

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«____» _____ 2024

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів»
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка» на тему: «Розробка алгоритмів обробки зображень для
поляриметричного тепловізора з метою підвищення ймовірності виявлення
об'єктів спостереження»

Виконав (-ла):
студент (-ка) II курсу, групи ПО-31мп
Крутиус Артур Романович _____

Керівник:
д.т.н., проф.
Колобродов Валентин Георгійович _____

Консультант зі стартап-проєкту:
Бояринова Катерина Олександрівна,
д.е.н., проф., завідувач кафедри
економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського _____

Рецензент:
доцент, к.т.н.,
Козир Олег Васильович _____

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

Студент (-ка) _____

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

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Надія БУРАУ

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Крутиусу Артуру Романовичу

1. Тема дисертації «Розробка алгоритмів обробки зображень для поляриметричного тепловізора з метою підвищення ймовірності виявлення об'єктів спостереження», науковий керівник дисертації Колобродов Валентин Георгійович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. №

2. Термін подання студентом дисертації: 9 грудня 2024 року

3. Об'єкт дослідження: оптико-електронна система комп'ютерно-інтегрованого поляриметричного тепловізора, включаючи її компонентну частину та алгоритми для обробки зображень.

Предмет дослідження: Ефективність оптичних компонентів системи, параметри поляриметричного блоку, розроблені алгоритми обробки та аналізу поляризованих зображень, а також оптимальність інтеграції елементів оптико-електронної системи для підвищення ефективності виявлення об'єктів.

4. Перелік завдань, які потрібно розробити:

4.1 Аналіз сучасних тепловізійних систем: Дослідження функціональності та технічних характеристик існуючих тепловізорів для визначення оптимальних параметрів оптико-електронної системи.

4.2 Розробка фізико-математичної моделі поляриметричного тепловізора.

4.3 Виконання габаритних та енергетичних розрахунків на основі заданої оптичної системи.

4.4 Розробка та оптимізація алгоритмів обробки зображень: Розробка програмних алгоритмів для ефективного виявлення, класифікації та аналізу теплових об'єктів на основі поляриметричних даних.

4.5 Експериментальні вимірювання: Проведення експериментів для збору даних та вимірювань, необхідних для оцінки ефективності та функціональності поляриметричного тепловізора.

5. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: таблиці, графіки, рисунки, схеми, діаграми тощо

6. Орієнтовний перелік публікацій: 1 стаття в матеріалах конференції

7. Консультанти розділів дисертації

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|-----------------------------|--|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Розроблення стартап-проекту | Бояринова Катерина Олександрівна, д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського | | |

8. Дата видачі завдання 15 жовтня 2024 року

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|---|--|----------|
| 1. | Виконання анотація дипломної роботи повинна включати такі елементи, як мету дослідження, ключові завдання, застосовані методи, наукову новизну та практичну значимість. | 20.10.2024 | |
| 2. | Аналіз літературних джерел за темою проєкту | 28.10.2024 | |
| 3. | Аналіз існуючих алгоритмів обробки поляриметричних зображень | 02.11.2024 | |
| 4. | Аналіз існуючих конструкторських рішень, щодо розробки оптико-електронної поляриметричного тепловізора | 12.11.2024 | |
| 5. | написання 2-го та 3-го розділів магістерської дисертації. Виконання енергетичних розрахунків. | 25.11.2024 | |
| 6. | розробка конструкторської документації приладу, написання програмної частини, для цифрової обробки поляриметричних тепловізійних зображень | 07.12.2024 | |

Студент

Науковий керівник дисертації

Артур КРУТИУС

Валентин КОЛОБРОДОВ

РЕФЕРАТ

Дисертація розглядає проблему створення оптико-електронної системи комп'ютерно-інтегрованого поляриметричного тепловізора на 181 аркушах з переліком посилань на 56 джерела.

Магістерська робота присвячена розробці алгоритмів обробки зображень для поляриметричного тепловізора з метою підвищення ймовірності виявлення об'єктів спостереження. Метою дослідження є розробка ефективних методів аналізу поляризаційної та теплової інформації для покращення розпізнавання та виявлення об'єктів у складних умовах спостереження.

У роботі проведено огляд існуючих методів обробки зображень для поляриметричних тепловізорів, а також розглянуто підходи до інтеграції поляризаційних характеристик для підвищення контрастності об'єктів. Окрему увагу приділено алгоритмам, які дозволяють оптимізувати параметри зображення для покращення детектування і розпізнавання, враховуючи температуру та поляризацію сцени.

Робота має значення для розвитку алгоритмів обробки зображень у сфері оптико-електронних систем і може бути використана в різноманітних галузях, включаючи військові, промислові та наукові дослідження, де важливо забезпечити точне і швидке виявлення об'єктів у складних умовах.

Ключові слова: поляриметричний тепловізор, поляризатор, оптична система, інфрачервоне випромінювання, фазова пластина, алгоритми обробки, лінза, поляризована хвиля, мікроболометрична матриця.

ABSTRACT

The thesis addresses the problem of creating an optoelectronic system for a computer-integrated polarimetric thermal imager, comprising 181 pages with references to 56 sources.

This master's thesis is dedicated to the development of image processing algorithms for a polarimetric thermal imager with the goal of enhancing the probability of object detection. The aim of the research is to develop effective methods for analyzing polarization and thermal information to improve the recognition and detection of objects in complex observation conditions.

The work includes an overview of existing image processing methods for polarimetric thermal imagers, as well as approaches to integrating polarization characteristics to enhance the contrast of objects. Special attention is given to algorithms that optimize image parameters to improve detection and recognition, considering the temperature and polarization of the scene.

This research is significant for the development of image processing algorithms in the field of optoelectronic systems and can be applied in various fields, including military, industrial, and scientific research, where accurate and rapid object detection in complex conditions is essential.

Keywords: polarimetric thermal imager, polarizer, optical system, infrared radiation, phase plate, optics, lens, polarized wave, microbolometric matrix.

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| ЗМІСТ | 6 |
| ВСТУП | 9 |
| ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ..... | 10 |
| РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ПРОЕКТУ ... | 12 |
| 1.1 Особливості тепловізорів | 12 |
| 1.2 Загальні відомості про поляриметричні тепловізори..... | 14 |
| 1.3. Аналіз існуючих рішень у поляриметричній тепловізійній техніці (огляд патентів та комерційних продуктів)..... | 15 |
| 1.3.1 Патентний пошук по темі методи обробки поляриметричних даних | 16 |
| 1.3.2 Патентний пошук по темі конструкції поляризаційних блоків | 19 |
| 1.3.3 Аналіз існуючих комерційних продуктів у поляриметричній тепловізійній оптиці..... | 24 |
| 1.4. Особливості оптики для ІЧ діапазоні..... | 36 |
| 1.5. Основи поляризації | 42 |
| 1.6 Визначення оптичної системи відповідно до поставленої задачі..... | 46 |
| Висновки до розділу 1 | 51 |
| .РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ МОДЕРНІЗОВАНОГО ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА..... | 53 |
| 2.1. Аналіз існуючих тепловізорів як основи для модифікації | 53 |
| 2.2 Вибір сервопривода | 71 |
| 2.3 Вибір поляризатора..... | 77 |
| 2.4 Вибір фазової пластинки | 82 |
| Висновок до розділу 2 | 90 |
| РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА та енергетичні розрахунки | 91 |
| 3.1 Основи поляризації світла..... | 91 |
| 3.2 Детальний опис параметрів Стокса..... | 91 |
| 3.3 Поляризація в природних умовах..... | 92 |
| 3.4 Вимірювання поляризації..... | 93 |
| 3.5 Поляриметричне підсилення контрасту зображень | 95 |
| 3.6 Використання гібридних підходів до обробки зображень | 96 |
| 3.7.1 Енергетичні розрахунки | 98 |
| 3.7.2 Розрунок MRTD та MDTD враховуючи поляризаційну | 100 |

| | |
|--|-----|
| Висновок до розділу 3 | 104 |
| РОЗДІЛ 4: АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ | 105 |
| 4.1 Попередня обробка поляриметричних зображень..... | 105 |
| 4.2 Виділення та аналіз поляризаційних параметрів..... | 105 |
| 4.3 Злиття даних для покращення зображень | 106 |
| 4.4 Інтелектуальні алгоритми для аналізу поляризаційних даних..... | 107 |
| 4.5 Моделювання та симуляція поляриметричних зображень | 108 |
| 4.6 Використання адаптивних фільтрів для динамічного шумозаглушення | 109 |
| 4.7 Поляризаційна деконволюція | 109 |
| 4.7.1 Метод Річардсона-Люсі (RL):..... | 111 |
| 4.7.2. Регуляризація методом Тихонова: | 111 |
| 4.8 Використання алгоритмів супер роздільної здатності..... | 113 |
| Висновок до розділу 4 | 116 |
| РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЄКТУ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА..... | 117 |
| 5.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту | 117 |
| 5.2 Аналіз ринкових можливостей та потенційних клієнтів | 121 |
| 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту | 124 |
| 5.4 Розроблення ринкової моделі проєкту..... | 133 |
| 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту | 136 |
| 5.5 Організація реалізації стартап-проєкту | 141 |
| 5.6 Розроблення бізнес-моделі стартап-проєкту..... | 145 |
| Висновки до розділу 5 | 150 |
| ВИСНОВКИ..... | 153 |
| ДОДАТОК 1..... | 160 |
| ДОДАТОК 3..... | 164 |
| ДОДАТОК 4..... | 169 |
| ДОДАТОК 6..... | 171 |
| ДОДАТОК 7..... | 173 |
| ДОДАТОК 8..... | 177 |
| ДОДАТОК 9..... | 179 |

1. **AЧТ** — абсолютно чорне тіло
2. **ІЧ** — інфрачервоне
3. **NIR** — Near Infrared (ближній інфрачервоний)
4. **SWIR** — Short-Wave Infrared (короткохвильове інфрачервоне випромінювання)
5. **MWIR** — Mid-Wave Infrared (середньохвильове інфрачервоне випромінювання)
6. **LWIR** — Long-Wave Infrared (довгохвильове інфрачервоне випромінювання)
7. **FIR** — Far Infrared (дальній інфрачервоний)
8. **AR** — Antireflective (антивідбивальне покриття)
9. **ER** — Extinction Ratio (коефіцієнт загасання)
10. **WFOV** — Wide Field of View (широке поле зору)
11. **NFOV** — Narrow Field of View (вузьке поле зору)
12. **NETD** — Noise Equivalent Temperature Difference (показник чутливості тепловізійної системи, що визначає мінімальну температурну різницю між об'єктами, яку пристрій може розрізнити)
13. **CNN** — Convolutional Neural Networks (згорткові нейронні мережі)
14. **KNN** — K-Nearest Neighbors (метод найближчих сусідів)
15. **DoLP** — Degree of Linear Polarization (ступінь лінійної поляризації)
16. **AoLP** — Angle of Linear Polarization (кут лінійної поляризації)
17. **MRTD** — Minimum Resolvable Temperature Difference (мінімальна помітна температурна різниця)
18. **ML** — Machine Learning (машинне навчання)
19. **AI** — Artificial Intelligence (штучний інтелект)
20. **MDTD** — Minimum Detectable Temperature Difference (мінімальна виявлювана температурна різниця)
21. **SNR** — Signal-to-Noise Ratio (відношення сигнал/шум)
22. **ROI** — Region of Interest (область інтересу)
23. **FPA** — Focal Plane Array (фокальна площина матриці)
24. **RMS** — Root Mean Square (середньоквадратичне значення)
25. **WP** — Wave Plate (хвильова пластинка)
26. **FOV** — Field of View (поле зору)

ВСТУП

В останні десятиліття поляриметричні тепловізори стали важливим інструментом для вирішення широкого спектра задач, пов'язаних з виявленням та розпізнаванням об'єктів у складних умовах спостереження. Системи такого типу дозволяють отримувати теплові зображення, які одночасно містять інформацію про поляризацію світла, що допомагає значно підвищити контрастність зображень та покращити ефективність детектування, особливо в умовах низької контрастності між об'єктами та фоном.

Актуальність розробки поляриметричних тепловізорів зумовлена необхідністю підвищення ефективності розпізнавання та виявлення об'єктів у таких сферах, як безпека, оборона, екологія, а також у промислових та наукових дослідженнях. Зокрема, поляризаційні властивості можуть значно покращити можливості виявлення об'єктів, що мають схожі температури з фоном, шляхом додаткової інформації про їх структуру та характеристики.

Метою цієї роботи є розробка та вдосконалення алгоритмів обробки зображень для поляриметричного тепловізора, які дозволяють підвищити ймовірність виявлення об'єктів спостереження в складних умовах. В роботі запропоновано інтеграцію поляризаційної інформації з тепловими зображеннями для досягнення більш високої точності детектування, а також було розглянуто ефективні методи обробки поляриметричних даних, що сприяють покращенню розпізнавання об'єктів

Для досягнення цієї мети в роботі здійснено аналіз існуючих рішень у галузі поляриметричних тепловізорів, обрано оптимальні компоненти для їх створення та розроблено алгоритми, які підвищують контрастність та зменшують вплив шуму на якість зображень. Результати дослідження мають важливе значення для розвитку поляриметричних технологій і можуть бути застосовані в різних сферах, де необхідно забезпечити точне виявлення об'єктів.

Таким чином, робота спрямована на вирішення важливої проблеми розвитку поляриметричних тепловізійних систем та вдосконалення алгоритмів обробки зображень, що підвищують їх ефективність в реальних умовах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Мета роботи: Розробити алгоритми обробки та аналізу зображень для поляриметричного тепловізора з метою підвищення ймовірності виявлення об'єктів спостереження, а також здійснити проектування, розробку та модернізацію оптико-електронної системи поляриметричного тепловізора.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз існуючих методів та алгоритмів обробки поляриметричних зображень, визначити їх переваги та недоліки.

2. Вивчити методи аналізу поляризаційних характеристик і оцінити їхню ефективність для виявлення об'єктів у складних умовах спостереження.

3. Спроекувати та розробити оптико-електронну систему поляриметричного тепловізора, включаючи вибір оптимальних компонентів і інтеграцію поляриметричного блоку.

4. Виконати модернізацію існуючих компонентів системи для покращення характеристик поляриметричного тепловізора.

5. Провести експериментальну перевірку створеної оптико-електронної системи, оцінити її ефективність та можливість застосування в реальних умовах.

Зміст дослідження:

1. Огляд сучасних тепловізійних та поляризаційних систем.

2. Пошук способів реалізації тепловізійної поляриметричної системи .

3. Огляд сучасних алгоритмів обробки поляризаційних зображень і їх аналізу

4. розробка алгоритмів обробки поляризаційних зображень і їх аналізу.

5. Розробка макету приладу.

Об'єкт дослідження: Оптико-електронна система комп'ютерно-інтегрованого поляриметричного тепловізора, включаючи її компонентну частину та алгоритми для обробки зображень.

Предмет дослідження: Ефективність оптичних компонентів системи, параметри поляриметричного блоку, розроблені алгоритми обробки та аналізу

поляризованих зображень, а також оптимальність інтеграції елементів оптико-електронної системи для підвищення ефективності виявлення об'єктів

.Методи дослідження:

1. Аналіз сучасних тепловізійних систем: Дослідження функціональності та технічних характеристик існуючих тепловізорів для визначення оптимальних параметрів оптико-електронної системи.

2. Експериментальне моделювання: Створення та тестування модельних прототипів поляриметричного блоку та оптико-електронної системи для вибору оптимальних компонентів.

3. Розробка та оптимізація алгоритмів обробки зображень: Розробка програмних алгоритмів для ефективного виявлення, класифікації та аналізу теплових об'єктів на основі поляриметричних даних.

4. Експериментальні вимірювання: Проведення експериментів для збору даних та вимірювань, необхідних для оцінки ефективності та функціональності розробленого поляриметричного тепловізора.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ПРОЕКТУ

1.1 Особливості тепловізорів

Всі тіла, нагріті до певної температури, випромінюють електромагнітні хвилі. Кількість випромінювання зазвичай залежить від температури об'єкта та властивостей його поверхні. Для опису теплового поля використовують концепцію ефективної температури поверхні, що визначається як температура абсолютно чорного тіла (далі АЧТ), яке випромінює такий же променевий потік. ІЧ-випромінювання не лише містить інформацію про вказані параметри, але й відображає процеси, що відбуваються всередині об'єкта.

Ось як зазвичай класифікують ІЧ-діапазон:

6. Близький інфрачервоний (NIR, Near Infrared): 0.74–1.4 мкм.
7. Короткохвильовий інфрачервоний (SWIR, Short-Wave Infrared): 1.4–3 мкм.
8. Середньохвильовий інфрачервоний (MWIR, Mid-Wave Infrared): 3–8 мкм.
9. Довгохвильовий інфрачервоний (LWIR, Long-Wave Infrared): 8–15 мкм.
10. Дальній інфрачервоний (FIR, Far Infrared): 15–1000 мкм.

Основний принцип та функція тепловізійних пристроїв полягають в конвертації невидимого для людського ока інфрачервоного (ІЧ) випромінювання об'єктів у видиме зображення. Це зображення формується з власного теплового випромінювання та випромінювання фонів, і суттєво відрізняється від зображення, отриманого в видимому діапазоні.

Наприклад, теплове зображення, зафіксоване тепловізійним пристроєм, відрізняється від аналогічного видимого зображення, оскільки воно не має тіней, що може ускладнювати просторове сприйняття.

Теплове випромінювання об'єктів і фонів проникає через атмосферу та потрапляє до оптичної системи пристрою. Після того, як оптична система сформує зображення на площині аналізатора, відбувається конвертація просторового розподілу енергії в часовий розподіл променевого потоку, який приймається приймачем випромінювання. Приймач перетворює отриманий сигнал в електричний, який потім підсилюється та обробляється обробником

відеосигналу. Після цього відформований сигнал відображається у вигляді зображення на моніторі для спостерігача.

Об'єктами спостереження за допомогою системи, що працює в інфрачервоному діапазоні можуть бути будь-які живі і не живі цілі (машини, будівлі, тварини т.і.) , що нагріті до певної температури, так само і з фонами (небо, кущі, гори). Функціональна схема загальної термографічної системи наведена на рис.1.4.1. [1]

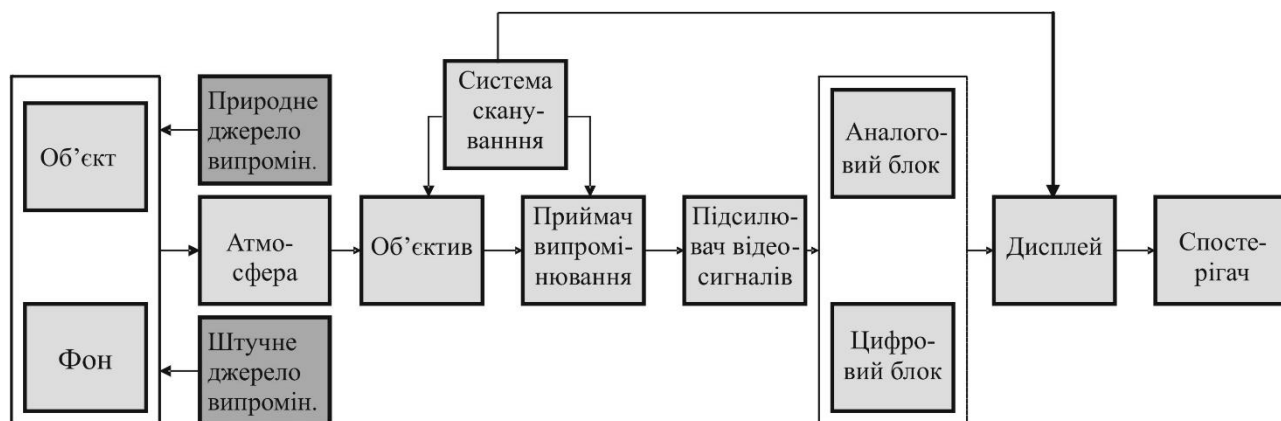


Рисунок 1.1.1 Загальна функціональна термографічна схема [1]

Атмосфера впливає на параметри поширення випромінювання, які випадковим чином змінюються у часі. Поглиблення в атмосфері відбувається через взаємодію з молекулами вуглекислого газу та води.

Аналізатори бувають електронними і механічними з 2-ма принципами перетворення двовимірної сигналу у одновимірний.

У системах тепловачення ключовим компонентом є приймач, який визначає функціональні можливості системи і відповідає за перетворення світлової енергії в електричний сигнал. Фактично, його роль схожа на роль детектора сигналу.

Підсилювач виконує завдання підсилення сигналу, отриманого від приймача випромінювання, та передачі підсиленого сигналу на обробник відеосигналу. Основними характеристиками підсилювача є полоса пропускання, коефіцієнт підсилення та рівень власного шуму.

Блок обробки відеосигналу виконує функцію відсіювання непотрібного сигналу та створення необхідної інформації у зручному форматі для оператора.

Сучасні тепловізори вирішують різноманітні завдання. Класифікація пристроїв цього типу проводиться за різними критеріями, такими як вартість, особливості експлуатації та технічні характеристики.

1.2 Загальні відомості про поляриметричні тепловізори

Поляриметричний тепловізор – вид оптико-електронної системи, яка використовує поляризаційну інформацію у спектрі інфрачервоного випромінювання. Це означає, що пристрій аналізує коливання світлових хвиль у різних напрямках, що дозволяє отримати більше даних про об'єкти, ніж просто їх температура чи форма.[2]

У наукових дослідженнях поляриметричні тепловізори використовуються для вимірювання та аналізу теплових характеристик різних матеріалів і систем. Ці прилади застосовуються для дослідження явищ, що включають в себе взаємодію світла з різними об'єктами, такі як розсіювання, відбивання та випромінювання.

У військовій сфері поляриметричні тепловізори використовуються для підвищення ефективності систем оборони. Вони допомагають виявити, ідентифікувати та відслідковувати потенційні загрози. Зокрема, вони використовуються в системах спостереження та відслідковування, системах керування вогнем та в інших системах захисту. [2]

Поляриметричні тепловізори, як і тепловізори, які не використовують поляриметрії, можна розділити на кілька типів в залежності від діапазону довжин хвиль, на якому вони працюють:

SWIR (Short-Wave Infrared): Ці тепловізори оперують у діапазоні від 0,9 до 1,7 мікромметра. Вони використовуються для виявлення об'єктів, які випромінюють обмежене тепло або взагалі не випромінюють його. SWIR-тепловізори можуть визначати об'єкти за допомогою відбитого світла, що дозволяє їм ефективно працювати в умовах обмеженого освітлення. Вони також можуть проникати через деякі матеріали, такі як скло.

MWIR (Mid-Wave Infrared): MWIR-тепловізори операційно в діапазоні від 3 до 5 мікрометрів. Вони здатні виявляти об'єкти, які випромінюють середню

кількість тепла. Зазвичай використовуються для військових і промислових застосувань, таких як детектування газів або виявлення несправностей у машинному обладнанні.

LWIR (Long-Wave Infrared): LWIR-тепловізори функціонують у діапазоні від 8 до 14 мікрометрів. Вони використовуються для виявлення об'єктів, які випромінюють велику кількість тепла, і застосовуються для виявлення теплових витоків в будівлях, виявлення людей або тварин в темряві, а також для військових застосувань.

