-mine-ban-treaty>
- [3] Keeley, R. Understanding Landmines and Mine Action, 2003.
- [4] Використаний рисунок. URL: <https://www.military.com/equipment/pss-14-mine-detector>
- [5] Laurie, G. An Analysis of MRE Provisions in Recent MA-related Conventions, 2010.
- [6] Gibson, J. M.; Lockwood, J. R. Alternatives for Landmine Detection, 2003.
- [7] Khodor, M. Landmine Detection Using Hyper-Spectral Imaging, 2021.
- [8] Gunatilaka, A. H.; Baertlein, B. A. Feature-level and Decision-level Fusion of Noncoincidentally Sampled Sensors for Land Mine Detection, 2001.
- [9] Liu, C. New Airborne Thermal-Infrared Hyperspectral Imager System: Initial Validation, 2007.
- [10] Robled, L. A Survey of Land Mine Detection Technology, 2007.
- [11] Staymates, M. E. Biomimetic Sniffing Improves the Detection Performance of a 3D Printed Nose of a Dog and a Commercial Trace Vapor Detector, 2016.
- [12] Vo-Dinh, T. (Ed.). Biomedical Photonics Handbook. 2nd ed., CRC Press, 2014.
- [13] Born, M.; Wolf, E. Principles of Optics. 7th ed., Cambridge University Press, 2019.
- [14] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. Digital Image Processing. 4th ed., Pearson, 2018.
- [15] Rogalski, A. Infrared and Terahertz Detectors. 2nd ed., CRC Press, 2019.
- [16] Carr, J. C.; Schott, J. L. Remote Sensing: The Image Chain Approach, 2022.
- [17] Plaza, A.; Benediktsson, J. A.; Boardman, J. W. et al. Recent Advances in

- Hyperspectral Image Analysis and Classification. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012.
- [18] Holst, M.; Lomheim, T. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems, 2011.
- [19] Колобродов В.Г., Микитенко В.І. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія. Поліграфічний центр «Аверс», Київ, 2013. – 178 с.
- [20] Measures, R. M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications, 1984.
- [21] Jun-Hyung Kim. Image-Level Anti-Personnel Landmine Detection Using Deep Learning in Long-Wave Infrared Images, 2025.
- [22] Luis F. Robledo; Miguel Carrasco; Domingo Mery. A Survey of Land Mine Detection Technology, 2009.
- [23] Тоцька В.О., Микитенко В.І., Виявлення наземних мін комп'ютерно-інтегрованими оптико-електронними засобами «Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування», Вип. 69(2), 2025
- [24] Wolf, P. R.; Dewitt, B. A.; Wilkinson, B. E. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. 4th ed., McGraw-Hill Education, 2014.
- [25] Mitchell, H. B. Image Fusion: Theories, Techniques and Applications. Springer, 2010.
- [26] Hall, D. L.; Llinas, J. Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice. 2nd ed., CRC Press, 2008.
- [27] Schott, J. Remote Sensing: The Image Chain Approach, Oxford, 2007.
- [28] Plaza et al. Hyperspectral Image Analysis. IEEE JSTARS, 2012.
- [29] Spectral Reflectance Curve of Soil, Dry and Wet. URL: https://www.researchgate.net/figure/Spectral-reflectance-curve-of-soil-dry-and-wet-water-and-vegetation_fig1_327884743
- [30] Thenkabail et al. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. CRC Press, 2012.
- [31] Spectral Reflectance Curve of Vegetation. URL: <https://www.researchgate.net/figure/The-spectral-reflectance-curve-of->

- [32] Gunatilaka, A. H.; Baertlein, B. A. Feature-level and Decision-level Fusion for Land Mine Detection, 2001.
- [33] Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Пінчук Б. Ю., Сокол Б. В. і Тягур В. М. (2021) «Комп'ютерно-інтегрований метод виявлення об'єктів поляризаційним тепловізором», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (85), с. 21-26. doi:10.20535/RADAP.2021.85.21-26
- [34] Vo-Dinh, T. (Ed.). Biomedical Photonics Handbook, 2014.
- [35] Robledo, L. A Survey of Land-Mine Detection Technology, 2007.
- [36] Benediktsson et al. Advances in Hyperspectral Image Classification. IEEE JSTARS, 2012.
- [37] Mykytenko, V. (2024). Electro-Optical Surveillance Systems for Unmanned Ground Vehicle. In: Bezuglyi, M., Bouraou, N., Mykytenko, V., Tymchyk, G., Zaporozhets, A. (eds) Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control, vol 511. Springer, Cham. pp 49–83. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_2
- [38] Richards, J.; Jia, X. Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer, 2005.
- [39] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. Digital Image Processing. Pearson, 2018.
- [40] Rogalski, A. Infrared Detectors, 2019.
- [41] SONY IMX219PQH5-C. URL <https://www.opensourceinstruments.com/Electronics/Data/IMX219PQ.pdf>
- [42] Lepton LWIR Micro Thermal Camera Module. [Електронний ресурс]. URL: <https://oem.flir.com/en-hk/products/lepton?vertical=microcam&segment=oem>
- [43] Foi, A., Trimeche, M., Katkovnik, V., Egiazarian, K. *Approximations to Camera Sensor Noise Characteristics*. 2008.
- [44] JOUAV. Ground Sample Distance (GSD): Definition and Practical Calculation. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.jouav.com/blog/ground-sample-distance.html>