У випадку поляриметричних SWIR-камер, вони використовуються для виявлення, ідентифікації та слідкування за об'єктами, такими як групи безпілотних літальних апаратів. Їхні поляриметричні потоки зображень аналізуються в реальному часі за допомогою алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для максимального освітлення ситуації.

1.3. Аналіз існуючих рішень у поляриметричній тепловізійній техніці (огляд патентів та комерційних продуктів)

Поляриметричні тепловізори представляють собою новий напрямок у тепловізійній техніці, що використовує властивості поляризованого теплового випромінювання для отримання додаткової інформації про об'єкти. У цій галузі активно ведуться розробки як у науково-дослідному середовищі, так і на комерційному ринку.

Патентні рішення

Серед основних патентів, які визначають розвиток поляриметричної тепловізійної техніки, можна виділити:

- Методи обробки поляриметричних даних: Багато патентів зосереджено на алгоритмах обробки поляриметричних зображень, що дозволяють відокремлювати характеристики об'єктів, як-от текстура поверхні, матеріал чи напрямок випромінювання.
- Конструкції поляризаційних блоків: Значна кількість патентів стосується інтеграції поляризаційних пластин та чвертьхвильових

елементів у тепловізори для досягнення максимальної точності вимірювань.

1.3.1 Патентний пошук по темі методи обробки поляриметричних даних

Обробка поляриметричних зображень є критично важливою складовою у вдосконаленні точності поляриметричних тепловізорів. Вона дозволяє аналізувати поляризаційні параметри теплового випромінювання, що забезпечує додаткову інформацію про структуру, матеріал і властивості об'єктів. Нижче наведено основні патенти, які відображають сучасні досягнення у цій сфері.

Патент №11,068,700 (2021)

Цей патент описує методику обчислення **параметрів Стокса (S0, S1, S2)**, які визначають ступінь поляризації та орієнтацію поляризаційного випромінювання. Алгоритм базується на вимірюванні інтенсивності поляризованого випромінювання через оптичні фільтри з різними кутами орієнтації. Отримані дані обробляються для формування точного профілю текстури або матеріалу об'єкта. Така технологія широко використовується для виявлення малопомітних об'єктів у складних середовищах, включаючи задимлення або сильний тепловий шум. Основними перевагами є підвищення точності виявлення й можливість аналізу об'єктів із комплексною поверхневою структурою[3]

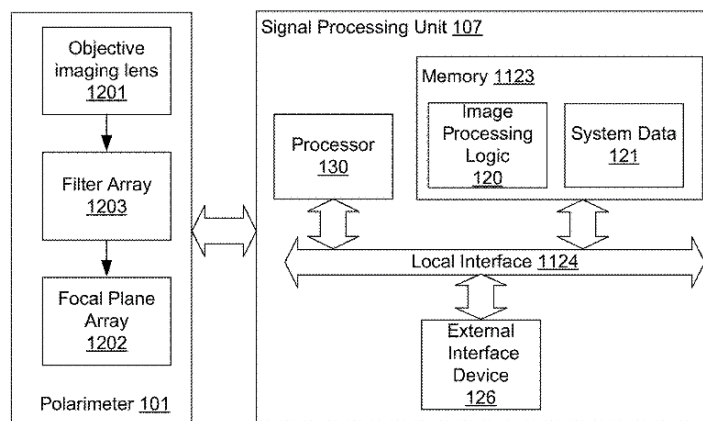
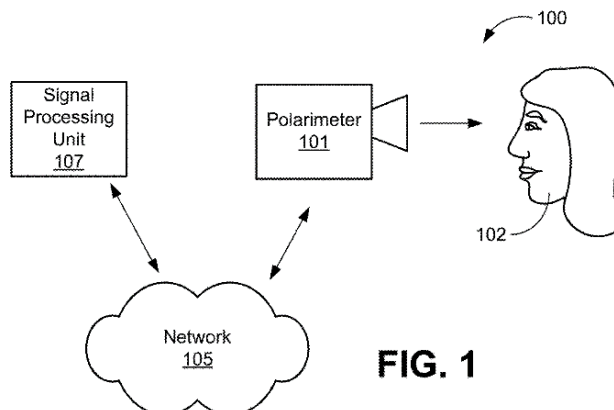


FIG. 2

Рисунок 1.3.1 загальна схема запатентованого методу цифрової обробки поляризаційних зображень з патенту №11,068,700 [3]

Патент PCT/US2018/067109

У цьому патенті деталізується використання **субпіксельних датчиків** для обчислення поляризаційного сигналу. Датчики побудовані на базі наноматеріалів, які дозволяють визначати компоненти лінійної та циркулярної поляризації. Основною інновацією є інтеграція таких датчиків у мікроболометричні масиви, що забезпечує точне вимірювання без потреби у складному зовнішньому обладнанні. Завдяки цьому підходу можна отримувати більш точні дані про кути та інтенсивність поляризації навіть при малих змінах умов освітлення. Така технологія є перспективною для військових і наукових досліджень, де потрібна висока точність і надійність [3]

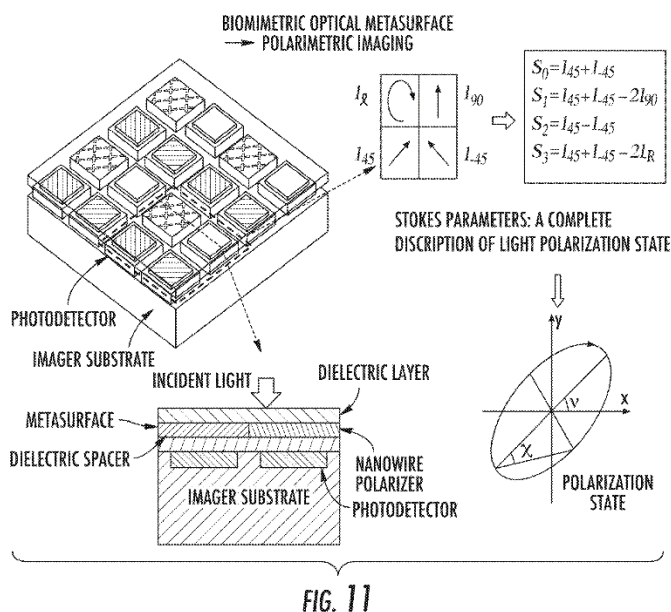
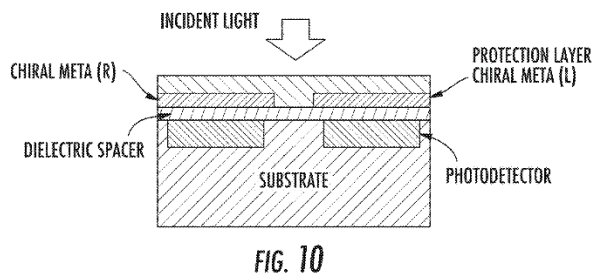


Рисунок 1.3.2 загальна схема запатентованого методу виявлення поляризації на приймачу та поляриметрична візуалізація з патенту PCT/US2018/067109 [4]

Патент US 10,324,825

Цей патент фокусується на автоматизованій корекції поляризаційного сигналу під час обробки зображень. Він описує алгоритм компенсації поляризаційних викривлень, які виникають через недосконалість оптичних елементів або зміну кутів огляду. Алгоритм використовує матричні перетворення для обчислення коригувальних коефіцієнтів і інтегрує їх у реальному часі під час формування зображень. Це забезпечує високу точність аналізу навіть у динамічних умовах, наприклад, під час руху платформи або об'єкта спостереження. Такий підхід є революційним для тепловізорів, які працюють у складних умовах[5]



FIG. 10

Рисунок 1.3.3 приклади кадрів при використанні запатентованого методу покращення поляризаційного зображення для розпізнавання обличчя з патенту №10,324,825 [6]

1.3.2 Патентний пошук по темі конструкції поляризаційних блоків

Поляризаційні блоки є важливим елементом поляриметричних тепловізорів, оскільки вони відповідають за фільтрацію та обробку поляризованого випромінювання, що дозволяє отримувати додаткову інформацію про об'єкти. Розробка цих блоків зосереджена на підвищенні чутливості, точності та компактності пристроїв. Нижче наведено аналіз ключових патентів, що демонструють сучасні досягнення в цій галузі.

Патент US 12,018,983

Цей патент описує поєднання мультиспектрального та поляризаційного фільтрів у єдиній оптичній системі, що дозволяє створювати поляризаційно-чутливі тепловізійні системи. Фільтри можуть змінювати орієнтацію поляризації в межах від -90° до $+90^\circ$, що дозволяє більш ефективно відокремлювати цілі від фону на основі їх поляризаційних характеристик. Інтеграція таких фільтрів із фокальною площиною (FPA) забезпечує високу просторову роздільну здатність і здатність виконувати вимірювання ступеня лінійної поляризації (DoLP), що

особливо корисно для виявлення штучних об'єктів у природних середовищах [7].

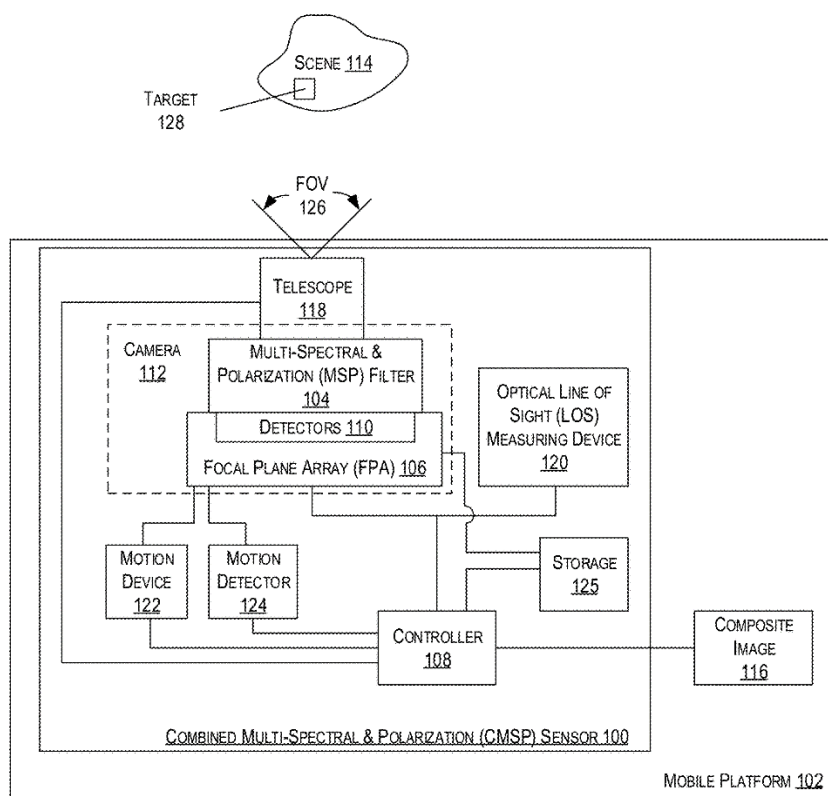


FIG. 1

Рисунок 1.3.4 загальна схема запатентованого методу описує поєднання мультиспектрального та поляризаційного фільтрів з патенту US 12,018,983 [8]

Патент US 2013/0335735

Патент стосується інноваційної системи двовимірної (2D) оптичної спектроскопії, яка дозволяє аналізувати спектр у двох вимірах: по осі збудження та осі випромінювання. Цей підхід забезпечує отримання інформації, яка недоступна за допомогою традиційної одномірної (1D) оптичної спектроскопії.

Основна проблема, яку вирішує винахід, полягає в складності існуючих систем для 2D спектроскопії, які зазвичай є громіздкими лабораторними установками. Запропоноване рішення базується на монолітній платформі, що значно зменшує складність системи та підвищує її надійність. Такий підхід дозволяє створювати компактні "чорні ящики", які можна комерційно

використовувати у вигляді модулів для 2D спектроскопії.

Додатково, винахід підтримує високі частоти повторення імпульсів і забезпечує можливість проведення як однофотонних, так і двофотонних вимірювань під електронним управлінням, що розширює спектр застосувань у науці та промисловості. [9].

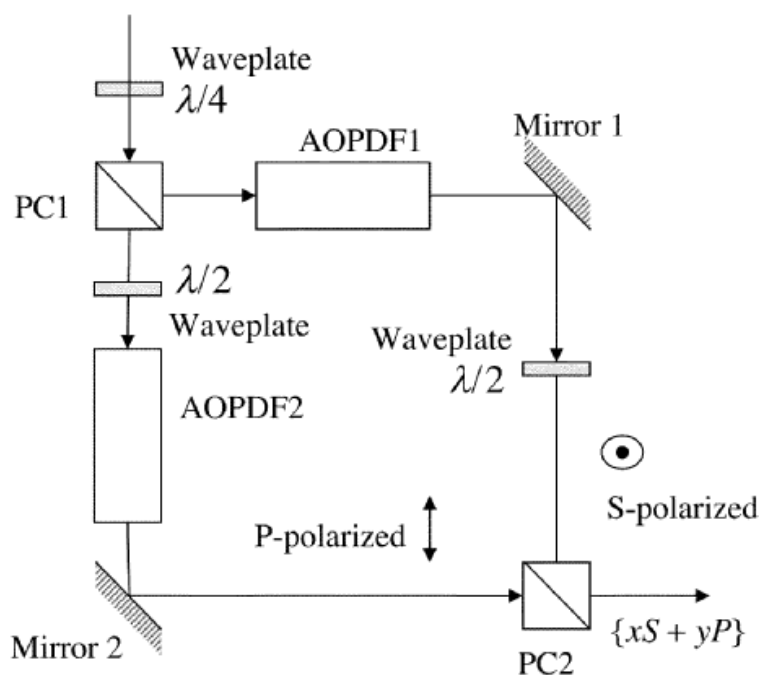


Рисунок 1.3.5 загальна схема запатентованого методу описує поєднання мультиспектрального та поляризаційного фільтрів з патенту US 2013/0335735

[10]

Патент US 10,775,298 (2020) описує інноваційну систему для еліпсометрії та поляриметрії, яка використовує серводвигун для обертання поляризатора. Ця система включає в себе повітряні підшипники, що значно знижують тертя при обертанні механізмів. Завдяки цьому, підвищується точність і стабільність вимірювань поляризаційного світла, що є критично важливим для точної реєстрації даних про поляризаційні характеристики матеріалів.

Серводвигун забезпечує автоматичне налаштування поляризатора з високою точністю, що дозволяє проводити вимірювання в реальному часі. Це дозволяє отримати точні дані про поляризацію випромінювання, які можуть бути

використані в наукових дослідженнях, індустріальних вимірюваннях та оптичних технологіях. Система, описана в патенті, значно покращує ефективність і точність вимірювань поляризації, що робить її корисною для широкого спектра застосувань у наукових і промислових умовах.[\[11\]](#)

U.S. Patent Sep. 15, 2020 Sheet 1 of 2 US 10,775,298 B1

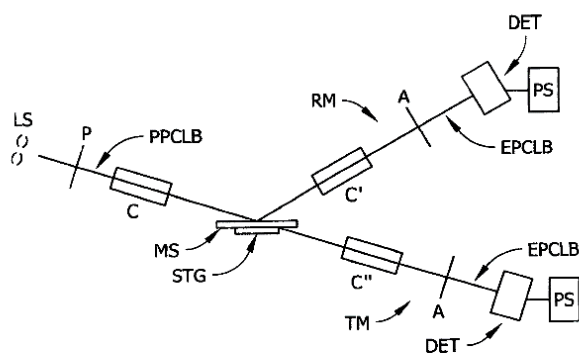


FIG. 1

Рисунок 1.3.6 загальна схема запатентованої інноваційну систему для еліпсометрії та поляриметрії, яка використовує серводвигун для обертання поляризатора з патенту US 10,775,298 [\[11\]](#)

Патент US 5,005,977 (1991) описує систему поляриметра, який використовує кроковий мотор для обертання поляризатора. Основною ідеєю цього патенту є забезпечення точного налаштування поляризатора для поляриметричних вимірювань, що дає змогу виконувати як грубі, так і тонкі налаштування положення поляризатора.

Кроковий мотор забезпечує поступове обертання поляризатора, що дозволяє точно контролювати його орієнтацію з високою точністю. Цей механізм дозволяє здійснювати тонке налаштування кута, що важливо для високоточних вимірювань, таких як аналіз поляризаційного випромінювання. Кроковий мотор також дає можливість налаштувати поляризатор на великий кут

обертання, що може бути корисним для досліджень, де необхідна зміна положення в широкому діапазоні.

Кроковий мотор має перевагу перед звичайними моторами в тому, що він може рухатися на чітко визначену кількість кроків, що забезпечує точність регулювання кута обертання поляризатора. Такий підхід дозволяє стабільно і точно проводити поляриметричні вимірювання навіть у динамічних умовах, де інші механізми можуть втратити точність.

Ця система є важливою для точних наукових досліджень і промислових застосувань, де необхідно точно контролювати поляризаційні характеристики матеріалів або вимірювати оптичну активність. [12]

U.S. Patent Apr. 9, 1991 Sheet 1 of 1 5,005,977

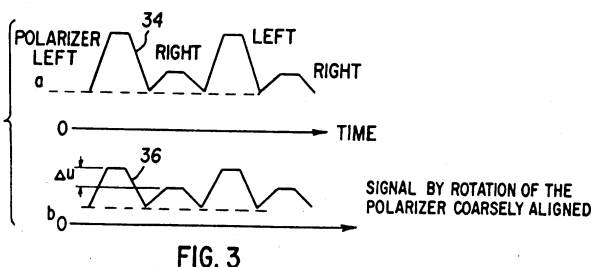
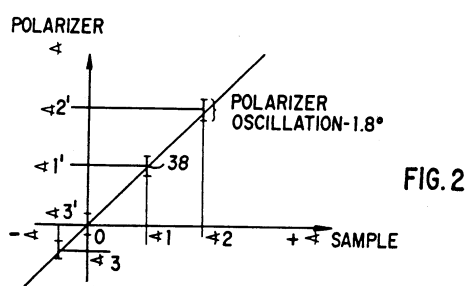
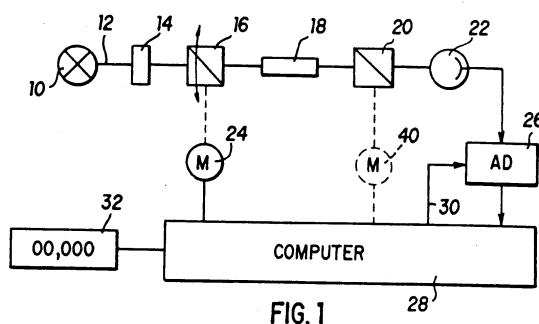


Рисунок 1.3.7 загальна схема запатентованого методу який використовує кроковий мотор для обертання поляризатора за допомогою крокового двигуна US 5,005,977 [13]

1.3.3 Аналіз існуючих комерційних продуктів у поляриметричній тепловізійній оптиці.

1. Polaris Systems: Puxis LWIR HD

Таблиця 1.3.1 – Характеристики поляриметричного тепловізора Systems: Puxis LWIR HD[14]

| Параметр | Без об'єктива | 20 мм f/0.85 | 40 мм f/1 | 75 мм f/1 | 15-75 мм f/1.2 |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Діапазон довжин хвиль | 7.5–13.5 мкм | 7.5–13.5 мкм | 7.5–13.5 мкм | 7.5–13.5 мкм | 7.5–13.5 мкм |
| Роздільна здатність | 1280 × 1024 (10 мкм пікселі) | 1280 × 1024 | 1280 × 1024 | 1280 × 1024 | 1280 × 1024 |
| Поле зору (Г × В) | N/A | 36.4° × 29.2° | 18.2° × 14.6° | 9.8° × 7.8° | 46.2° × 37.7° до 9.8° × 7.8° |
| IFOV (просторова роздільність) | N/A | 500 мкрад | 250 мкрад | 133 мкрад | 667 мкрад до 133 мкрад |
| Розмір із об'єктивом (Д×Ш×В) | 70 × 55 × 60 мм | 70 × 55 × 65 мм | 122 × 52.1 × 67.1 мм | 181 × 88.9 × 88.9 мм | 181 × 88.9 × 88.9 мм |
| Вага | 110 г | 156 г | 312 г | 822 г | TBD |
| Частота кадрів | 30 Гц | 30 Гц | 30 Гц | 30 Гц | 30 Гц |
| Вхідна напруга | 5 В постійного струму або POE | 5 В постійного струму або POE | 5 В постійного струму або POE | 5 В постійного струму або POE | 5 В постійного струму або POE |

| | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Енергоспоживання (70°F) | TBD | TBD | TBD | TBD | TBD |
| Робоча температура | 0°C до 70°C | 0°C до 70°C | 0°C до 70°C | 0°C до 70°C | 0°C до 70°C |



Рисунок 1.3.8 загальний вигляд поляриметричного тепловізора [14]

Цей поляриметричний тепловізор є передовим рішенням від Polaris Sensor Technologies. **Pyxis LWIR HD** інтегрує функції тепловізійного і поляриметричного зображення в одній системі, забезпечуючи вищий контраст і деталізацію порівняно з традиційними тепловізорами. Пристрій оснащений мікросітчастою матрицею для одночасного збору всіх станів поляризації, що дозволяє ефективно знижувати вплив рухомих артефактів. Pyxis HD забезпечує високу точність виявлення об'єктів, особливо за умов низького контрасту або термічної рівноваги між об'єктами і фоном[14]

2. Pyxis SWIR



Рисунок 1.3. Загальний вигляд поляриметричного тепловізора Ruxis SWIR [14]

Ruxis SWIR – це передовий поляриметричний тепловізор, розроблений компанією Polaris Sensor Technologies, спеціально для застосування у ближньому інфрачервоному (SWIR) діапазоні. Його основною особливістю є інтеграція технології "Division of Focal Plane" (DoFP), яка дозволяє здійснювати поляриметричні вимірювання без рухомих частин. У цій системі використовуються піксельні поляризаційні фільтри, прикріплені безпосередньо до матриці фокальної площини (FPA), що забезпечує отримання повного набору поляризаційних даних за один кадр. Такий підхід усуває проблеми зі спотворенням, спричиненим рухом, і підвищує надійність роботи на рухомих платформах, таких як безпілотники або транспортні засоби.

Ruxis SWIR забезпечує роздільну здатність 640×512 пікселів із розміром пікселя 10 мкм, що дозволяє досягти високої якості зображення навіть в умовах обмеженої видимості, таких як туман, дим або низька освітленість. Пристрій також інтегрує програмовані електронні компоненти для обробки даних у реальному часі, створюючи як радіометричні, так і поляриметричні продукти. Ruxis SWIR дозволяє ефективно розпізнавати та класифікувати складні об'єкти, наприклад, у природному середовищі чи серед фонових перешкод, таких як тіні або нерівні поверхні. Це робить його ідеальним для військових, морських рятувальних операцій, розвідки та промислових застосувань [57] [78].

Пристрій також використовує алгоритми для аналізу ступеня лінійної поляризації (DOLP) і кутів поляризації, що допомагає виявляти об'єкти з високим

контрастом до навколишнього середовища. Це особливо корисно для таких завдань, як ідентифікація транспортних засобів, визначення місцезнаходження нафтопродуктів на воді чи виявлення об'єктів серед рослинності [15] [14].

Таблиця 1.3.2 – Характеристики поляриметричного тепловізора Systems: Puhis SWIR [14]

| | 16мм f/1.4 | 25мм f/1.4 | 35мм f/1.4 | 50мм f/1.8 |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Приймач | InGaAs | | | |
| Діапазон довжин хвиль | 0.6мкм – 1.5мкм | | | |
| Розмір пікселя | 15мкм | | | |
| Роздільна здатність (H × V) | 640 × 512 пікселів | | | |
| Частота кадрів | до 60 Гц | | | |
| Габарити без об'єктива (L × W × H) | 107.5 × 50 × 50 мм | | | |
| Габарити з об'єктивом (L × W × H) | 135.7 × 50 × 50 мм | 143.5 × 50 × 50 мм | 145.7 × 50 × 50 мм | 145.7 × 50 × 50 мм |
| Вага без об'єктива | 340г | | | |
| Вага з об'єктивом | 400 г | 411.2 г | 427 г | 425 г |
| Вхідна наруга | 12Вольт DC | | | |
| Енергосопживання | < 8Вт | | | |
| Інтерфейс даних | GigE | | | |
| Робоча температура | -20°C to +55°C | | | |
| Поле зору (H × V) | 33.4° × 27° | 21.7° × 17.5° | 15.6° × 12.5° | 11° × 8.8° |

| | | | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Миттєве поле зору | 937 мкм | 600 мкм | 429 мкм | 300 мкм |
| Діапазон відстаней до об'єкта | 0.3m – INF | 0.3m – INF | 0.3m – INF | 0.3m – INF |

3. Рухіс VIS



Рисунок 1.3.10 загальний вигляд поляриметричної камери Рухіс VIS[14]

Рухіс VIS – це поляриметрична камера від Polaris Sensor Technologies, яка працює у видимому спектрі (400–900 нм) і використовує технологію Division of Focal Plane (DoFP). Завдяки піксельованим поляризаційним елементам, інтегрованим у фокальну площину матриці, Рухіс VIS забезпечує одночасне захоплення поляризаційної інформації для кожного пікселя. Це робить її

придатною для застосувань, де потрібна висока точність виявлення матеріалів, аналізу механічних напружень або візуалізації текстури поверхонь.

Камера може використовуватися для зменшення відблисків, покращення контрастності та визначення кутів поляризації. Рухіс VIS має компактний корпус (43×29×29 мм без об'єктива), роздільну здатність 2448×2048 пікселів і підтримує об'єктиви з фокусними відстанями від 12 до 75 мм. Вона також оснащена інтерфейсом USB 3.0, що дозволяє передавати дані в реальному часі для подальшої обробки, наприклад, через програму Vega Software від Polaris[14][16]

Ця модель особливо ефективна для наукових досліджень, візуалізації напружень у матеріалах, а також для завдань, де потрібна інтеграція видимого та поляризаційного аналізу, наприклад, у промисловій діагностиці чи моніторингу.

. Таблиця 1.3.3 – Характеристики поляриметричного тепловізора Systems: Рухіс SWIR [14]

| | 12мм | 16мм | 25мм | 35мм | 50мм | 75мм |
|-----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | f/1.4 | f/1.4 | f/1.4 | f/1.4 | f/1.8 | f/1.8 |
| Приймач | CMOS Mono | | | | | |
| Діапазон довжин хвиль | 400нм – 900нм | | | | | |
| Розмір пікселя | 3.45мкм | | | | | |
| Роздільна здатність (H × V) | 2448 × 2048 пікселів | | | | | |
| Частота кадрів | до 30 Гц | | | | | |
| Габарити без об'єктива | 43 × 29 × 29 мм | | | | | |

| | | | | | | |
|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| (L × W × H) | | | | | | |
| Габарити з об'єктивом (L × W × H) | 82.2 × 35 × 35мм | 85.4 × 35 × 35мм | 81.4 × 35 × 35мм | 82.2 × 35 × 35мм | 115.2 × 36 × 36мм | 115.2 × 36 × 36мм |
| Вага без об'єктива | 65г | | | | | |
| Вага з об'єктивом | 165г | 173г | 151г | 149г | 178г | 211г |
| Вхідна наруга | 5VDC | | | | | |
| Енергосопживання | 4 Вт | | | | | |
| Інтерфейс даних | USB 3.0 | | | | | |
| Робоча температура | -5°C to +45°C | | | | | |
| Поле зору (H × V) | 38.8° × 32.8° | 29.6° × 24.98° | 19.2° × 16.1° | 13.8° × 11.5° | 9.7° × 8.1° | 6.4° × 5.4° |
| Миттєве поле зору | 287 μrad | 216 мкрад | 138 мкрад | 99 мкрад | 69 мкрад | 46мкрад |
| Діапазон відстаней до об'єкта | 0.1 m – INF | 0.2m – INF | 0.3m – INF | 0.4m – INF | 0.5m – INF | 0.6m – INF |

4. DIPOLE



Рисунок 1.3.11 загальний вигляд поляриметричного камери DIPOLE [14]

DIPOLE — це передова мультиспектральна поляриметрична камера, яка забезпечує покращену продуктивність завдяки використанню технології одночасного зображення на кількох довжинах хвиль. Завдяки інтеграції поляриметричних алгоритмів ця система дозволяє отримувати деталізовані зображення в умовах, де звичайні тепловізори стикаються з труднощами, такими як низький тепловий контраст чи маскувальні перешкоди.

Головною перевагою DIPOLE є можливість працювати в мультиспектральному режимі, що дозволяє ефективно виявляти замасковані об'єкти, зменшувати вплив фонових перешкод та покращувати якість зображення. Це робить пристрій ідеальним для військових і безпекових застосувань, де точність виявлення об'єктів і підвищення контрасту є критичними. Крім того, технологія підтримує зображення у складних умовах, таких як дим, пил або погане освітлення, що значно розширює спектр її використання.

Ця камера також може використовуватися в наукових і промислових

задачах, наприклад, для моніторингу текстури матеріалів, аналізу поверхневих дефектів або дослідження структурних властивостей. Завдяки своїй здатності адаптуватися до різних сценаріїв візуалізації DIPOLE забезпечує конкурентні переваги у сфері тепловізійної технології.

Таблиця 1.3.4– Технічні характеристики тепловізійного приладу DIPOLE (

| Показник | Одиниці вимірювання | Символьне позначення | Номинальне значення | Примітка |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Фокусна відстань | мм | f' | Вказується відповідно до об'єктива | Для камер DIPOLE можливий діапазон від 12 мм до 75 мм |
| Вхідна зіниця | мм | D | Вказується для обраного об'єктива | Наприклад, для f/1.8: 16.6 мм для 50 мм об'єктива |
| Розмір пікселя | мкм | $VD \times WD$ | 14 × 14 | Стандартний параметр для сенсорів CMOS |
| Роздільна здатність | кількість пікселів | N | 640 × 512 | Підтримується для аналізу поляризаційних зображень |
| Діапазон хвильових довжин | мкм | $\lambda_1 \dots \lambda_2$ | 7.5 ... 13.5 | Підходить для аналізу у довгохвильовому у інфрачервоному |

| | | | | |
|---------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------------|---|
| | | | | діапазоні |
| Температурний діапазон | °C | $T_1 \dots T_2$ | 0 ... +70 | Робочий діапазон, підходить для промислових і польових умов |
| Енергоспоживання | Вт | P | <8 | Можливість використання із мобільними платформами |
| Вхідна напруга | В постійного струму | V_{in} | 5 | Інтерфейс живлення для портативних систем |
| Частота кадрів | Гц | f_{frame} | до 60 | Забезпечує динамічну обробку зображень у реальному часі |
| Поле зору (FOV) | (Г × В) | $H \times V$ | Вказується відповідно до об'єктива | Наприклад, $33.4^\circ \times 27^\circ$ для 16 мм |
| Миттєве поле зору (IFOV) | мкрад | - | 99 | Наприклад, для об'єктива 35 мм |
| Габарити без об'єктива | мм | $L \times W \times H$ | $43 \times 29 \times 29$ | Компактні розміри дозволяють інтеграцію з |

| | | | | |
|---------------------------------|----|-----------------------|---|---|
| | | | | мобільними платформами |
| Габарити з об'єктивом | мм | $L \times W \times H$ | Від $82.2 \times 35 \times 35$ до $115.2 \times 36 \times 36$ | Залежить від встановленого об'єктива |
| Вага без об'єктива | г | - | 65 | Дуже легка конструкція для мобільності |
| Вага з об'єктивом | г | - | Від 149 до 211 | Варіюється залежно від фокусної відстані |
| Інтерфейс передачі даних | - | - | USB 3.0 | Високошвидкісна передача для обробки даних у реальному часі |

5. FLIR Systems: Прототипи з поляриметричними функціями

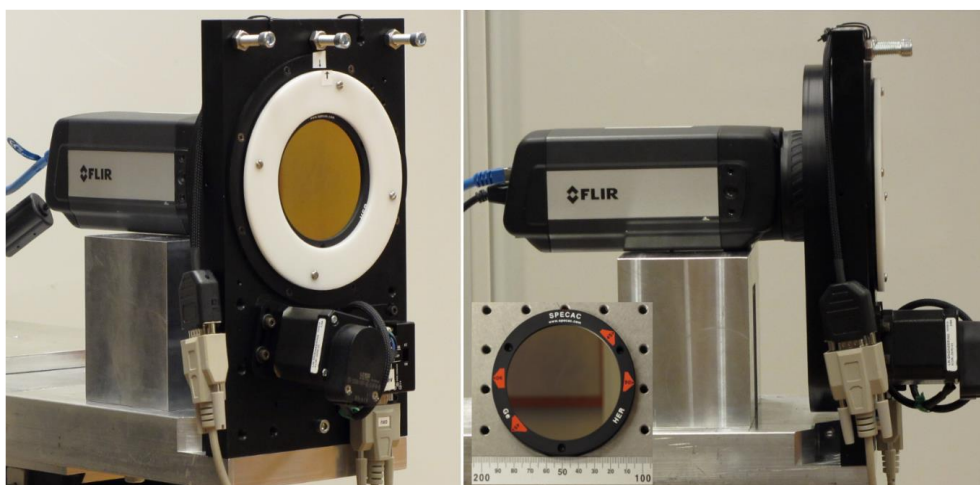


Рисунок 1.3.12 загальний вигляд прототипу поляриметричної тепловізійної камери від компанії FLIR

FLIR Systems є одним із лідерів у галузі тепловізійної технології та активно інтегрує поляриметрию в свої прототипи тепловізійних камер. Цей напрямок орієнтований на покращення аналізу текстури, розпізнавання матеріальних відмінностей та виявлення прихованих об'єктів, таких як замасковані транспортні засоби чи військові об'єкти. Завдяки цьому підходу поляриметричні камери FLIR можуть використовуватися для моніторингу природного середовища, вирішення безпекових завдань і підвищення ефективності військових операцій.

Приклади прототипів та камер:

FLIR X6980

Це камера середньохвильового інфрачервоного діапазону (MWIR), яка підтримує до 1004 кадрів на секунду та оснащена чотирьохпозиційним моторизованим колесом фільтрів. Ця функція дозволяє аналізувати поляризацію світла, підвищуючи чутливість до текстурних і матеріальних змін у складних умовах, таких як дим або низький тепловий контраст. Вона ідеально підходить для застосувань, що потребують високої швидкості обробки даних.

FLIR X8580

Довгохвильова інфрачервона камера (LWIR) з роздільною здатністю 1280 × 1024 пікселів, що підтримує автоматизоване управління поляризаційними фільтрами. Завдяки вбудованій пам'яті та швидкості зйомки, камера забезпечує точний аналіз поляризаційних властивостей об'єктів у реальному часі. Це дозволяє ідентифікувати замасковані об'єкти чи аналізувати структури в промислових процесах

Boson+ CZ 14-75

Цей модуль з підтримкою довгохвильового інфрачервоного діапазону забезпечує інтеграцію поляриметричних функцій. Завдяки високій термічній чутливості (<20 мК) та 5-кратному безперервному зуму, Boson+ може використовуватися для вирішення безпекових завдань або спостереження за складними сценами, наприклад, на територіях з важкими природними умовами

Neutrino Ground ISR Series

Ця серія MWIR-камер забезпечує можливість інтеграції поляриметрії для розвідки та моніторингу. Камери з цієї серії підтримують безперервний зум і ідеально підходять для виявлення текстурних аномалій або розпізнавання прихованих об'єктів, навіть у складних умовах [17].

6. Jenoptik: EVIDIR Alpha

EVIDIR Alpha від Jenoptik — це модульний тепловізійний пристрій, який підтримує інтеграцію поляризаційних фільтрів. Завдяки цьому камера може бути адаптована для різних застосувань, включаючи промислові діагностичні дослідження та наукові експерименти. Пристрій забезпечує можливість аналізу поляризаційних властивостей поверхонь, виявлення дефектів матеріалів та моніторингу структурних змін. Його гнучка архітектура робить його універсальним рішенням для спеціалізованих задач [18].

Ці продукти демонструють потенціал поляриметричних систем у тепловізійній техніці, забезпечуючи розширені можливості аналізу і виявлення у найскладніших умовах.

1.4. Особливості оптики для ІЧ діапазоні

Оптичне скло використовується у видимому і ближньому ІЧ-діапазоні і є прозорими лише при $\lambda < 2.7$ мкм. Матеріали лінз, що використовуються в ІЧ-діапазоні можна розділити на чотири групи[19]

- Оптичні пластмаси
- Несилікатне скло
- Кристали

Надзвичайно важливим для матеріалів, які використовуються у виготовленні ІЧ-об'єктів, є їхній показник заломлення n . Цей параметр, який залежить від температури і довжини хвилі, разом з геометрією лінз, визначає фокусну відстань. Ця залежність може бути виражена за допомогою формули 1.5.1, де r_1 і r_2 – радіуси поверхонь лінзи з врахуванням їхнього знаку, а d – товщина лінзи.

$$\frac{1}{f_0'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2} \quad (1.4.1)$$

Зміна оптичних характеристик від температури виражається у 200 – 400 разів сильніше, ніж у оптичному склі для видимого оптичного діапазону. Припустим параметром для опису зміни фокусної відстані від температури знаходиться за формулою 1.4.2.[20]

$$V = \alpha - \frac{1}{(n-1)} + \frac{\partial n}{\partial T} \quad (1.4.2)$$

Де α – коефіцієнт лінійного розширення, $\frac{\partial n}{\partial T}$ – зміна показника заломлення з температурою. При цьому зміна фокусної відстані знаходиться за формулою 1.4.3, де ΔT – зміна температури.

$$\Delta f_T' = f_0' V \Delta T \quad (1.4.3)$$

Дзеркала, що використовуються для ІЧ-термографії, складаються з підкладки із високими механічними властивостями та тонкого металевого напиленого шару. Зазвичай в якості підкладки використовують оптичне скло, кварцове скло або склокераміку. Зі збільшенням довжини хвилі зростає відбивальна здатність металевих шарів.

Залежно від умов експлуатації системи обирається приймач випромінювання, а параметри оптичної системи можуть бути визначені наступним чином: робочий спектральний діапазон, діаметр вхідної зіниці, фокусна відстань і мінімальна кутова роздільна здатність.

Проектування оптичної системи складається з п'яти етапів. Починаючи з першого етапу, визначається оптимальний робочий спектральний діапазон на основі критеріїв максимального теплового розширення. Другий етап включає перевірку можливості виготовлення необхідної оптичної системи. Третій етап передбачає вибір фокусної відстані. На четвертому етапі проводиться аналіз технологічних можливостей виготовлення оптичної системи. П'ятий етап служить для уточнення даних щодо просторової роздільної здатності.

Після проведення габаритного розрахунку оптичної системи з

використанням параксильної оптики отримують інформацію про фокусну відстань, світлові діаметри, взаємне розміщення окремих компонентів та просторову роздільну здатність. Наступним етапом є проектування окремих елементів у формі лінзової або дзеркальної оптики.

Вибір матеріалів для лінз визначає зміну фокусної відстані всієї системи залежно від довжини хвилі та температури. Зазвичай, коли використовується один матеріал, виконується умова, визначена формулою 1.4.4, для температурної компенсації двохлінзової склейки.

$$V\Phi = V_1\Phi_1 + V_2\Phi_2 \rightarrow 0 \quad (1.4.4)$$

Де Φ_1 і Φ_2 – оптична сила кожної лінзи, V – температурний параметр лінзи. Один із найпоширеніших об'єктивів використовує германієві лінзи (рис. 1.4.1). Його хроматичні аберації аналогічні аберациям лінзи з германію за рівнянням 1.4.5.

$$\Delta f_T' = \frac{f_0'}{v_{\lambda_0}} \quad (1.4.5)$$

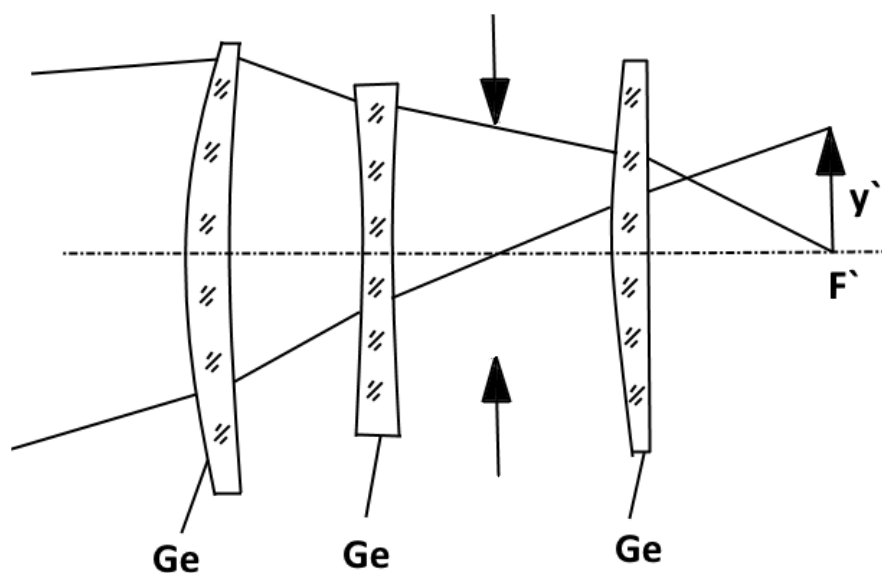


Рисунок 1.4.1. Об'єктив з германієвими лінзами

На зображенні 1.4.2 показано стандартне поєднання позитивної і негативної лінзи для створення об'єктива. Така конструкція забезпечує рівні фокусні відстані і є типовою для оптичних систем, таких як телескопи. Ці системи забезпечують задовільну роздільну здатність лише при малих кутах поля зору.

5 На

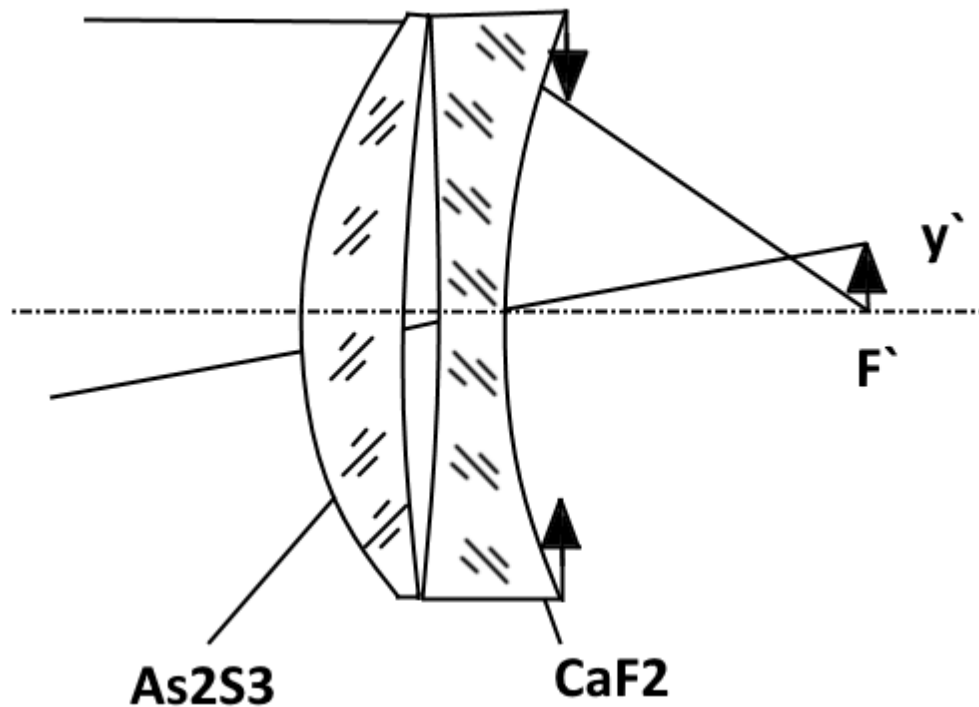


Рисунок 1.4.2 Об'єктив з позитивною і негативною лінзою

рисунку 1.4.3 розглядається випадок, коли хроматична аберація скорегована для атмосферних вікон в діапазонах 3-5 мкм та 8-12 мкм. Крім того, температурні аберації є досить невеликими, і зміни температури на області 50 К не вимагають додаткового фокусування. Ця оптична схема відома як "Схема об'єктива Патцеваля" і забезпечує високу просторову роздільну здатність при великих кутах поля зору.