- [45] Pix4D. *How to calculate GSD (Ground Sampling Distance)*. [Електронний ресурс]. URL: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809>
- [46] Benediktsson, J. A., Chanussot, J., & Pesaresi, M. *Reflectance and Albedo of Surfaces: Applications in Remote Sensing*. 2012.
- [47] Використано зображення. URL: <https://www.pix4d.com/blog/landmine-clearing-thermal-camera-drone>
- [48] «Pfm 1 landmine» Електронний ресурс]. URL: <https://cat-uxo.com/explosive-hazards/landmines/pfm-1-landmine>
- [49] Микитенко В. І., Шинкарьов Д. Д. Використання нейронних мереж для пошуку наземних мін. Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak., вип. 68(2), Груд. 2024. [https://doi.org/10.20535/1970.68\(2\).2024.318158](https://doi.org/10.20535/1970.68(2).2024.318158)
- [50] Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016.

ДОДАТКИ

Додаток А

Створення синтетичної сцени для моделювання

```
clear; clc; close all;

Nx = 512;
Ny = 512;
mine_radius = 40;
mine_center = [250, 300];

% 1. ГЕНЕРАЦІЯ ТЕКСТУРИ ҐРУНТУ
noise = imgaussfilt(rand(Ny, Nx)*0.6 + 0.4, 2); % плавний шум
ground_texture = mat2gray(noise); % нормалізація

figure; imshow(ground_texture);

% 2. ДОДАЄМО МІНУ ЯК ОКРЕМУ ОБЛАСТЬ
[X, Y] = meshgrid(1:Nx, 1:Ny);
mine_mask = ((X - mine_center(1)).^2 + (Y - mine_center(2)).^2) <= mine_radius^2;
mine_intensity = 0.2;
scene_optical = ground_texture;
scene_optical(mine_mask) = mine_intensity;

figure; imshow(scene_optical);

% 3. RGB ЗОБРАЖЕННЯ
R = scene_optical .* 0.7;
G = scene_optical .* 0.5;
B = scene_optical .* 0.3;

RGB_image = cat(3, R, G, B);
figure; imshow(RGB_image);

% 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ КАРТИ (ІЧ-СЦЕНА)
T_ground = 22 + 1*randn(Ny, Nx);
delta_T = 3;
T = T_ground;
T(mine_mask) = T(mine_mask) + delta_T;

% Фізична модель випромінювання за Стефан–Больцманом
sigma = 5.67e-8;
epsilon = 0.92
I_phys = epsilon * sigma * (T + 273.15).^4; % у Кельвіні

IR_norm = mat2gray(I_phys);
```

```

IR_blur = imgaussfilt(IR_norm, 1.7);      % розмиття мікроболометра
IR_noise = imnoise(IR_blur, 'gaussian', 0, 0.0008); % шум сенсора

IR_color = ind2rgb(gray2ind(IR_noise, 256), hot(256));

figure;
imshow(IR_color);

```

Додаток Б

Метод усереднення каналів

```

function fused = fcn(img1, img2)
img1 = double(img1);
img2 = double(img2);
fused = (img1 + img2) / 2;

```

Додаток В

Моделювання методом максимального інтенсивного злиття

```

function fused = fcn(img1, img2)

% Перевести у double
img1 = double(img1);
img2 = double(img2);

% Нормалізувати обидва канали у [0,1]
img1 = img1 - min(img1(:));
img1 = img1 / max(img1(:));

img2 = img2 - min(img2(:));
img2 = img2 / max(img2(:));

% Адаптивне злиття
% Гарантуємо, що сильні теплові сигнатури не втрачаються
max_part = max(img1, img2);

% Додаємо текстурну інформацію з RGB
avg_part = 0.3 * img1 + 0.7 * img2;

% Підсумкове злиття
fused_img = 0.6 * max_part + 0.4 * avg_part;

fused_img = fused_img - min(fused_img(:));
fused_img = fused_img / max(fused_img(:));

% Повернути у uint8 (Simulink-friendly)
fused = uint8(fused_img * 255);

end

```

Додаток Г

Wavelet злиття

```
Wavelet
function fused = fcn(img1, img2)

img1 = double(img1);
img2 = double(img2);

[h, w] = size(img1);

% Нормалізація
img1 = (img1 - min(img1(:))) ./ max(img1(:));
img2 = (img2 - min(img2(:))) ./ max(img2(:));

% Вейвлет-перетворення
[CA1, CH1, CV1, CD1] = dwt2(img1, 'db2');
[CA2, CH2, CV2, CD2] = dwt2(img2, 'db2');

% Злиття коефіцієнтів

% НИЗЬКОЧАСТОТНІ
CA = max(CA1, CA2);

% ПІДСИЛЮЄМО теплову інтенсивність
CA = CA * 1.8;

% ВИСОКОЧАСТОТНІ (текстура)
CH = max(CH1, CH2);
CV = max(CV1, CV2);
CD = max(CD1, CD2);

fused_img = idwt2(CA, CH, CV, CD, 'db2');

fused_img = imresize(fused_img, [h, w], 'bilinear');

% Нормалізація
fused_img = fused_img - min(fused_img(:));
fused_img = fused_img ./ max(fused_img(:));

fused = uint8(fused_img * 255);
```