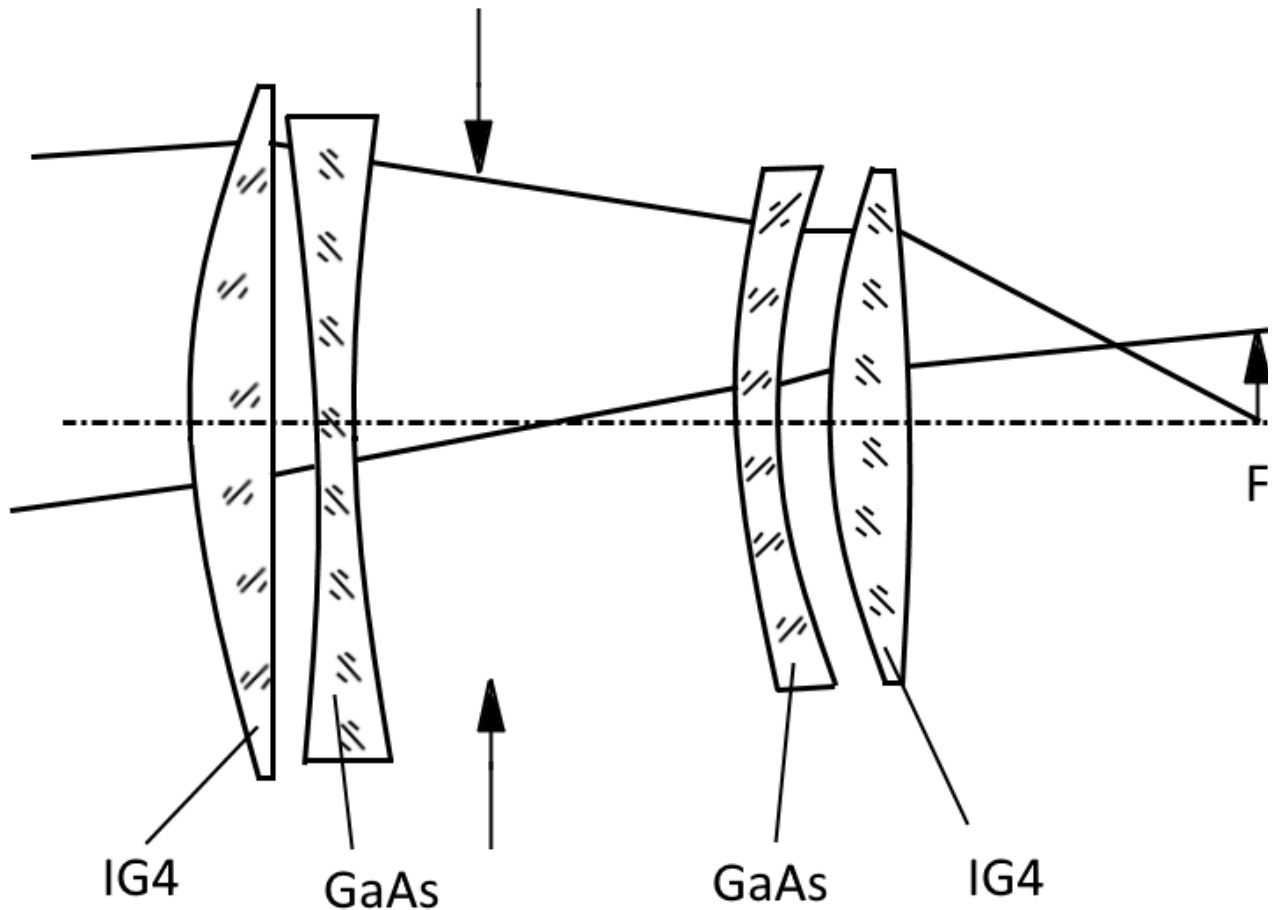


Рисунок 1.4.3 Схема об'єктива Патцеваля

Базовою схемою дзеркальної оптики є система Кассегрена (рис. 1.4.4). Ця система використовує меніск як першу лінзу для підвищення роздільної здатності, при цьому меніск має малу оптичну силу, і, отже, його хроматична аберация є дуже невеликою.

Така конструкція дозволяє досягти великих фокусних відстаней при низьких діафрагмових числах. Крім того, ця система володіє низькими хроматичними та температурними аберациями через відсутність заломлюючих поверхонь. Зміна відстані між дзеркалами використовується для оптимізації системи Кассегрена: чим вони ближче, тим більша кривизна дзеркала потрібна для збереження фокусу системи у вершині головного дзеркала, але це також може погіршити просторову роздільну здатність.

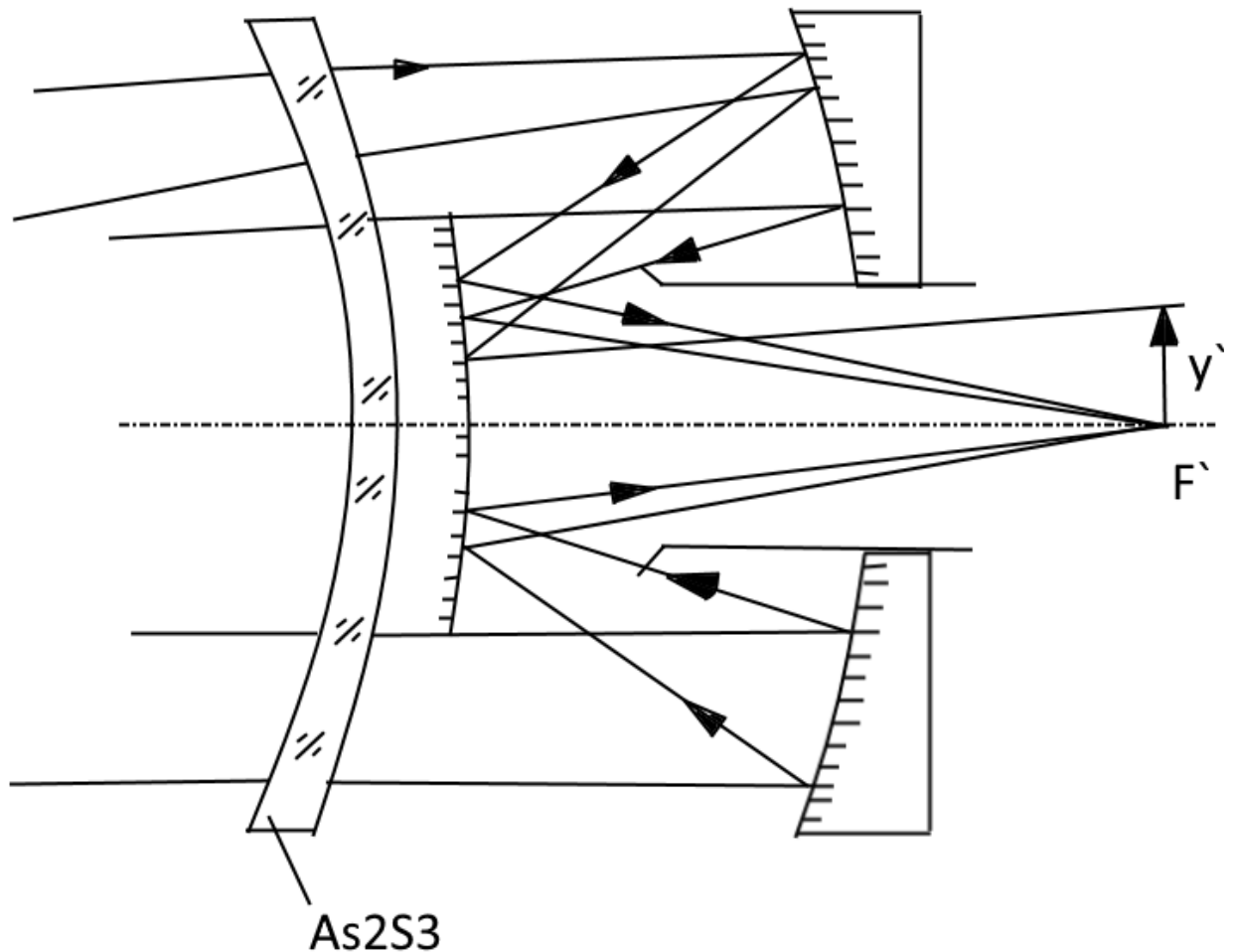


Рисунок 1.4.4 Система Кассегрена

Досить часто використовують насадки у вигляді системи Кеплера, у яких відношення фокусних відстаней і воно є постійним. Проте така система потребує компенсації хроматичних аберацій кожного компонента. Зазвичай використовують системи Кеплера, де відношення фокусних відстаней може змінюватись у діапазоні, який більший від нуля. Це дає змогу спостерігати різні частини об'єкта використовуючи одну оптичну систему. Приклад такої системи наведений на рисунку 1.4.5. Зміна відношення фокусів здійснюється за рахунок пересування елемента 1 та 2 на рис. 1.3.5, варіатор і компенсатор відповідно.[20]

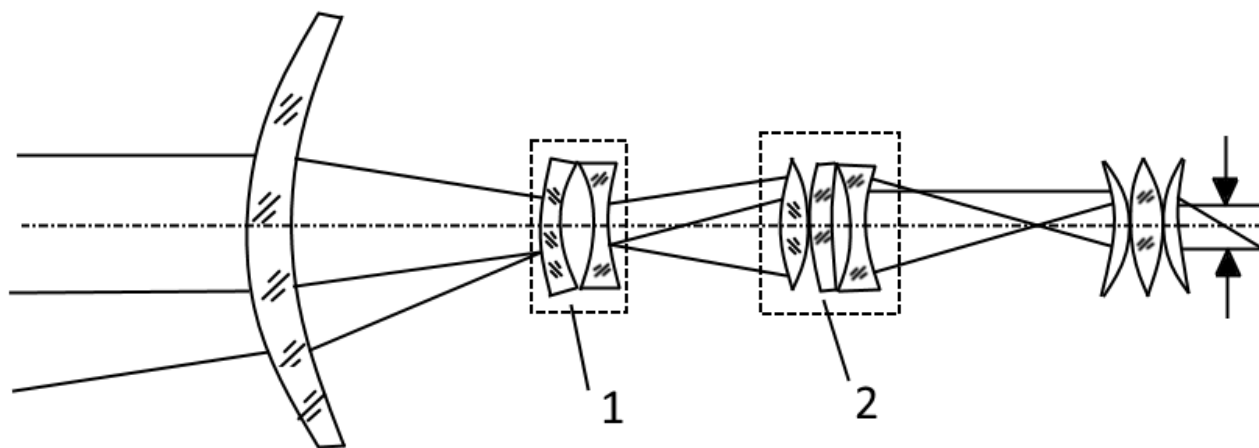


Рисунок 1.4.5. Система Кеплера зі змінною відстанню між фокусами

1.5. Основи поляризації

Поляризація є ключовим поняттям в оптиці, особливо в контексті тепловізорів. Для з'ясування її суті, спочатку розглянемо характер світла.

Світло складається з електромагнітних хвиль, кожна з яких має власний вектор напрямку E . Цей вектор вказує на напрямок, в якому коливається електричний заряд. Коли всі ці вектори напрямків взаємно відповідають один одному, ми говоримо, що світло поляризоване. Поляризація може приймати різні форми, зокрема лінійну, кругову та еліптичну, як це зображено на схемі на рисунку 1.5.1[20] [21]

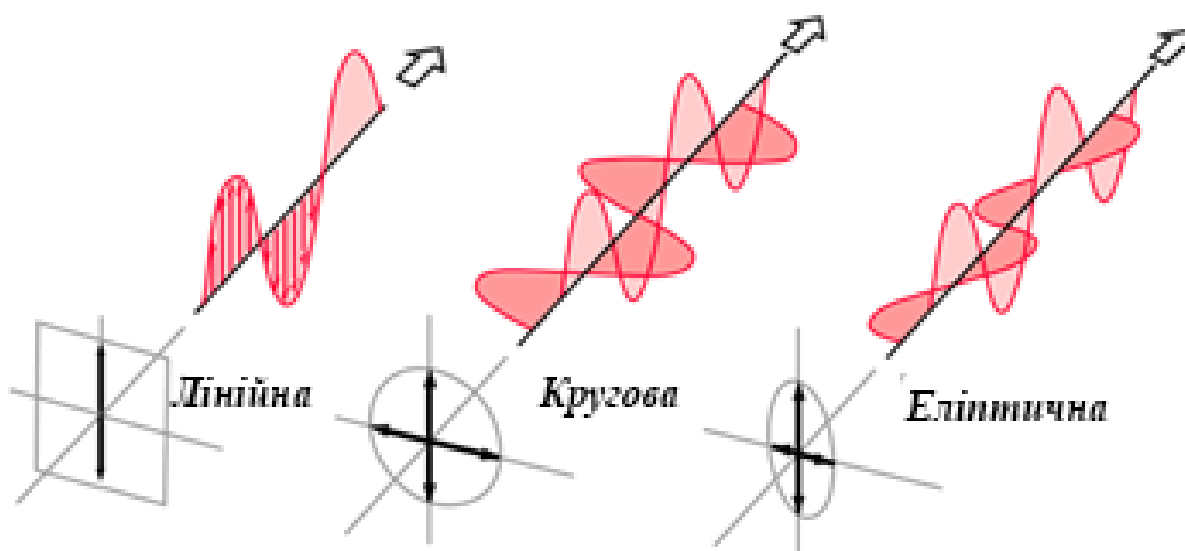


Рисунок 1.5.1 – Лінійна, кругова та еліптично поляризовані хвилі

У лінійно-поляризованій хвилі напрямок електричного поля залишається постійним у часі. Це означає, що напрямок коливань не змінюється, а сама хвиля

рухається вперед. Кругова поляризація виникає, коли два перпендикулярних напрямки коливань змінюються з однаковою амплітудою, але мають фазову різницю 90° . Це призводить до обертання напрямку коливань з часом, створюючи форму кола. Еліптична поляризація представляє собою загальний випадок кругової поляризації. У цьому випадку два перпендикулярних напрямки коливань можуть мати різну амплітуду або фазову різницю, що не дорівнює 90° , утворюючи форму еліпса.[22] [21]

Природні хвилі не мають поляризації. У природному світлі, вектор E коливається у випадкових напрямках, швидко та неупорядковано змінюючи один одного у будь-якій фіксованій точці середовища. Нижче на рисунку 1.5.2 наведено схематичне зображення природніх хвиль [23]

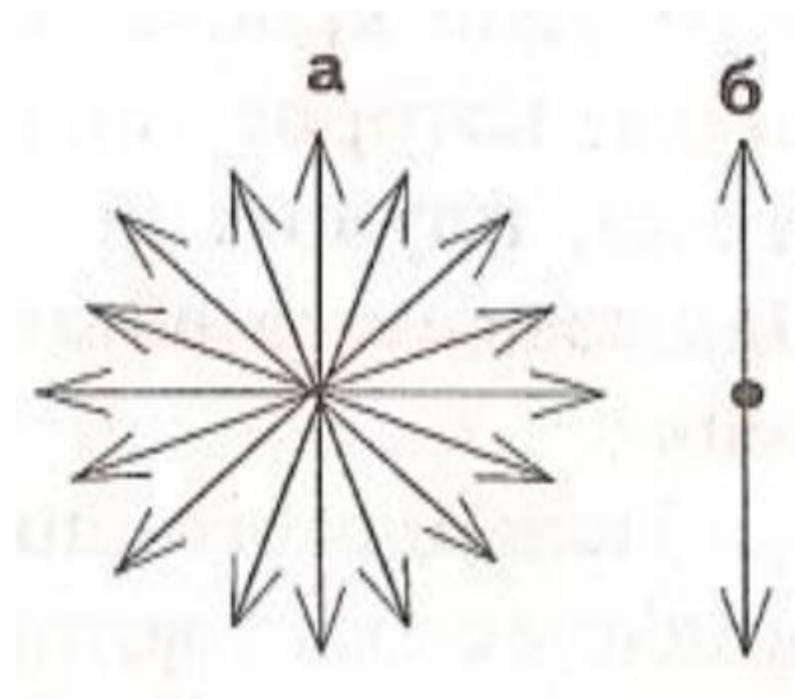


Рисунок 1.5.2 – Коливання векторів напруженості електричного поля в природному світлі (а) і в плоскополяризованому світлі (б)

Проте при відбитті від поверхні частка цієї хвилі може стати частково поляризованою. Це відбувається в тому випадку, коли відбите світло падає під певним кутом, відомим як кут Брюстера або кут повної поляризації. При цьому куті відбите світло стає повністю лінійно поляризованим. Цей кут, позначений як $\vartheta_{бр}$, визначається таким чином:[24] [21]

$$\tan \vartheta_{op} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.5.1)$$

Кут Брюстера точно визначається індексом заломлення матеріалу, від якого відбувається відбиття. Для певних матеріалів, таких як вода або скло, цей кут може бути обчислений досить точно. Це надає можливість використовувати кут Брюстера у наукових дослідженнях та практичних застосуваннях, включаючи визначення індексу заломлення матеріалів.

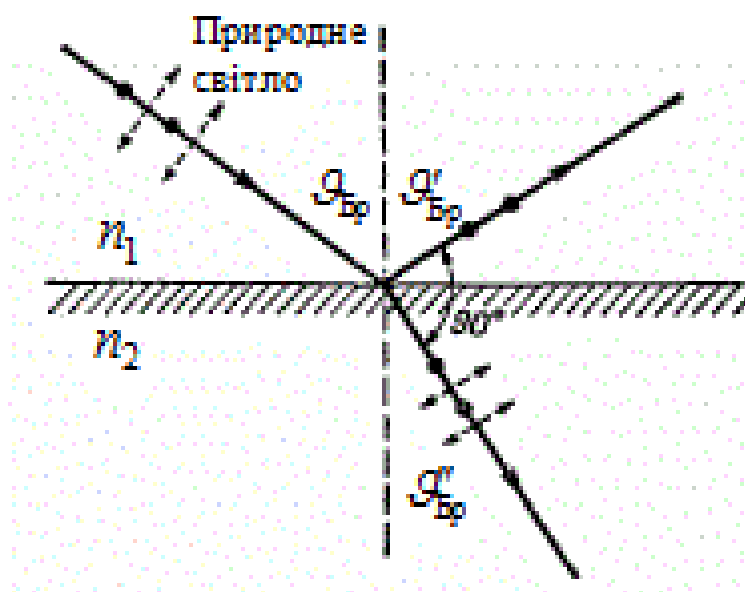


Рисунок 1.5.3 – Кут Брюстера [25]

Однак можливо перетворити ці природні хвилі на плоско-поляризовані за допомогою пристроїв, відомих як поляризатори. Поляризатори працюють, пропускаючи лише ті світлові хвилі, що коливаються в певному напрямку, та блокуючи всі інші. Таким чином, вони "відсіюють" лише одну площину поляризації, перетворюючи неполяризоване світло на плоско-поляризоване.[26]

Після того, як світло поляризовано, ми можемо маніпулювати його станом поляризації за допомогою різних оптичних пристроїв. Наприклад, компенсатори використовуються для введення контрольованого зміщення фази між двома перпендикулярними складовими поляризованого світла. Це може змінити стан поляризації світла, перетворюючи, наприклад, лінійно поляризоване світло в еліптично поляризоване. [27]

Крім того, для створення фазових зміщень на $\pi/2$ та π радіанів використовуються пластинки, які представляють чверть та половину довжини

хвилі. Чверть-хвильова пластина може перетворювати лінійно поляризоване світло в кругово поляризоване, тоді як половинна-хвильова пластина здатна зміщувати напрям поляризації на 90 градусів, див. рисунок 1.5.4 та 1.5.5.



Рисунок 1.5.4 – Залежність поляризації хвилі від фазових змін [28]

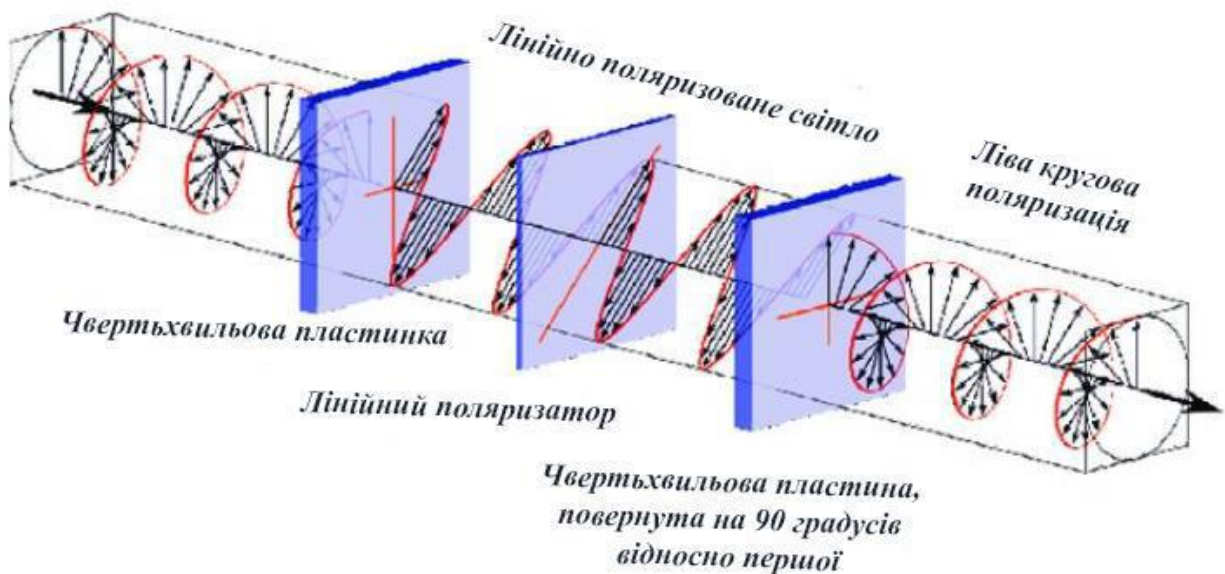


Рисунок 1.5.5 – Робота чвертьхвильової пластини. Перетворення лінійно поляризованої хвилі в ліво-кругово поляризовану за допомогою пластинки у чверть хвилі [29] [21]

Поляризатори можуть служити аналізаторами для визначення характеру та ступеня поляризації світлових хвиль. Вони дозволяють визначити, чи є світло повністю поляризованим, частково поляризованим або неполяризованим. Закон Малюса є одним з основних принципів, застосовуваних у процесі поляризації світла. Згідно з цим законом, інтенсивність поляризованого світла, яке проходить через аналізатор, пропорційна квадрату косинуса кута між площиною поляризації світла та площиною, визначеною аналізатором. Формула для закону

Малюса може бути виражена так:

$$I = I_0 * \cos^2 \theta \quad (1.5.2)$$

де I – інтенсивність світла після проходження через аналізатор, I_0 – початкова інтенсивність світла, а θ – кут між площиною поляризації світла і площиною аналізатора [30].

1.6 Визначення оптичної системи відповідно до поставленої задачі

Поляриметричний тепловізор складається з двох основних компонентів: поляризаційної насадки та тепловізійної системи. Перш ніж світлові промені, які випромінюються об'єктом, потрапляють в тепловізор, вони проходять через поляризаційну насадку. Робота цієї насадки призводить до часткової поляризації зображення через взаємодію з поляризатором та фазовою пластинкою. Наступним етапом є подача частково поляризованого зображення до тепловізора. Отримане на виході зображення представляє теплове зображення в ІЧ-діапазоні із відповідною поляризаційною складовою, яка залежить від кута поляризації.

Розробка поляриметричного тепловізора включає в себе застосування різноманітних технологій та компонентів, що передбачає встановлення конкретних вимог до якості як поляризаційної насадки, так і тепловізійної системи. Поляризаційна насадка повинна забезпечити максимальну ефективність при мінімальних витратах на виробництво, а також має мати компактні габарити та низьку масу. Важливим є також її сумісність з розмірами тепловізора. Тепловізійна система повинна відповідати вимогам щодо економічності, високої продуктивності, відмінних оптичних характеристик та наявності мікроболометричної матриці. Крім того, вона повинна бути легкою, мати компактні розміри та бути зручною у використанні.

Для спрощення процесу проектування та розробки вирішено використовувати існуючий тепловізор як основний пристрій. Таким чином, наша основна мета полягає в створенні насадки для тепловізора, що включатиме в себе поляризаційний блок і буде встановлюватися перед тепловізором.

На малюнку 1.6.1: а) представлено поляриметричну систему з лінійним поляризатором із дротяною сіткою та ахроматичною меандровою чвертьхвильовою пластинкою як елементами для аналізу поляризації; б) подано схематичне зображення цих компонентів поляриметричної системи.

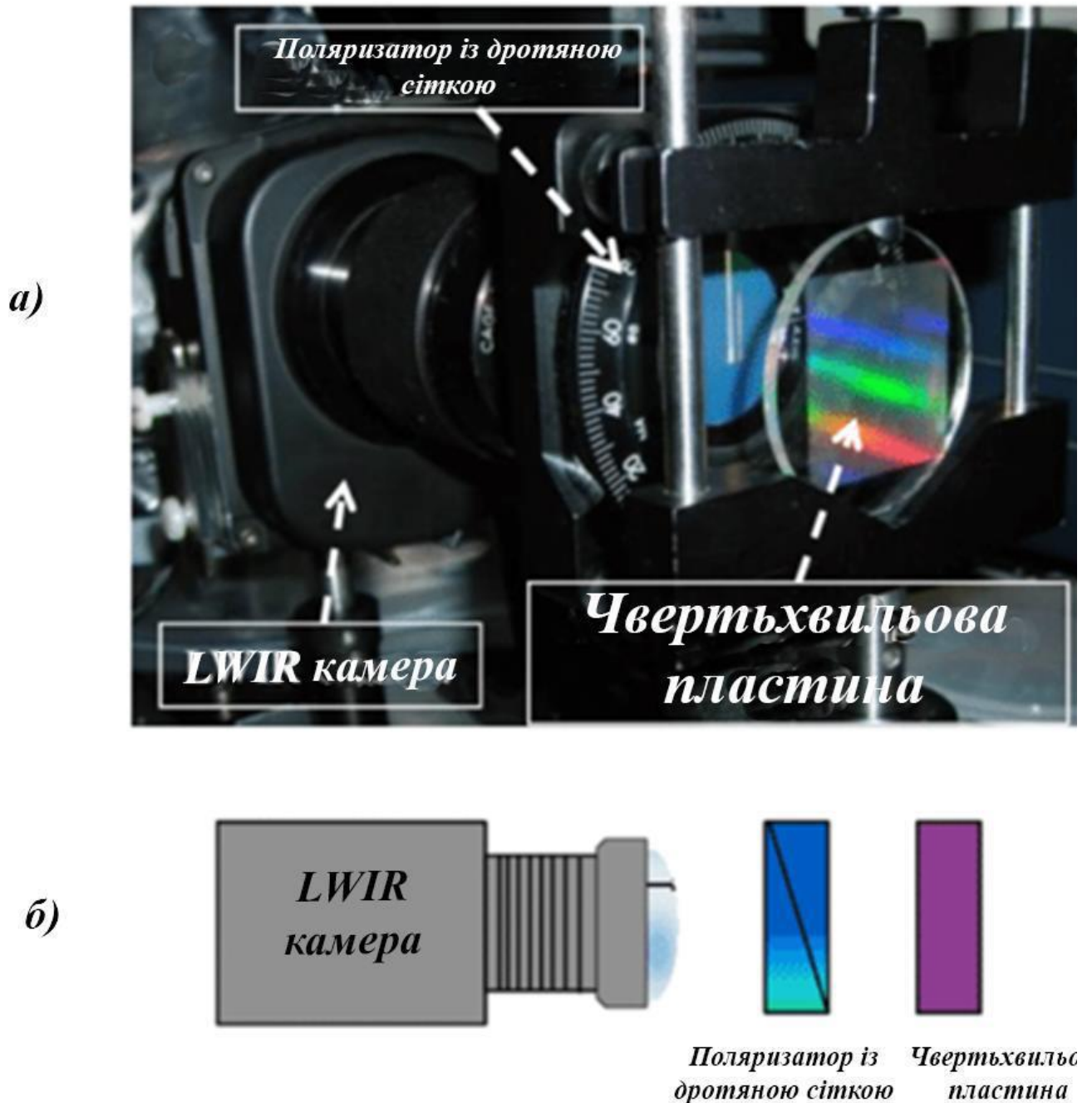


Рисунок 1.6.1 – Налаштування поляриметрії широкосмугового зображення з LWIR-камерою та поляризаційною оптикою: а) експериментальна установка; б) схематичне зображення поляриметричної системи [31] [21]

За наведеною схемою в ролі тепловізора в нашій системі можемо використовувати тепловізор не принципово виробництва якої конкретно

компанії, головне, щоб даний елемент працював в діапазоні довжин хвиль LWIR від 8 до 14 мікрометрів, щоб він був невеликих габаритних розмірів, з достатньо високою вихідною роздільною здатністю мікроболометричною матрицею з аморфного кремнію не менше 640 x 480 пікселів. З частотою оновлення кадрів не менше ніж 60 Гц, котрий може виявляти активність на відстані до 1000 метрів.

Поляризаційний блок нашого поляризаційного тепловізора має складатись з поляризатора, та з фазової пластинки. Основне призначення поляризаційного блоку – це фільтрування світлових хвиль, що посилюють в певних напрямках. Це може допомогти підвищити контраст, виявити окремі види матеріалів або аналізувати властивості поверхонь та матеріалів через їх поляризаційні властивості.[32]

Дротяні **поляризатори** формуються за допомогою створення сітки з металевих дротів, які розташовані паралельно один одному. При входженні світла в такий поляризатор воно стає поляризованим в площині, перпендикулярній напрямку дротів. Це дозволяє керувати напрямком світла, яке проходить через поляризатор, і, таким чином, впливати на отримане зображення на тепловізорі.

Поляризатори на дротяній сітці мають численні переваги, серед яких висока стійкість до температурних та механічних впливів. Їхня здатність ефективно видаляти непотрібну поляризацію значно поліпшує якість отриманого зображення. Голографічні дротові поляризатори використовують голографічну техніку для формування дротяної сітки, що дозволяє отримати більш точні і унікальні поляризаційні властивості. Вони можуть бути особливо корисні в складних оптико-електронних системах, де необхідна висока точність поляризації.

Поляризатори на дротяній сітці виготовляють із різних матеріалів, зокрема, складної талій-сірникової сполуки KRS-5, яка славиться високою прохідністю для інфрачервоного випромінювання. Це зробило його особливо ефективним для тепловізорів, які використовують інфрачервоне випромінювання для виявлення теплових об'єктів. Таким чином, поляризатори

на дротяній сітці сприяють покращенню якості тепловізійних зображень шляхом контролю напрямку та характеру світлового потоку. Вибір матеріалу підкладки для провідного сітчастого поляризатора визначає його спектральні характеристики та робочий спектральний діапазон.

KRS-5 виявляється особливо підходящим для інфрачервоних застосувань, забезпечуючи рівномірний профіль пропускання від 2 до 30 мкм. Однак його висока вартість порівняно з іншими підкладками може впливати на вибір. Поляризатори з підкладкою KRS-5 відзначаються високою пропускнуою здатністю на рівні 80-90%, що робить їх ефективними для високопродуктивних застосувань.[33]

Коефіцієнт згасання (ER) є важливою характеристикою провідного сітчастого поляризатора і служить мірою його продуктивності. Поляризатор має відзначатися відносно високим коефіцієнтом згасання, що робить його відмінним вибором для високопродуктивних застосувань. У випадках, коли необхідний високий коефіцієнт згасання, може бути застосована комбінація двох або більше поляризаторів.

Додатково, поляризатор має бути оснащений антирефлексійним (AR) покриттям, що є важливою особливістю. Для застосувань, де необхідне відбивання менше 1%, важливий вибір поляризатора з AR покриттям. Проте, у випадку підкладок, таких як KRS-5, які володіють високою пропускнуою здатністю у широкому спектральному діапазоні, AR покриття може бути неефективним, оскільки може втручатися в діапазон пропускання і обмежувати його ширину.

Фазові пластинки відіграють важливу роль в оптичному приладобудуванні, особливо в системах, що операційно працюють в інфрачервоному спектрі світла з хвильовою довжиною від 1 до 21 мкм. Такий діапазон є ключовим для тепловізорів, які використовують інфрачервоне випромінювання для створення зображень температурного поля об'єктів. Це особливо важливо в нічних умовах або ситуаціях, коли видиме світло обмежене.

Фазові пластинки застосовуються для контролю та маніпуляції

поляризацією світла, що проходить через них. Вони змінюють фазу одного з поляризованих компонентів світла, вносячи зміни в його характеристики.

У тепловізорах фазові пластинки використовуються для поліпшення якості зображення, дозволяючи коригувати характеристики вхідного інфрачервоного світла. Це допомагає у виправленні аберацій, що можуть виникнути через недосконалість інших елементів оптичної системи.

Фазові пластинки в тепловізорах принесли кілька важливих переваг у сфері оптичного приладобудування:

- Покращена якість зображення: Вони використовуються для виправлення оптичних аберацій, що призводять до покращення якості отриманих зображень.
- Більша чутливість: Фазові пластинки можуть підвищити чутливість тепловізорів, що робить їх ефективнішими у виявленні слабких джерел тепла.
- Гнучкість дизайну: Завдяки їхнім властивостям, фазові пластинки надають конструкторам більше гнучкості при створенні оптичних систем.

Фазові пластинки нульового порядку, також відомі як "нульовий порядок", створюють затримку фази, кратну довжині хвилі світла. Це дозволяє їм впливати на поляризацію світла без впливу на його кольорові характеристики або довжину хвилі. Затримка фази зазвичай вимірюється в одиницях $\lambda/4$ або $\lambda/2$, де λ - довжина хвилі світла. Пластинки із затримкою $\lambda/4$ використовуються для перетворення лінійно поляризованого світла в кругово-поляризоване, а пластинки із затримкою $\lambda/2$ можуть повертати площину поляризації світла.

В інфрачервоному діапазоні від 1 до 21 мкм фазові пластинки нульового порядку є особливо корисними, допомагаючи поліпшити функціональність тепловізорів та інших інфрачервоних систем, забезпечуючи точне управління поляризацією світла без впливу на його довжину хвилі. Це сприяє отриманню високоякісних зображень та точних вимірювань.

Висновки до розділу 1

У розділі 1 було здійснено огляд літературних джерел, що стосуються поляриметричних тепловізорів, а також аналіз існуючих рішень у цій галузі.

У підрозділі 1.1 розглянуто особливості тепловізорів, що допомогло визначити їхні основні переваги та обмеження, а також важливість інтеграції поляризаційних характеристик для покращення ефективності виявлення та розпізнавання об'єктів.

Підрозділ 1.2 надав загальну інформацію про поляриметричні тепловізори, включаючи принципи їх роботи та можливості для підвищення точності детектування в умовах низької контрастності.

У підрозділі 1.3 було здійснено патентний пошук по темах методів обробки поляриметричних даних та конструкцій поляризаційних блоків. Огляд патентів показав наявність розвинутих рішень у поляриметричних тепловізійних системах, але також виявив значний потенціал для вдосконалення, зокрема в аспекті інтеграції нових поляризаційних елементів та методів обробки даних.

Підрозділ 1.3.3 надав огляд існуючих комерційних продуктів у сфері поляриметричної тепловізійної оптики. Це дозволило виявити ключові тенденції на ринку та визначити напрямки для подальших досліджень та розробок.

Підрозділ 1.4, що стосується оптики для інфрачервоного діапазону, розглянув основні вимоги до оптичних систем для тепловізорів, включаючи матеріали, що використовуються для виготовлення об'єктивів, та їх вплив на якість зображень.

У підрозділі 1.5 було обговорено основи поляризації, що є важливими для розуміння принципів роботи поляриметричних систем та обробки отриманих зображень.

Визначення оптичної системи відповідно до поставленої задачі, розглянуте в підрозділі 1.6, показало важливість вибору відповідних компонентів для досягнення високої ефективності роботи системи, враховуючи специфіку задачі та умови експлуатації.

Отже, розділ 1 дав глибоке розуміння теоретичних основ, сучасних

тенденцій та існуючих рішень у галузі поляриметричних тепловізорів, що є важливим етапом для подальшої розробки модернізованих поляриметричних тепловізійних систем.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ МОДЕРНІЗОВАНОГО ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

Сучасні тепловізійні системи широко застосовуються в різних галузях, проте інтеграція поляриметричних можливостей значно розширює їх функціональність. Поляриметричний тепловізор здатний забезпечити додаткову інформацію про поверхні, матеріали та середовища, що спостерігаються, шляхом аналізу поляризаційного стану випромінювання.

У цьому розділі розглядаються концептуальні підходи до модернізації тепловізійної камери шляхом інтеграції поляриметричного блоку. Особлива увага приділяється вибору оптичних та електронних компонентів, розробці принципів їх взаємодії, а також формуванню архітектури системи керування. Також описуються основні технічні рішення, що забезпечують ефективну роботу модифікованої системи, зокрема використання обертової поляризаційної пластини та чвертьхвильової пластини, керованих за допомогою спеціалізованого процесора.

Метою цього розділу є формування чіткої концепції модернізованої системи, яка буде використовуватися як основа для подальшого проектування та експериментальної перевірки.

2.1. Аналіз існуючих тепловізорів як основи для модифікації

Тепловізори є ключовими приладами для отримання інфрачервоних зображень, що дозволяють виявляти об'єкти за їхнім тепловим випромінюванням. Вони знаходять широке застосування в галузях оборони, медицини, промисловості, енергетики та рятувальних операціях. Основою їхньої роботи є детектори інфрачервоного випромінювання, які можуть бути як неохолоджуваними (болметри), так і охолоджуваними (на основі фотодіодів).

Для створення поляриметричного тепловізора в рамках модернізації оптимальним рішенням є використання готової тепловізійної камери як базового пристрою. Такі камери вже містять якісні інфрачервоні детектори, оптичну систему та обчислювальні блоки, що дозволяє мінімізувати час і витрати на

розробку. Зокрема, на ринку доступні камери, які мають високу просторову роздільну здатність, широкий температурний діапазон і достатню швидкість зчитування даних, що робить їх ідеальними для інтеграції з поляриметричним блоком.

Аналіз комерційно доступних моделей тепловізорів показує, що для модернізації найкраще підходять камери з можливістю обробки даних у реальному часі. Це забезпечує швидку обробку сигналів, що надходять від обертальної поляризаційної пластини, і дозволяє отримати високоякісні поляриметричні зображення без затримок. Вибір конкретної моделі базової тепловізійної камери залежить від її технічних характеристик, таких як чутливість, роздільна здатність детектора, діапазон роботи та можливість підключення додаткових модулів.

PanthIR



Рисунок 2.1 модель тепловізійної камери PanthIR [34]

Тепловізійна камера PanthIR із неохолоджуваним детектором була розроблена з перспективою майбутнього, оптимізована для фокальних матриць із розміром пікселя 17 мкм і 12 мкм, включаючи формати високої чіткості (HD). Ця міцна камера використовує перевірений механізм зуму, що забезпечує до 10-кратного безперервного оптичного збільшення, дозволяючи безперервно відстежувати цілі.

Особливістю PanthIR є її унікальний механізм зуму, який дозволяє досягти 10-кратного безперервного оптичного збільшення, забезпечуючи високу гнучкість під час моніторингу об'єктів, що рухаються. Камера здатна підтримувати стабільну якість зображення під час зуму, що важливо для відстеження цілей у реальному часі.

Додаткові переваги включають:

Міцний корпус, який витримує механічні навантаження та несприятливі погодні умови.

Сумісність із системами обробки даних у реальному часі, що робить її зручною для інтеграції у складні технічні комплекси.

Готовність до адаптації під поляриметричний модуль, завдяки високій оптичній якості та можливості налаштування.

Ця камера є ідеальним варіантом для проєктів, які вимагають інтеграції тепловізійної та поляриметричної технологій.

Таблиця 2.1 – Характеристики тепловізора PanthIR:[Додаток 1]

| | |
|---|--|
| Матеріал та структура | Мікроболометрична матриця з аморфного кремнію 640 x 480 пікселів |
| Спектральна чутливість | 7.5 – 14 мкм |
| Горизонтальне поле зору | NFOV – 2.3°, WFOV – 22.5° |
| Кратність зуму | 10x |
| Фокусна відстань | NFOV – 190 мм, WFOV – 19мм |
| світлосила об'єктива | 1/1.4 |
| мінімальна відстань, на якій камера, забезпечує чітке фокусування на об'єкті. | 5 метрів |
| Розмір пікселя | 12 мкм x 12мкм |
| Енергетична потужність | 16-50 Вольт |
| NETD | < 80мК |
| Формат виводу | NTSC (колір); / PAL (колір); |

| | |
|------------------------------|-----------------------|
| Робоча температура | від -46°C до +70°C |
| Температура зберігання | -51°C до +71°C |
| Ступінь захисту | IP67 |
| Споживання енергії пристроєм | 5Вт |
| Вага | <5кг |
| Габарити | 164мм діаметр x 275мм |
| Приблизний діапазон цін | \$15,000–\$30,000 |

UTC xii



Рисунок 2.2 модель тепловізійної камери [35] UTC xii

Ця тепловізійна камера є високоякісним пристроєм для використання в складних умовах, зокрема на зброї або в польових операціях. Вона оснащена неохолодженим мікроболометричним сенсором, що дозволяє чітко виявляти цілі на великих відстанях, з роздільною здатністю 640x480 пікселів. Камера має оптичне збільшення 1X і підтримує цифрове збільшення до 2X. Її поле зору становить 7,5° по діагоналі, що забезпечує достатній огляд для ефективного

спостереження.

Пристрій працює на одному або двох акумуляторах CR123, з часом роботи до 5,5 годин. Камера також оснащена цифровим компасом для точного орієнтування і має можливість зберігати до 100 знімків у незжатому форматі. Вона витримує екстремальні температури і вологість, що робить її надійним інструментом для використання в різних кліматичних умовах.

Таблиця 2.2 – Характеристики тепловізора UTC xii: [Додаток 2]

| Матеріал та структура | Мікроболометрична матриця з аморфного кремнію 640 x 480 пікселів |
|---|--|
| Спектральна чутливість | 8 – 12 мкм |
| Горизонтальне поле зору | 6° |
| Кратність зуму | 10x |
| Фокусна відстань | NFOV – 190 мм, WFOV – 19мм |
| світлосила об'єктива | 1/1 |
| мінімальна відстань, на якій камера, забезпечує чітке фокусування на об'єкті. | 5 метрів |
| Розмір пікселя | 12 мкм x 12мкм |
| Енергетична потужність | 3 Вольта |
| NETD | < 50мК |
| Формат виводу | NTSC (колір); / PAL (колір); |
| Робоча температура | від -32°C до 40°C |
| Температура зберігання | -40°C до +71°C |
| Ступінь захисту | IP67 |
| Споживання енергії пристроєм | 5Вт |
| Вага | <0.58кг |
| Габарити | 158x 82x79мм |
| Частота кадрів | 30/60Гц |
| Коригування діоптрієвого | Немає, налаштовано на 800 метрів |

| | |
|---|---|
| налаштування окуляра | |
| Час роботи батареї при температурі | 2,25 години (1 батарея) 5,5 години (2 батареї) |
| Час, необхідний для увімкнення пристрою | 3 с |
| Приблизний діапазон цін | \$10,000–\$15,000 |

DRAGON-S12

DRAGON-S12 — це сучасний неохолоджений тепловізор, розроблений компанією Excelitas, який призначений для використання як додаток до денного прицілу для військових та правоохоронних органів. Камера має роздільну здатність 640x480 пікселів та використовує тепловий сенсор з розміром пікселя 12 мкм і частотою 60 Гц, що забезпечує високу чутливість і рівномірність зображення.

Цей тепловізор дозволяє вести спостереження та вражати цілі в темряві та в умовах поганої видимості 24 години на добу без необхідності знімати або переналаштовувати денний приціл. DRAGON-S12 підключається до стандартних аксесуарних рейок Picatinny або NATO за допомогою швидкознімного механізму, що дозволяє легко встановлювати та знімати пристрій. Це легкий, компактний і міцний пристрій, який забезпечує надійну роботу в складних умовах.



Рисунок 2.3 модель тепловізійної камери DRAGON-S12

Таблиця 2.3 – Характеристики тепловізора DRAGON-S12: [Додаток 3]

| | |
|---|--|
| Матеріал та структура | Мікроболометрична матриця з аморфного кремнію 640 x 480 пікселів |
| Спектральна чутливість | 12 мкм |
| Горизонтальне поле зору | 5.3° |
| Тип | OLED, full Color 1280x1024 |
| Кратність зуму | 1x |
| Фокусна відстань | NFOV – 190 мм, WFOV – 19мм |
| світлосила об'єктива | 1/1 |
| мінімальна відстань, на якій камера, забезпечує чітке фокусування на об'єкті. | 5 метрів |
| Розмір пікселя | 12 мкм x 12мкм |
| Енергетична потужність | 3 x 1.5 вольт тип АА |
| NETD | < 50мК |
| Формат виводу | NTSC (колір); / PAL (колір); |
| Робоча температура | від -32°C до 40°C |

| | |
|---|---|
| Температура зберігання | -40°C до +71°C |
| Ступінь захисту | IP67 |
| Споживання енергії пристроєм | 5Вт |
| Вага | <0.85 кг |
| Габарити | 158x 82x79мм |
| Частота кадрів | 60Гц |
| Коригування діоптрієвого налаштування окуляра | Немає, налаштовано на 800 метрів |
| Час роботи батареї при температурі | 7 годин |
| Час, необхідний для увімкнення пристрою | час, необхідний для увімкнення пристрою |
| Приблизний діапазон цін | \$15,000–\$25,000 |

Trijicon REAP-IR

це високотехнологічний тепловізор, розроблений для тактичних операцій та використання у військових і правоохоронних цілях. Він оснащений неохолоджуванним мікроболометричним сенсором із роздільною здатністю до 640x480 пікселів і розміром пікселя 12 мкм, що забезпечує чітке теплове зображення.

Тепловізор пропонує різні режими перегляду, цифрове збільшення та можливість використання в умовах низької видимості, повної темряви або через дим і пил. Trijicon REAP-IR має міцний, легкий корпус і ергономічний дизайн, що забезпечує комфорт у використанні. Завдяки своїй точності та надійності, цей тепловізор підходить як для спостереження, так і для цільового наведення.



Рисунок 2.4 модель тепловізійної камери Trijicon REAP-IR

Таблиця 2.4 – Характеристики тепловізора REAP-IR: [Додаток 4]

| | |
|---|---|
| Матеріал та структура | Мікроболометрична матриця з оксиду ванадію 640 x 480 пікселів |
| Спектральна чутливість | 8 – 12 мкм |
| Тип Дисплею | OLED |
| Горизонтальне поле зору | 18° / 12° / 7° |
| Кратність зуму | 1-8x |
| Оптичне збільшення | 1.2x / 1.75x / 3x |
| Комбіноване збільшення | 1.2-9.6x / 1.75-14x / 3 -24x |
| Фокусна відстань | 24мм / 35мм / 60мм |
| світлосила об'єктива | f/1.2 та f/1.25 |
| мінімальна відстань, на якій камера, забезпечує чітке фокусування на об'єкті. | 5 метрів |
| Розмір пікселя | 12 мкм x 12мкм |
| Енергетична потужність | 3 Вольта |
| NETD | < 50мК |
| Формат виводу | NTSC (колір); / PAL (колір); |
| Робоча температура | від -32°C до 40°C |

| | |
|---|---|
| Температура зберігання | -51°C до +71°C |
| Ступінь захисту | IP67 |
| Вага | 72г8 / 751г / 1071г |
| Габарити | 214.1 x 79.3 x 73.1 (мм) / 220.4 x 79.3 x 73.1 (мм) / 247.6 x 79.3 x 73.1(мм) |
| Частота кадрів | 30/60Гц |
| Коригування діоптриєвого налаштування окуляра | +6/-2 |
| Час роботи батареї при температурі | 4 години |
| Приблизний діапазон цін | 6999\$ / 7999\$ / 9499\$ |

SECILE-TS



Рисунок 2.5 модель тепловізійної камери SECILE-TS

SECILE-TS — це тепловізор, спеціально розроблений для військового використання та правоохоронних завдань. Він відрізняється компактним і міцним дизайном, що дозволяє використовувати його в складних умовах. Завдяки передовій неохолоджуваній тепловій матриці, пристрій забезпечує

високу чутливість і якість зображення навіть у повній темряві, при диму, пилу або інших перешкодах.

Цей тепловізор підтримує швидкий монтаж на зброю або прилади спостереження, а також має інтуїтивно зрозуміле управління. Його можливості включають точне виявлення, розпізнавання та ідентифікацію цілей на значних відстанях. SECILE-TS є надійним вибором для тактичних операцій, забезпечуючи високий рівень продуктивності та ефективності в польових умовах.

Таблиця 2.5 – Характеристики тепловізора SECILE-TS [Додаток 5]

| | |
|---|---|
| Матеріал та структура | Мікроболометрична матриця з оксиду ванадію 640 x 480 пікселів |
| Спектральна чутливість | 8 – 12 мкм |
| Тип Дисплею | OLED |
| Горизонтальне поле зору | 18° / 12° / 7° |
| Кратність зуму | 1-8x |
| Оптичне збільшення | 1.2x / 1.75x / 3x |
| Комбіноване збільшення | 1.2-9.6x / 1.75-14x / 3 -24x |
| Фокусна відстань | 24мм / 35мм / 60мм |
| світлосила об'єктива | f/1.2 та f/1.25 |
| мінімальна відстань, на якій камера, забезпечує чітке фокусування на об'єкті. | 5 метрів |
| Розмір пікселя | 12 мкм x 12мкм |
| Енергетична потужність | 3 Вольта |
| NETD | < 50мК |
| Формат виводу | NTSC (колір); / PAL (колір); |
| Робоча температура | від -32°C до+40°C |
| Температура зберігання | -51°C до +71°C |
| Ступінь захисту | IP67 |

| | |
|-------------------------|---|
| Вага | 72г8 / 751г / 1071г |
| Габарити | 214.1 x 79.3 x 73.1 (мм) / 220.4 x 79.3 x 73.1 (мм) / 247.6 x 79.3 x 73.1(мм) |
| Частота кадрів | 30/60Гц |
| Коригування діоптрій | +6/-2 |
| Час роботи батареї | 4 години |
| Приблизний діапазон цін | 6999\$ / 7999\$ / 9499\$ |

Trijicon SNIPE-IR



Рисунок 2.6 модель тепловізійної камери Trijicon SNIPE-IR [36]

Trijicon SNIPE-IR — це висококласний тепловізійний приціл, спеціально створений для військових та правоохоронних потреб. Його основна перевага полягає у здатності працювати як інлайн-пристрій, встановлюючись перед денним оптичним прицілом без необхідності переналаштування або зняття останнього. Ця функція забезпечує безперервність і простоту використання під час тактичних операцій.

SNIPE-IR оснащений неохолоджуваним мікроболометричним сенсором із роздільною здатністю до 640x480 пікселів і 12-мікронним пікселем, що дозволяє отримувати чітке теплове зображення навіть у складних умовах, таких як повна

темрява, дим або пил. Легкий та міцний корпус пристрою робить його ідеальним для тривалого польового використання, а продуманий дизайн забезпечує швидке налаштування та ергономічність у застосуванні.

Таблиця 2.6 – Характеристики тепловізора SECILE-TS [Додаток 6]

| | |
|---|---|
| Матеріал та структура | Мікроболометрична матриця з оксиду ванадію 640 x 480 пікселів |
| Спектральна чутливість | 8 – 12 мкм |
| Тип Дисплею | OLED |
| Горизонтальне поле зору | 12° |
| Кратність зуму | цифровий 2x, 4x, 8x |
| Оптичне збільшення | 1x |
| Фокусна відстань | 50мм |
| світлосила об'єктива | f/1.2 |
| мінімальна відстань, на якій камера, забезпечує чітке фокусування на об'єкті. | 5 метрів |
| Розмір пікселя | 12 мкм x 12мкм |
| Напруга споживання | 3 Вольта |
| NETD | < 50мК |
| Формат виводу | NTSC (колір); / PAL (колір); |
| Робоча температура | від -40°C до 55°C |
| Температура зберігання | від -50°C до 70°C |
| Ступінь захисту | IP67 |
| Вага | 850г |
| Габарити | 147.3 x 76.2 x 66.8 мм |
| Частота кадрів | 30/60Гц |
| Коригування діоптрій | +4/-6 |
| Час роботи батареї | 3.5 години |
| Приблизний діапазон цін | 9,000\$ - 12,000\$ |

EYECCGAS® Multi

EyeCCGas® Multi — це високочутлива портативна камера для оптичного виявлення газів (OGI), призначена для виявлення та кількісної оцінки витоків газів, зокрема вуглеводнів і летких органічних сполук (VOC). Камера вирізняється запатентованою системою мультиспектральних фільтрів, що підвищує ефективність виявлення різних газів, таких як метан і CO₂. Вона відповідає суворим екологічним і технічним стандартам (IECEX, ANSI, CSA) та спеціально розроблена для застосування у небезпечних промислових умовах, наприклад, на нафтових і газових об'єктах. Її NETD (<10 мК) забезпечує виняткову чутливість, що дозволяє виявляти навіть найдрібніші витoki [37].

Камера оснащена такими функціями, як потокова передача відео в реальному часі, бездротове з'єднання, термографія та відповідність нормативам EPA (NSPS 40 CFR). Її міцний і вибухозахищений дизайн включає 3.5-дюймовий кольоровий РК-дисплей, невелику вагу (2,6 кг) і тривалий час роботи батареї (понад 4,5 години). Завдяки цим характеристикам EyeCCGas® Multi є універсальним інструментом для програм з виявлення та усунення витоків газу (LDAR), що забезпечує точність та ефективність роботи у складних умовах [38].



Рисунок 2.7 модель тепловізійної камери EYECGAS® Multi [39]

Таблиця 2.7 – Характеристики тепловізора SECILE-TS

| | |
|---|--|
| Матеріал та структура | Матриця на базі МСТ (Mercury Cadmium Telluride) |
| Спектральна чутливість | 3.1 – 4.4 мкм |
| Тип Дисплею | LCD 3.5" |
| Горизонтальне поле зору | 18° (з об'єктивом 30 мм) / 7.5° (з об'єктивом 75 мм) |
| Кратність зуму | цифровий 2x, 4x, 8x |
| Оптичне збільшення | Немає (1x) |
| Фокусна відстань | 30 мм, 75 мм |
| світлосила об'єктива | f/1.1 |
| мінімальна відстань, на якій камера, забезпечує чітке фокусування на об'єкті. | 3 метри |
| Розмір пікселя | 30 мкм x30 мкм |
| Енергетична потужність | 3 Вольта |

| | |
|-------------------------|--|
| NETD | <10 мК при 30°C |
| Формат виводу | Відео потокове, файли JPG |
| Робоча температура | Від -20°C до +50°C |
| Температура зберігання | Від -40°C до +70°C |
| Ступінь захисту | IP67 |
| Вага | 1.5 кг (з об'єктивом 75 мм) |
| Габарити | 147 x 76 x 66 мм (корпус без об'єктиву) |
| Частота кадрів | 30 Гц |
| Коригування діоптрій | Немає |
| Час роботи батареї | До 5 годин |
| Приблизний діапазон цін | \$25,000 - \$30,000 (залежно від комплектації) |

EVIDIR alpha



Рисунок 2.7 модель тепловізійної камери EVIDIR alpha [Додтаок7]

EVIDIR Alpha — це модульна тепловізійна камера, розроблена для OEM-рішень у різних галузях, включаючи промислову автоматизацію, безпеку та наукові дослідження. Її основою є неохолоджуваний мікроболометр з піксельним розміром 12 мкм, що працює в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (8–14 мкм). Камера підтримує динамічний діапазон 16 біт, що забезпечує високу чутливість і деталізацію зображень.

Ця камера має компактний і легкий дизайн із розмірами 30x30x20 мм і вагою до 30 г без об'єктива. Вона пропонує кілька варіантів роздільної здатності: 320x240 і 640x480 пікселів, а також різні варіанти об'єктивів із полем зору від 15.9° до 75°. Завдяки підтримці температурного діапазону від -40°C до 70°C та класу захисту IP67 (для лінз), камера пристосована для роботи у складних умовах. Вона може використовуватися як у режимі перегляду, так і для точного радіометричного аналізу з діапазоном вимірювання температур від -40°C до +600°C

Таблиця 2.6 – Характеристики тепловізора SECILE-TS [Додаток 7]

| | |
|---|---|
| Матеріал та структура | Мікроболометрична матриця з оксиду ванадію 640 x 480 пікселів |
| Спектральна чутливість | 8 – 14 мкм |
| Тип Дисплею | Не вказано, підтримка різних форматів виводу |
| Горизонтальне поле зору | Від 15.9° до 75° залежно від об'єктива |
| Кратність зуму | Немає (цифровий зум не вказано) |
| Оптичне збільшення | Немає (1x) |
| Фокусна відстань | Від 3.9 мм до 50 мм залежно від об'єктива |
| світлосила об'єктива | f/1.0 – f/1.1 |
| мінімальна відстань, на якій камера, забезпечує чітке фокусування на об'єкті. | Не вказано |

| | |
|-------------------------|---|
| Розмір пікселя | 12 мкм x 12мкм |
| Енергетична потужність | 3 Вольта DC |
| NETD | ≤ 30 мК (до 20 мК за спеціальних умов) |
| Формат виводу | RAW 16 bit, RGB 24 bit, YCrCb 4:2:2 / 4:4:4 |
| Робоча температура | від -40°C до 70°C |
| Температура зберігання | від -40°C до 85°C |
| Ступінь захисту | IP67 для лінз |
| Вага | ≤ 30 г без об'єктива |
| Габарити | 30 x 30 x <20 мм |
| Частота кадрів | ≤ 9 Гц (експорт), 30/60 Гц (опція) |
| Коригування діоптрій | Не застосовується |
| Час роботи батареї | Не вказано |
| Приблизний діапазон цін | 4,000\$ - 6,000\$ |

Вибір **EVIDIR Alpha** як тепловізійної системи серед інших розглянутих моделей обґрунтований її універсальністю, високою якістю зображення та адаптивністю до різних завдань. Ця камера розроблена як модульний пристрій, що забезпечує гнучкість у конфігурації для OEM-рішень. Компактний розмір (30x30x20 мм), мала вага (до 30 г) і низьке енергоспоживання роблять її ідеальним вибором для інтеграції у портативні пристрої, безпілотні системи або інші мобільні платформи[39][40].

На відміну від інших моделей, таких як Trijicon REAP-IR чи DRAGON-S12, EVIDIR Alpha орієнтована не лише на спостереження, але й на точний радіометричний аналіз. Її можливість виконувати температурні вимірювання з високою точністю дозволяє використовувати її в промисловій автоматизації, прогнозованому обслуговуванні або системах контролю температури. NETD менше 30 мК забезпечує виявлення навіть незначних змін температури, що є ключовим

фактором у застосуваннях, де потрібна висока чутливість [40][41].

Додатковою перевагою є підтримка різних інтерфейсів, таких як USB, CMOS та GigE, що спрощує інтеграцію камери у системи з різною архітектурою. Її модульний підхід дозволяє легко адаптувати пристрій під конкретні потреби, включаючи вибір лінз і режимів роботи. У порівнянні з більш дорогими тактичними тепловізорами, такими як Trijicon SNIPE-IR, EVIDIR Alpha є економічно ефективним рішенням для промислових і наукових завдань, зберігаючи при цьому високий рівень продуктивності.[41]

Загалом, EVIDIR Alpha пропонує оптимальний баланс між функціональністю, якістю та вартістю, що робить її кращим вибором для задач, де важливі чутливість, радіометрія та можливість кастомізації. Її особливості дозволяють забезпечити довготривалу та стабільну роботу в різних умовах, від промислових об'єктів до мобільних платформ[42].

2.2 Вибір сервопривода

Для забезпечення обертання поляризаційної пластини в системі поляриметричного тепловізора критично важливо правильно підібрати сервопривід, який відповідатиме вимогам точності, швидкості, надійності та адаптивності до умов експлуатації. Вибір сервопривода залежить від декількох основних параметрів:

1. Вимоги до точності обертання:

У поляриметричних тепловізорах точність позиціонування є ключовим фактором. Від правильного налаштування кута обертання поляризаційної пластини залежить якість отриманих поляриметричних зображень. Точність повинна бути в межах 0,1–0,5 градуса.

2. Швидкість обертання:

Для коректної роботи системи, яка сканує зображення в режимі реального часу, важливо забезпечити високу швидкість обертання. Типовий діапазон — до 60 обертів за хвилину, що дозволяє зберігати стабільність зображення навіть при динамічних умовах.

3. Навантаження і габарити:

Поляризаційна пластина має невелику масу, але конструкція привода повинна враховувати можливі механічні навантаження, включаючи вібрації та механічні впливи під час роботи. Вибір компактних і легких сервоприводів дозволить мінімізувати загальну вагу системи.

4. Тип керування: Сервопривід має підтримувати цифрове керування через мікропроцесорну систему для автоматизації обертання та синхронізації з іншими елементами тепловізора.
5. Енергоспоживання: Для військового або портативного застосування важливим є низьке енергоспоживання, щоб забезпечити тривалий час роботи від автономного джерела живлення.
6. Стійкість до умов експлуатації: Пристрій повинен працювати в широкому температурному діапазоні (наприклад, від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$) та бути захищеним від пилу і вологи відповідно до стандарту IP65 або вищого.

Попередній аналіз ринку

Детальний аналіз сервоприводів для поляриметричного тепловізора

1. Dynamixel X-Series



Рис 2.2.1 загальний вигляд сервоприводу Dynamixel XC-Series[43]

Опис:

Сервоприводи серії Dynamixel X-Series є високоточними робототехнічними приводами з інтегрованими енкодерами та цифровим керуванням. Вони підтримують кілька протоколів зв'язку (UART, RS485), що забезпечує просту інтеграцію в автоматизовані системи.

Технічні характеристики:

Кут повороту: 360° (безперервний оберт) або обмежений (поворотний режим).

Роздільна здатність: до 12-біт (0.088° на крок).

Живлення: 12-14.8 В.

Енергоспоживання: низьке, адаптоване для тривалого використання.

Робоча температура: -5°C до +75°C.

Живлення: 4.8-7.4 В.

Робоча температура: -20°C до +60°C.

Переваги:

Титанові шестерні забезпечують довговічність і високу міцність.

Низьке енергоспоживання.

Легкість в обслуговуванні.

Застосування:

Підходить для систем з обмеженим простором і високими механічними навантаженнями.

3. Махон ЕС-і 40

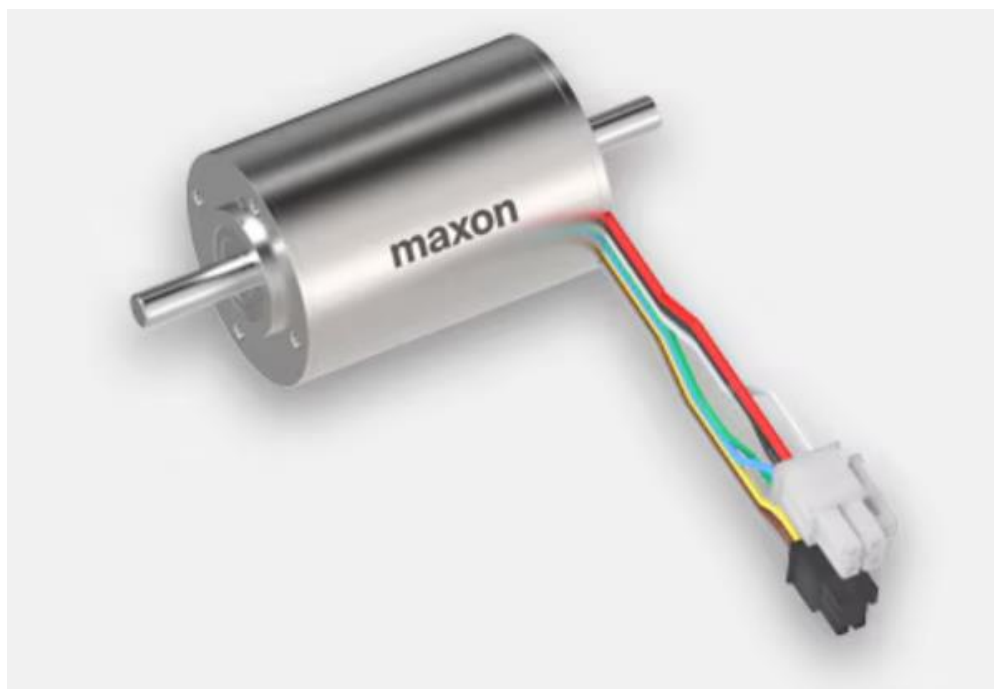


Рис 2.2.3 загальний вигляд сервоприводу Махон ЕС-і 40[45]

Опис:

Махон ЕС-і 40 — це високопродуктивний безщітковий двигун із високим крутним моментом, що підходить для складних умов експлуатації. Він розроблений для роботи у системах, де потрібна висока надійність та стабільність роботи.

Технічні характеристики:

Максимальний крутний момент: до 88 Н·см.

Швидкість обертання: до 10 000 об./хв.

Живлення: 12-48 В.

Енергоспоживання: залежить від режиму роботи (висока енергоефективність).

Робоча температура: -40°C до +100°C.

Переваги:

Надійність у екстремальних умовах.

Можливість роботи з великими навантаженнями.

Гнучке налаштування параметрів.

Застосування:

Ідеально підходить для роботи в системах з високими механічними вимогами.

Таблиця 2.2.1 порівняння характеристик сервоприводів

| Характеристика | Dynamixel X-Series | HiTec HS-7955TG | Maxon EC-i 40 |
|---------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| Тип керування | Цифровий | Аналоговий | Безщітковий |
| Точність позиціонування | Висока | Середня | Висока |
| Максимальний кут повороту | 360° | 180° | 360° |
| Крутний момент | Низький-середній | Середній | Високий |
| Робоча температура | -5°C до +75°C | -20°C до +60°C | -40°C до +100°C |
| Енергоспоживання | Низьке | Низьке | Середнє |
| Застосування | Компактні системи | Складні умови | Високі навантаження |

Модель Dynamixel XC-430_idle була обрана через її специфічні характеристики, які ідеально відповідають потребам поляриметричного тепловізора:

Висока точність позиціонування:

Модель забезпечує точність обертання завдяки вбудованому енкодеру, який дозволяє досягати точності в межах 0.1°. Це критично для налаштування

поляризаційної пластини, де навіть незначні відхилення можуть вплинути на якість зображення.

Гнучкість у використанні:

Підтримка кількох протоколів зв'язку (RS-485, UART) забезпечує просту інтеграцію з мікропроцесорними системами, що використовуються для управління поляризаційними елементами.

Надійність у складних умовах:

XC-430_idle розроблена для роботи в широкому діапазоні температур (-5°C до +75°C), що дозволяє використовувати її в складних польових умовах.

Енергоспоживання:

Низьке енергоспоживання цієї моделі є ключовим фактором для військового обладнання, де критично важливий тривалий час автономної роботи.

Компактність і легкість установки:

Модель має невеликі габарити, що спрощує її інтеграцію у конструкцію тепловізора.

Цінова доступність:

XC-430_idle знаходиться в середньому ціновому сегменті (\$200–300), що робить її економічно вигідним вибором з точки зору бюджету проєкту.

Таким чином, Dynamixel XC-430_idle забезпечує оптимальне співвідношення між точністю, функціональністю, надійністю та вартістю, що робить її ідеальним вибором для автоматизації обертання поляризаційної пластини у поляриметричному тепловізорі.

2.3 Вибір поляризатора.

Поляризатори є важливим елементом в оптико-електронних системах, оскільки вони дозволяють керувати напрямком і характеристиками світлового потоку, що позитивно впливає на точність та якість зображення. Одним із цікавих типів поляризаторів є дротяні, які поєднують високу прозорість і унікальні властивості поляризації.

Ці поляризатори виготовляються з металічних дротів, які розташовуються паралельно один одному, утворюючи дротяну сітку. При проходженні світла

через таку сітку, поляризація відбувається в напрямку, перпендикулярному до дротів. Цей процес дає можливість контролювати напрямок світла, що проходить через поляризатор, а отже, й впливати на якість зображення на тепловізорі.

Однією з основних переваг дротяних поляризаторів є їхня висока стійкість до температурних коливань і механічних навантажень. Вони також ефективно усувають небажану поляризацію, що дозволяє значно покращити чіткість і точність зображень.

Існують також голографічні дротяні поляризатори, які використовують технологію голографії для створення сітки, що забезпечує ще більшу точність поляризаційних характеристик. Це робить їх ідеальними для складних оптико-електронних систем, де потрібна висока точність поляризації.

Дротяні поляризатори використовуються в тепловізорах для поліпшення якості зображень, контролюючи напрямок світла. Вони мають високу стійкість до зовнішніх впливів і здатність до ефективного усунення непотрібної поляризації, що дозволяє отримати чітке й точне зображення.

WP25H-Z від Thorlabs

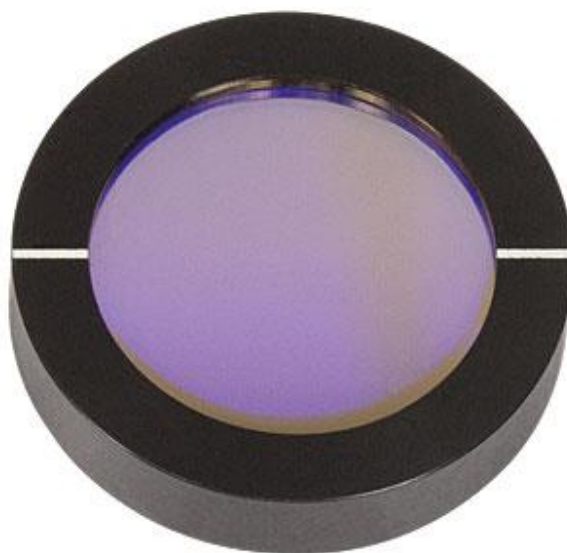


Рис 2.3.1 загальний вигляд поляриметра **WP25H-Z**[\[46\]](#)

Поляризаційна пластинка WP25H-Z від Thorlabs — це високоякісний оптичний елемент, розроблений для роботи в інфрачервоному спектрі. Ця пластинка виготовлена із спеціального матеріалу, який забезпечує ефективну

поляризацію світла в діапазоні 2–16 мкм, що робить її ідеальним вибором для тепловізійних і оптико-електронних систем.

Основні характеристики матеріалу:

Матеріал: Пластинка WP25H-Z виготовлена з високоякісного оптичного кристала, що має низький коефіцієнт поглинання в інфрачервоному спектрі, що робить її підходящою для застосування в інфрачервоних системах.

Діапазон хвиль: Пластинка забезпечує ефективну поляризацію в діапазоні від 2 до 16 мкм, що дозволяє застосовувати її в тепловізійних системах, які працюють в цьому діапазоні.

Пропускання: Пластинка забезпечує високу пропускну здатність для ІЧ-випромінювання, що є критично важливим для досягнення високої якості зображень в тепловізійних системах.

Переваги: Однією з основних переваг є здатність забезпечувати точне управління поляризацією світла, що дозволяє знижувати рівень шуму та підвищувати контрастність зображень. Ця властивість робить її надзвичайно корисною для інфрачервоних систем спостереження, де важлива чіткість та точність.

Застосування:

Тепловізійні та оптико-електронні системи: Пластинка використовується для поліпшення якості зображення та точності вимірювань в умовах низького теплового контрасту, що є важливим для систем спостереження та розвідки.

ІЧ-спектроскопія: Для аналізу та вимірювання поляризаційних властивостей в інфрачервоному спектрі, що використовується для досліджень матеріалів.

Військові та оборонні застосування: Для вдосконалення систем спостереження та виявлення цілей в складних умовах, таких як нічний час або погані погодні умови.

Переваги WP25H-Z:

Висока ефективність у ІЧ-діапазоні.

Чіткість поляризації, що підвищує якість зображення в тепловізійних

системах.

Стійкість до механічних і температурних впливів, що забезпечує надійність і довговічність приладу в екстремальних умовах.

Легкість інтеграції в існуючі оптичні та тепловізійні системи завдяки стандартним розмірам.

Графік максимальної пропускної здатності (Maximum Transmission)

Рисунок 2.3.2:

Демонструє, наскільки ефективно пластинка передає світло в оптимальних спектральних діапазонах.

WP50H-Z має високий рівень пропускної здатності у визначеному діапазоні довжин хвиль, що робить її придатною для поляризаційних застосувань в ІЧ-діапазоні.

Висока пропускна здатність (до 90%) свідчить про здатність пластинки ефективно працювати у вибраному спектрі.

Поляризаційна пластинка WP25H-Z від Thorlabs є відмінним вибором для застосувань, де потрібна висока точність поляризації світла в інфрачервоному діапазоні, ідеально підходить для створення високоякісних оптико-електронних систем спостереження та аналізу. Графік мінімальної пропускної здатності (Minimum Transmission) Рисунок 2.3.3:

Цей графік показує рівень найменшої пропускної здатності світла через пластинку для різних довжин хвиль.

Матеріали підкладки, такі як BaF₂, CaF₂, KRS-5 і ZnSe, мають різний ступінь пропускної здатності в певних спектральних діапазонах.

Мінімальна пропускної здатності зазвичай вказує, наскільки пластинка ефективно блокує світло в небажаних діапазонах. Наприклад, матеріал KRS-5 забезпечує найменшу зміну у пропускної здатності для середнього та далекого ІЧ-діапазону.

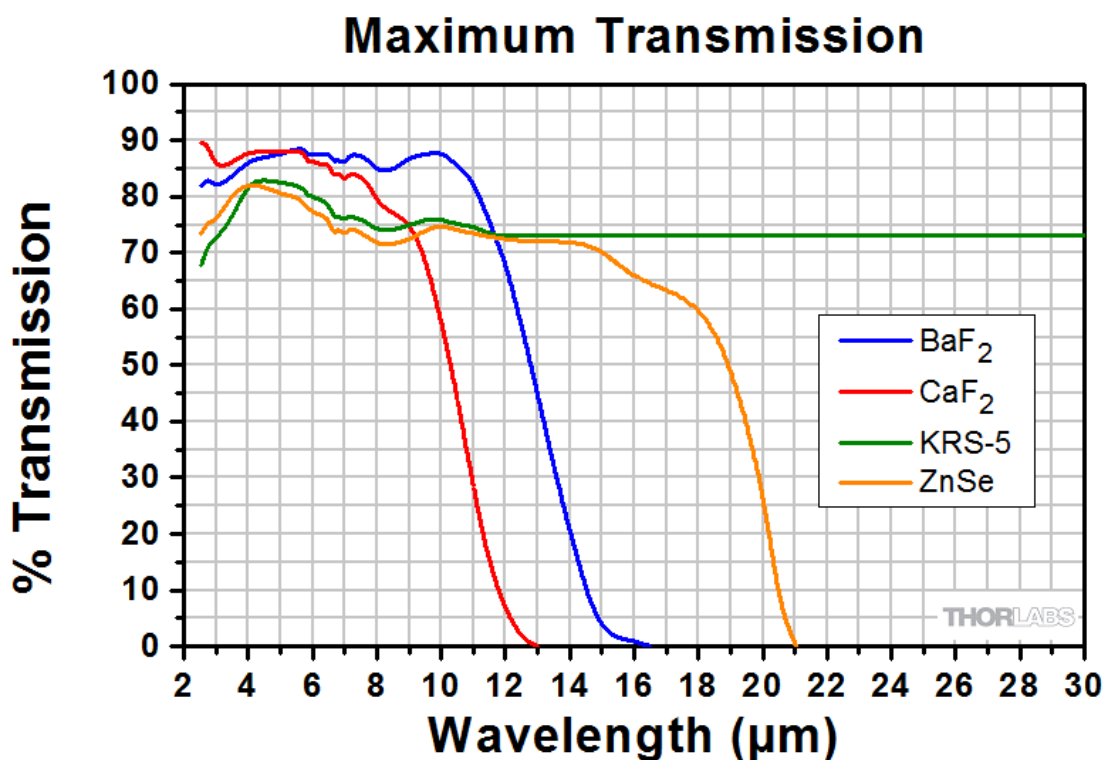


Рисунок 2.3.2 – Максимальна крива пропускання голографічного дротяного поляризатора Optometrics. Крива ZnSe характеризує обраний поляризатор WP25H-Z [47]

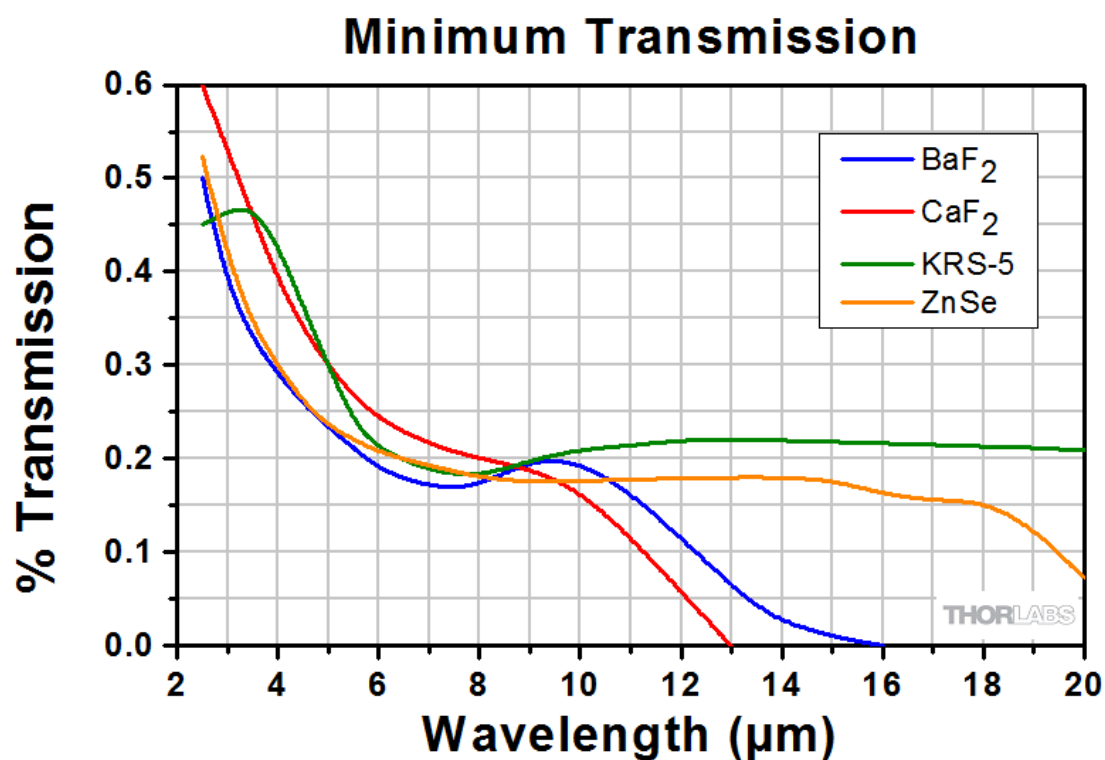


Рисунок 2.3.3 – Мінімальна крива пропускання голографічного дротяного поляризатора Optometrics. Крива KRS-5 характеризує обраний поляризатор WP25H-Z [47]

2.4 Вибір фазової пластинки

Фазові пластинки мають важливе значення в галузі оптичного приладобудування, особливо в системах, що працюють у спектральному діапазоні 1–21 мкм, який відповідає інфрачервоному випромінюванню. Цей спектр активно використовується в тепловізійних пристроях, що фіксують інфрачервоне випромінювання для створення температурного профілю об'єктів. Особливо ефективні вони в умовах обмеженого видимого світла, наприклад, уночі.

Фазові пластинки застосовуються для управління та зміни поляризаційних властивостей світла, яке проходить через них. Вони забезпечують зміну фази однієї з поляризованих компонент світлової хвилі, тим самим впливаючи на її характеристики.

У тепловізійних системах ці пластинки використовуються для покращення якості зображення, коригуючи параметри вхідного інфрачервоного випромінювання. Вони здатні мінімізувати аберації, спричинені недоліками інших елементів оптичної системи, що забезпечує чіткіше відображення.

Основні переваги фазових пластинок:

Покращення якості зображення: Вони допомагають усувати оптичні аберації, що значно підвищує якість отриманого зображення.

Підвищення чутливості: Фазові пластинки можуть збільшувати чутливість тепловізорів, дозволяючи краще виявляти слабкі джерела тепла.

Гнучкість в дизайні: Їхні властивості дають інженерам більше можливостей для створення складних оптичних систем.

Фазові пластинки нульового порядку створюють фазову затримку, яка дорівнює кратному значенню довжини хвилі світла. Це дозволяє змінювати поляризацію випромінювання без впливу на його колір чи довжину хвилі. Наприклад:

Пластинки із затримкою в $\lambda/4$ перетворюють лінійно поляризоване світло на циркулярно поляризоване.

Пластинки із затримкою в $\lambda/2$ змінюють площину поляризації

випромінювання.

У межах спектра 1–21 мкм такі пластинки особливо корисні для вдосконалення роботи тепловізорів та інших інфрачервоних пристроїв. Вони забезпечують точний контроль поляризації світла, сприяючи досягненню високої якості зображень і точності вимірювань.

Фазова пластинка PO-TWP-L4-25-FIR від компанії ALPHALAS є інноваційним пристроєм для керування та вимірювання поляризації випромінювання. Її конструкція дозволяє ефективно змінювати стан поляризації світла в широкому спектрі хвиль – від 1000 до 19000 нм. Основні технічні характеристики:

Товщина: 5 мм.

Діаметр: 24 мм (ефективна апертура).

Діапазон довжин хвиль: 1000–19000 нм.

Зображення PO-TWP-L4-25-FIR представлено на рисунку 2.4.1.[\[48\]](#)



Рисунок 2.4.1 загальний вигляд фазової пластинки –PO-TWP-L4-25-FIR [\[48\]](#)

2.5. Оптична схема з інтеграцією чвертьхвильової пластини та поляриметра

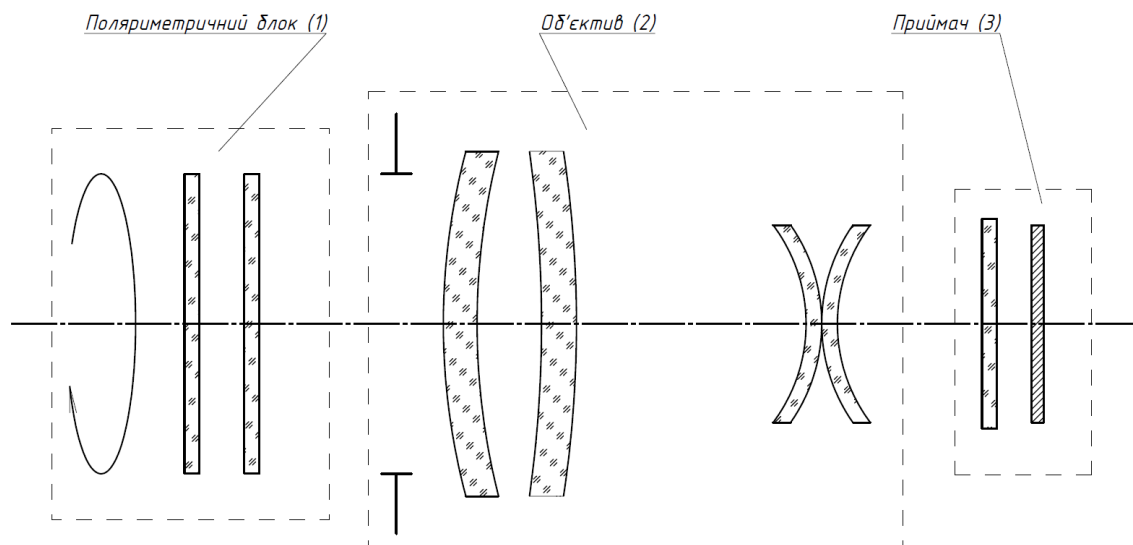


Рис 2.5 Оптична схема з інтеграцією чвертьхвильової пластини та поляриметра.

Оптичні системи, що використовують чвертьхвильові пластини у поєднанні з поляриметрами, дозволяють забезпечити високу точність вимірювань і контроль поляризаційних характеристик випромінювання. Така інтеграція є ключовою у багатьох оптичних та інфрачервоних системах, зокрема у тепловізійних пристроях та поляризаційних аналізаторах, які працюють у широкому спектральному діапазоні, включаючи хвилі довжиною 8–14 мкм.

Призначення та функції оптичної схеми

Чвертьхвильова пластина у складі оптичної системи виконує функцію перетворення лінійно поляризованого випромінювання у циркулярно поляризоване, або навпаки, в залежності від напрямку проходження світлового потоку. Поляриметр, інтегрований у схему, здійснює аналіз стану поляризації, що дає змогу отримати додаткову інформацію про властивості об'єктів, такі як їх текстура, орієнтація поверхні, або розподіл температури у випадку інфрачервоного випромінювання.

Ця комбінація особливо ефективна у тепловізорах поляризаційного типу, де поляризація випромінювання використовується для підвищення контрасту

зображення або виявлення об'єктів, прихованих за перешкодами, такими як дим, туман або рослинність.

Основні компоненти оптичної схеми

Джерело випромінювання

Оптична система починається з джерела випромінювання, яке випромінює інфрачервоне світло. Це може бути природне випромінювання об'єкта (наприклад, теплове випромінювання) або штучне джерело, таке як лазер.

Чвертьхвильова пластина

Чвертьхвильова пластина розташовується на шляху випромінювання і служить для модифікації його поляризаційного стану. Вона забезпечує фазову затримку у $\lambda/4$, що перетворює лінійно поляризоване випромінювання у кругово поляризоване або навпаки. Це дозволяє проводити більш точний аналіз поляризаційних характеристик випромінювання.

Поляриметр

Поляриметр складається з аналізатора поляризації та детектора. Аналізатор визначає стан поляризації випромінювання після його проходження через чвертьхвильову пластину, а детектор реєструє інтенсивність випромінювання. Таким чином, поляриметр формує дані, які використовуються для аналізу характеристик об'єкта.

Детекторна система

В оптичних системах, що працюють у діапазоні 8–14 мкм, часто використовуються матричні інфрачервоні детектори, здатні забезпечити високу просторову роздільну здатність. Вони дозволяють отримувати зображення об'єктів і аналізувати їх поляризаційні властивості в режимі реального часу.

Оптичні елементи

До додаткових елементів схеми відносяться лінзи або дзеркала, що фокусують або колімують світловий пучок, а також діафрагми, які обмежують апертуру. Вони забезпечують необхідну точність і якість роботи всієї системи.

Принцип роботи

Світло, що виходить від об'єкта спостереження, спочатку проходить через

чвертьхвильову пластину, яка змінює його поляризаційний стан. Далі випромінювання потрапляє на поляриметр, де аналізується його поляризація. Детектор реєструє інтенсивність випромінювання у різних станах поляризації, і ці дані використовуються для формування зображення або аналізу об'єкта.

Застосування

Оптичні системи з чвертьхвильовими пластинами та поляриметрами знаходять широке застосування у таких галузях:

Тепловізійні системи: Підвищення контрасту та деталізації зображень.

Матеріалознавство: Аналіз структури матеріалів через поляризаційні властивості.

Медицина: Оптична діагностика тканин з використанням інфрачервоного випромінювання.

Військова техніка: Виявлення об'єктів у складних умовах, таких як дим чи перешкоди.

Переваги інтеграції

Інтеграція чвертьхвильової пластини та поляриметра забезпечує:

Високу точність вимірювань завдяки корекції фазових зрушень.

Поліпшення якості зображення завдяки точному аналізу поляризації.

Здатність працювати у складних умовах навколишнього середовища.

Таким чином, інтеграція чвертьхвильової пластини з поляриметром є важливим технічним рішенням для створення високотехнологічних оптичних систем, що працюють у діапазоні 8–14 мкм, зокрема для тепловізійних пристроїв.

2.5 Проектування поляриметричного тепловізора

У цьому розділі описано процес проектування поляриметричного тепловізора, створеного на основі камери Dynamixel X-Series EVIDIR Alpha з оптикою, механічних компонентів для керування поляризаційними пластинами, а також використання комп'ютера Raspberry Pi 4 (8 GB RAM) для обробки сигналу та управління системою. Конструкція дозволяє отримувати як теплові зображення, так і поляриметричну інформацію для аналізу сцени та підвищення контрасту.

2.5.1 Вибір основних компонентів

Камера

Основою системи стала камера EVIDIR Alpha, яка забезпечує високу роздільну здатність (640×480 пікселів), чутливість $\text{NETD} \approx 30$ мК та роботу у спектральному діапазоні 8–14 мкм. Для неї було обрано об'єктив із фокусною відстанню 18.6 мм і відносним отвором $F/1.0$, що забезпечує високу світлосилу та точність реєстрації теплового випромінювання.

Поляризаційні елементи. Для отримання поляризаційної інформації сцени в конструкцію включено два ключові оптичні компоненти:

Поляризаційна пластина (WP25H-Z), яка обертається, дозволяючи аналізувати лінійну поляризацію на різних кутах ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)

Чверть-хвильова пластина, яка встановлена для вимірювання кругової поляризації. Це дозволяє оцінювати всі параметри Стокса (S_0, S_1, S_2 та S_3).

2.5.2. Привідний механізм Керування положенням пластин реалізоване за допомогою серводвигунів Dynamixel X-Series, які мають високу точність і плавність обертання. Передача крутного моменту здійснюється через механізм шестерень, що з'єднують серводвигуни з обертовими платформами пластин.

2.5.3. Обчислювальний блок

Для обробки сигналів і управління системою було використано Raspberry Pi 4 з 8 ГБ оперативної пам'яті. Цей компактний комп'ютер забезпечує:

Аналіз теплових та поляризаційних зображень у реальному часі.

Розрахунок оптимального кута обертання пластин для максимізації контрасту цілі відносно фону.

Управління серводвигунами через програмне забезпечення, що написане на Python.

2.6. Конструктивні особливості

2.6.1 Блок оптичних елементів

Поляризаційна пластина (WP25H-Z) та чверть-хвильова пластина змонтовані в єдиний блок, що закріплений у спеціальному тубусі. Тубус виконує функцію жорсткої основи для зменшення вібрацій і забезпечує точне

співвідношення між пластинами та оптичною віссю. Блок розташовано перед об'єктивом камери, щоб мінімізувати аберації та гарантувати рівномірність освітленості.

2.6.2. Механічний привід

Кожна пластина має індивідуальний механізм обертання:

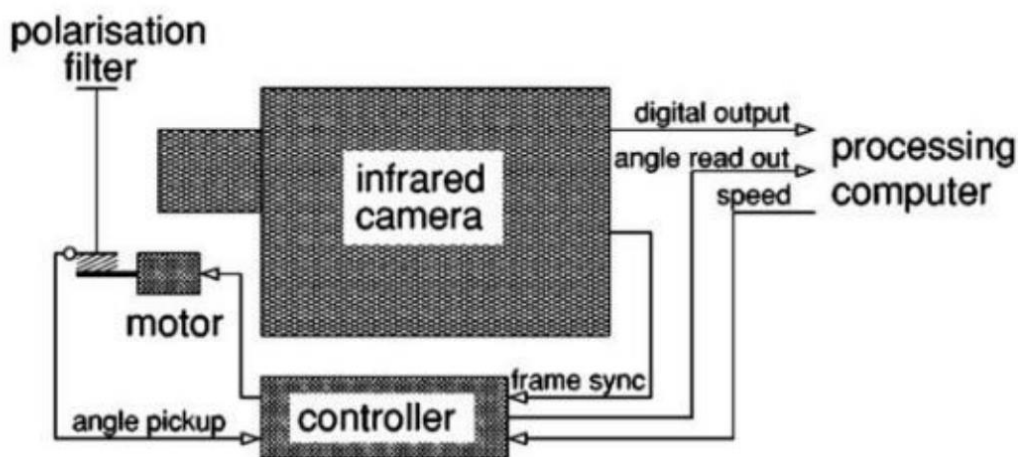


Рис. 2.6.2.1 Схема поляриметричного тепловізора з обертним механізмом поляриметричної пластини [49]

Серводвигуни Dynamixel передають крутний момент через шестерні на вал обертання.

Конструкція шестерень забезпечує безлюфтне обертання, що підвищує точність позиціонування.

Серводвигуни синхронізовані через інтерфейс управління, реалізований на Raspberry Pi 4.

2.6.3. Обчислювальний модуль

Raspberry Pi 4 виконує такі функції:

Обробка зображень:

Зчитування теплових зображень із камери EVIDIR Alpha.

Обчислення параметрів (S_0 , S_1 , S_2 та S_3), для кожного пікселя.

Формування карт поляризації (DoLP, AoLP) у реальному часі.

Алгоритми оптимізації:

Визначення оптимального кута обертання пластин для максимального контрасту цілі відносно фону.

Регулювання положення пластин для збору даних із кількох кутів поляризації.

Керування приводами:

Передача команд на серводвигуни для повороту пластин на заданий кут.

Синхронізація руху пластин із процесом зчитування зображень.

3. Програмне забезпечення

Програмне забезпечення може бути розроблене на Python з використанням бібліотек:

OpenCV для обробки зображень і візуалізації.

DynamixelSDK для управління серводвигунами Dynamixel.

NumPy для математичних розрахунків параметрів Стокса і карт поляризації.

Алгоритм роботи системи:

Запуск камери та зчитування початкового зображення.

Розрахунок контрасту сцени на основі теплових та поляризаційних даних.

Обертання поляризаційної пластини на заданий кут.

Повторний збір даних і оптимізація положення пластин для підвищення контрастності.

2.7. Ефективність системи

Реалізований поляриметричний тепловізор забезпечує:

Підвищення контрастності цілі в складних умовах (мала температурна різниця між ціллю та фоном).

Можливість детектування та розпізнавання об'єктів із різними поляризаційними характеристиками.

Автоматизовану оптимізацію налаштувань для підвищення якості зображень у реальному часі.

Конструкція, що поєднує точні оптичні компоненти, надійний механічний привід і потужний обчислювальний блок, дозволяє використовувати систему для

широкого спектра задач, включаючи спостереження, розпізнавання та аналіз складних сцен.

Висновок до розділу 2

У розділі 2 було розглянуто концепцію модернізованого поляриметричного тепловізора, зокрема, проаналізовано існуючі тепловізійні системи та визначено ключові аспекти їх модифікації для інтеграції поляриметричних компонентів.

Підрозділ 2.1, що містить аналіз існуючих тепловізорів, дозволив виявити основні обмеження традиційних тепловізійних систем і встановити потребу в інтеграції поляризаційних характеристик для підвищення ефективності детектування та розпізнавання об'єктів у складних умовах спостереження.

У підрозділі 2.3 було здійснено вибір поляризатора, що є важливим компонентом для інтеграції в поляриметричний тепловізор. Обраний поляризатор має високу ефективність і забезпечує точне вимірювання поляризаційних характеристик, що сприяє підвищенню контрасту зображень.

Вибір фазової пластинки, обговорений у підрозділі 2.4, забезпечує коректне вимірювання кругової поляризації, що є необхідним для отримання повної поляризаційної інформації сцени. Використання фазової пластинки дозволяє досягти більш точного аналізу поляризаційних характеристик, що є важливим для підвищення якості зображень в умовах низької контрастності.

Отже, розділ 2 підтвердив, що інтеграція поляризатора та фазової пластинки в тепловізійну систему є ключовим етапом для модернізації поляриметричного тепловізора, що дозволить суттєво покращити ефективність виявлення і розпізнавання об'єктів в складних умовах спостереження.

РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ

3.1 Основи поляризації світла

Поляризація є важливою властивістю світла, яка дає змогу отримувати інформацію, незалежну від його інтенсивності. Завдяки цій властивості можна покращити ідентифікацію цілей у випадках, коли їх поляризаційні характеристики відрізняються від навколишнього середовища. Для отримання таких даних застосовують оптичні методи, які передбачають використання фазових пластин та поляризаторів. Фазова пластина забезпечує вимірювання кругової поляризації, тоді як поляризатор застосовується для аналізу лінійної. Поєднання цих елементів дозволяє визначити сигнатуру на приймачі випромінювання за рівнянням:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta) \cos(\varphi) + S_3 \sin(2\theta) \sin(\varphi)). \quad (3.1.1)$$

Де θ – кут поляризації, φ – фазовий зсув через хвильову пластину.

Параметри S_0 , S_1 , S_2 та S_3 формують вектор Стокса

S_0 – загальна інтенсивність світла, що відповідає сумі всіх поляризаційних компонент.

S_1 – різниця інтенсивностей світла, поляризованого горизонтально (0°) та вертикально (90°)

S_2 – різниця інтенсивностей світла, поляризованого під кутами 45° та 135° .

S_3 – характеризує рівень кругової поляризації, тобто співвідношення між правокруговою та лівокруговою компонентами.

3.2 Детальний опис параметрів Стокса

S_0 Загальна інтенсивність світла

Цей параметр описує енергетичну складову хвилі і є сумою всіх інтенсивностей незалежно від їхньої поляризації. Вимірювання S_0 дозволяє оцінити яскравість сцени або об'єкта.

S_1 Горизонтальна та вертикальна лінійна поляризація

Параметр S_1 показує, наскільки інтенсивність горизонтально поляризованого світла перевищує інтенсивність вертикально поляризованого. Це важливий індикатор для оцінки лінійної поляризації, зумовленої розсіюванням чи відбиттям.

S_2 Поляризація під діагональними кутами

Параметр S_2 враховує різницю між світлом, поляризованим під кутами 45° та 135° . Він особливо важливий для аналізу сцен, де відображення чи розсіювання має діагональну орієнтацію.

S_3 Кругова поляризація

Цей параметр описує рівень кругової поляризації, яка виникає у випадках, коли електричний вектор світла обертається в площині перпендикулярно до напрямку поширення. У більшості природних сцен рівень кругової поляризації незначний, тому його часто можна ігнорувати, що спрощує аналіз.

3.3 Поляризація в природних умовах

Природні сцени часто містять поляризаційні властивості, які виникають внаслідок відбиття, розсіювання або випромінювання. У видимому та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах поляризація зазвичай пов'язана із сонячним світлом. Уночі джерелами поляризації стають місячне світло, штучні джерела та атмосферне сяйво. Вважається, що первинне випромінювання неполяризоване, а поляризація з'являється через взаємодію світла з поверхнями. Для теплового випромінювання в інфрачервоному спектрі рівень поляризації залежить від характеристик поверхні. Штучні об'єкти, завдяки гладким

поверхням, часто мають вищий рівень поляризації, ніж природні.

Вплив атмосфери також змінює стан поляризації через розсіювання. У більшості природних сцен домінує лінійна поляризація, а кругова поляризація є мінімальною. Тому для спрощення аналізу можна вважати параметр S_3 рівним нулю, що спрощує формулу:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta) \cos(\varphi)). \quad (3.3.1)$$

3.4 Вимірювання поляризації

Параметри Стокса представляють собою відповіді на чотири незалежні вимірювання інтенсивності світла, і вони можуть бути представлені у вигляді чотиривимірного вектора Стокса $S = [S_0, S_1, S_2, S_3]$. Чотири параметри Стокса іноді позначаються як I, Q, U і V відповідно.

$$\vec{S}_0 = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (3.4.1)$$

Стан поляризації світла зручно описувати за допомогою параметрів Стокса, які можна візуалізувати у вигляді сфери Пуанкаре. Сфера Пуанкаре є геометричним представленням трьох останніх параметрів Стокса у сферичних координатах, як показано на рисунку 3.4.1

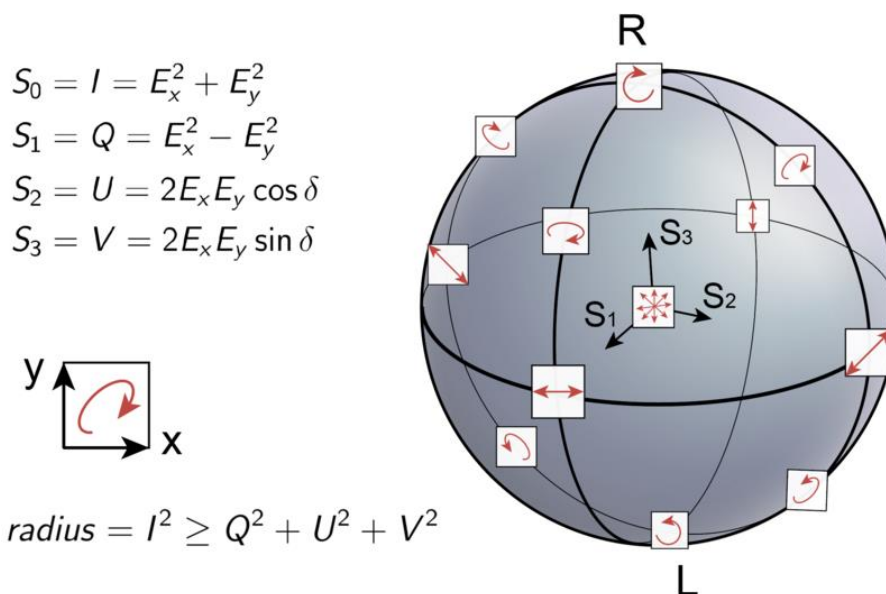


Рисунок 3.4.1 – Зображення станів поляризації на сфері Пуанкаре [50] Нижче показані приклади векторів Стокса для типових станів поляризації світла [51]

Щоб визначити параметри Стокса (S_0 , S_1 , S_2 та S_3), потрібно виміряти інтенсивність світла через поляризатор за кількома кутами ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) і

$$S_0 = I_{0^\circ} + I_{90^\circ}, \quad (3.4.2)$$

$$S_1 = I_{0^\circ} - I_{90^\circ}, \quad (3.4.3)$$

$$S_2 = I_{45^\circ} - I_{135^\circ}, \quad (3.4.4)$$

Ці параметри дозволяють формувати поляриметричні зображення, де S_0 відображає загальну інтенсивність, а S_1 , S_2 — ступінь лінійної поляризації. На основі цих даних розраховуються два ключові показники:

- Ступінь лінійної поляризації (DoLP):

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (3.4.5)$$

- Кут лінійної поляризації (AoLP):

$$AoLP = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (3.4.6)$$

DoLP забезпечує оцінку інтенсивності поляризації, тоді як AoLP показує її орієнтацію.

Поляризаційні характеристики залежать від типу взаємодії світла з

поверхніми (розсіювання, відбиття або теплове випромінювання). Наприклад, небо за ясної погоди або поверхня води демонструють поляризаційні ефекти. Штучні об'єкти мають вищий рівень поляризації через гладкість поверхні, хоча її напрямок і величина залежать від орієнтації об'єкта.

Також спектральна область впливає на поляризацію: у видимому діапазоні домінує відбиття, тоді як в інфрачервоному – теплове випромінювання. У середньому інфрачервоному діапазоні загальний рівень поляризації зменшується через комбінацію відбитого й випромінюваного світла.

Поляриметричні тепловізори, що працюють з односпектральними даними, створюють зображення через аналіз поляризації за чотирма кутами ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) Це дає змогу отримати поляриметричні зображення та виділити області з підвищеною поляризацією.

Для представлення зображень використовують різні формати: чорно-білі або кольорові палітри (HSV, RGB тощо). Хоча автоматичні системи можуть обробляти дані незалежно від кольору, оператору зручніше працювати з кольоровим відображенням, оскільки воно покращує візуальне сприйняття поляризаційних властивостей сцени.

3.5 Поляриметричне підсилення контрасту зображень

Одним із методів покращення зображень є підсилення контрасту сцени за допомогою поляриметричних характеристик, таких як ступінь лінійної поляризації (DoLP) або кут поляризації (AoLP). Замість накладання кольорової інформації поляризації на інтенсивність S_0 , використовують алгоритми динамічного регулювання контрасту.

Наприклад, пікселі із високими значеннями DoLP виділяють шляхом збільшення локальної контрастності, тоді як області із низькою поляризацією залишаються незмінними. Це забезпечує чіткіше відображення об'єктів із характерними поляризаційними властивостями, таких як транспортні засоби чи поверхні з певною текстурою.

Для регулювання інтенсивності використовується функція, яка визначає, наскільки яскравість кожного пікселя залежить від його поляризаційного значення. Параметри, такі як коефіцієнт підсилення (γ) і пороговий рівень (T_p), дозволяють налаштувати ступінь підсилення.



Рисунок 3.5.2 приклад кадру зробленого на поляриметричний тепловізор з поворотною поляриметричною пластиною на практиці в КБ СПБ “АРСЕНАЛ”

Використання цього підходу добре ілюструється на зображеннях ландшафтів із прихованими об'єктами. Наприклад, малопомітні об'єкти, які мають високі значення DoLP, стають більш видимими після застосування поляриметричного підсилення.

3.6 Використання гібридних підходів до обробки зображень

Гібридні методи об'єднують кілька підходів до обробки поляриметричних даних для досягнення максимальної інформативності. Зокрема, одночасно застосовуються просторові фільтри для зменшення шуму та алгоритми підсилення яскравості та контрасту.

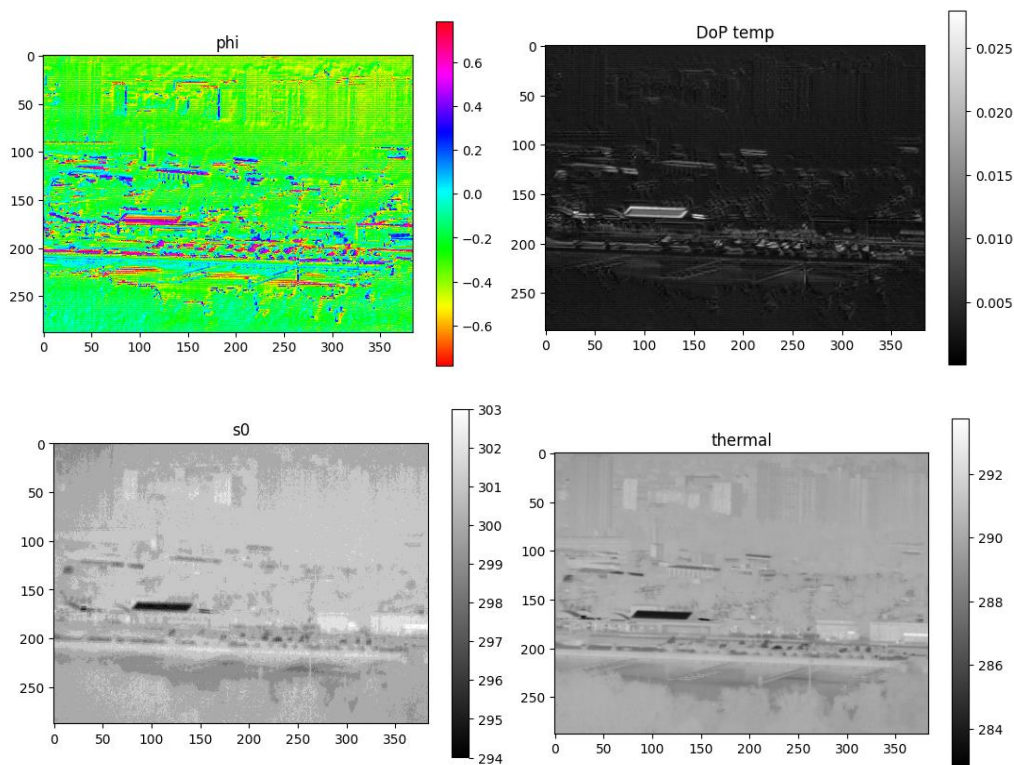


Рисунок 3.5.1 приклади кадрів виконаних під час практики в КБ СПБ “АРСЕНАЛ” однієї й тієї ж сцени при використанні різних методів обробки поляризаційного зображення.

Наприклад, зображення S_0 може бути попередньо оброблено за допомогою фільтра медіанного згладжування для зменшення шуму, тоді як поляризаційні дані DoLP використовуються для виділення структурних деталей. У результаті накладається маска поляризаційної інтенсивності, яка підсилює області з характерними поляризаційними ознаками, такими як металеві поверхні чи об'єкти зі складною геометрією.

Крім того, можна застосовувати комбіновані алгоритми, наприклад, використання поляризаційних даних для вибіркового збільшення контрасту певних областей, де рівень поляризації перевищує заданий поріг. Такі гібридні підходи дозволяють отримати зображення, які краще пристосовані для аналізу в умовах низької видимості або складного фону.

Ефективність методу демонструється на прикладі нічних зйомок, де завдяки накладанню та підсиленню поляризаційних характеристик стає можливим виявлення деталей, які залишаються непомітними на традиційних

теплових зображеннях.

3.7.1 Енергетичні розрахунки

Ступінь поляризації визначається за формулою:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3.7.1)$$

де I_{\max} та I_{\min} – максимальна та мінімальна інтенсивності випромінювання, відповідно. Цей показник демонструє, наскільки випромінювання цілі є поляризованим у порівнянні з фоном.

Кут поляризації (ϕ) обчислюється як:

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right), \quad (3.7.2)$$

де U та Q — параметри Стокса, які характеризують компоненти поляризованого випромінювання.

Енергетична світність тіла описується формулою Планка:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (3.7.3)$$

де:

$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – стала Планка,

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – швидкість світла,

$k = 1.381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – стала Больцмана,

$\lambda = 10 \mu\text{м} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – типова довжина хвилі середньохвильового інфрачервоного діапазону,

T – температура цілі.

Нехай температура цілі становить $T_c = 320 \text{ К}$ (наприклад, людина).

Температура фону становить $T_b = 300 \text{ К}$ (наприклад, земля).

Визначимо енергетичну світність для цілі та фону підставивши числові значення:

$$M_{\lambda,t} = \frac{2 * 3.14 * 6.626 * 10^{-34} \text{ Дж} * c}{(10 * 10^{-6} \text{ м})^5} \frac{1}{\exp \left(\frac{6.626 * 10^{-34} \text{ Дж} * c * 3 * 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{10 * 10^{-6} \text{ м} * 1.381 * 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} * 320 \text{ К}} \right) - 1} \approx 4.22 * 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (3.7.5)$$

$$M_{\lambda,b} = \frac{2 * 3.14 * 6.626 * 10^{-34} \text{ Дж} * c}{(10 * 10^{-6} \text{ м})^5} \frac{1}{\exp \left(\frac{6.626 * 10^{-34} \text{ Дж} * c * 3 * 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{10 * 10^{-6} \text{ м} * 1.381 * 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} * 300 \text{ К}} \right) - 1} \approx 3.12 * 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (3.7.6)$$

Обчислимо контрастність за наступною формулою:

$$C_{\text{traditional}} = \frac{M_{\lambda,t} - M_{\lambda,b}}{M_{\lambda,b}} \quad (3.7.7)$$

Де:

$M_{\lambda,t}$ та $M_{\lambda,b}$ - енергетична світність цілі та фону відповідно.

Підставимо числові значення в формулу (7):

$$C_{\text{traditional}} = \frac{4,22 * 10^7 - 3,12 * 10^7}{3,12 * 10^7} \approx 0,354 \quad (3.7.8)$$

Для поляриметричного тепловізійного зображення контраст визначається з урахуванням сумарної інтенсивності:

$$I_{\text{polarimetric}} = I + P * I * \cos^2(\theta) \quad (3.7.9)$$

Де:

I – інтенсивність випромінювання,

P – ступінь поляризації,

θ – кут поляризації.

Контраст:

$$C = \frac{I_{t,\text{polarimetric}} - I_{b,\text{polarimetric}}}{I_{b,\text{polarimetric}}} \quad (3.7.10)$$

Будемо вважати що ми спостерігаємо ціль та фон під прямим кутом, тоді

$$I_t = 4.22 * 10^7 \frac{Bm}{M^2}, I_b = 3.12 * 10^7 \frac{Bm}{M^2}$$

Нехай Ступінь поляризації для цілі $P_t = 0,3$, Ступінь поляризації для фону $P_b = 0,1$ а кут поляризації $\theta = 45^\circ$.

Розрахуємо інтенсивність для цілі та для фону з урахуванням поляризації:

$$I_{t,polarimetric} = 4,22 * 10^7 \frac{Bm}{M^2} + 0,3 * 4,22 * 10^7 \frac{Bm}{M^2} * \frac{1}{2} \approx 4,84 * 10^7 \frac{Bm}{M^2} . \quad (3.7.11)$$

$$I_{b,polarimetric} = 3,12 * 10^7 \frac{Bm}{M^2} + 0,3 * 3,12 * 10^7 \frac{Bm}{M^2} * \frac{1}{2} \approx 3,28 * 10^7 \frac{Bm}{M^2} . \quad (3.7.12)$$

Розрахуємо контраст між цілю та фоном з урахуванням поляризації:

$$C_{traditional} = \frac{4,84 * 10^7 - 3,28 * 10^7}{3,28 * 10^7} \approx 0,475 . \quad (3.7.13)$$

При цьому збільшення контрасту розрахуємо за формулою:

$$C = \frac{C_{polarimetric} - C_{traditional}}{C_{traditional}} = \frac{0,475 - 0,354}{0,354} \approx 0,34 \quad (3.7.14)$$

Тобто в даній ситуації приріст контрасту має складати приблизно 34%. [52]

3.7.2 Розренок MRTD та MDTD враховуючи поляризаційну

- Об'єктив: фокусна відстань $f=18.6$ мм, відносний отвір F/1.0F/1.0F/1.0.
- Діаметр входної зіниці: $D=fF=18.6$ мм.

Приймач:

- Матриця: 640×480 , розмір пікселя $p=12$ μ м.
- Спектральний діапазон: $\lambda=8$ μ м– 14 μ м .
- Ефективність детектора $\eta=0.85$.

Сцена:

- Температура фону $T_{фон}=300$ К (типові умови).
- Температура цілі $T_{ціль}$ — варіюється для розрахунку залежностей.

MDTD (без поляризації)

MDTD визначається як мінімальна температурна різниця, що може бути виявлена, залежно від NETD (шумової еквівалентної різниці температур).

Формула:

$$MDTD = \frac{NETD}{\Delta L(T_t, T_b)} \quad (3.7.15)$$

де:

- $\Delta L(T_t, T_b)$ — різниця випромінювання між фоном та ціллю, визначається за законом Планка.

Розрахунок ΔL :

$$L(T) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda KT}} - 1} d\lambda \quad (3.7.16)$$

де:

- $T_b = 300K$ – температура фону

$$T_t = T_b - \Delta T,$$

- $\lambda_1 = 8 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 14 \mu\text{m}$.

Після обчислення $\Delta L = L(T_t) - L(T_b)$, підставимо це в формулу для MDTD.

2. MDTD (з поляризацією)

З урахуванням поляризаційної складової, різниця інтенсивностей змінюється в залежності від ступеня поляризації (DoLP) та кута поляризації (AoLP). Формула для інтенсивності:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta) \cos(\varphi)) \quad (3.7.17)$$

Де θ – кут поляризації, φ – фазовий зсув через хвильову пластину.

Параметри S_0 , S_1 , S_2 та S_3 формують вектор Стокса

S_0 – загальна інтенсивність світла, що відповідає сумі всіх поляризаційних компонент.

S_1 – різниця інтенсивностей світла, поляризованого горизонтально (0°) та вертикально (90°)

S_2 – різниця інтенсивностей світла, поляризованого під кутами 45° та 135° .

$$MDTD_{polarimetric} = \frac{NETD}{\Delta I} \quad (3.7.18)$$

3. MRTD

MRTD залежить від просторової частоти (f) і визначається як:

$$MRTD = \frac{MDTD}{MTF(f)} \quad (3.7.19)$$

- $MTF(f)$ — модуль передавальної функції для просторової частоти f , залежить від розміру пікселя, фокусної відстані та діаметра вхідної зіниці. Дані розрахунки були виконані за допомогою коду, написаного мовою пайтон з Додатку 8.

Результати обчислень :

MDTD (без поляризації): 0.0356 К

MDTD (з поляризацією): 0.0013 К

MRTD (без поляризації) для різних частот:

Частота: 0.00e+00 м⁻¹, MRTD: 0.0356 К

Частота: 9.26e+03 м⁻¹, MRTD: 0.0458 К

Частота: 1.85e+04 м⁻¹, MRTD: 0.0642 К

Частота: 2.78e+04 м⁻¹, MRTD: 0.1069 К

Частота: 3.70e+04 м⁻¹, MRTD: 0.3208 К

MRTD (з поляризацією) для різних частот:

Частота: 0.00e+00 м⁻¹, MRTD: 0.0013 К

Частота: 9.26e+03 м⁻¹, MRTD: 0.0017 К

Частота: 1.85e+04 м⁻¹, MRTD: 0.0024 К

Частота: 2.78e+04 м⁻¹, MRTD: 0.0040 К

Частота: 3.70e+04 м⁻¹, MRTD: 0.0119 К

Також була написана мною програма для визначення максимальної дальності розпізнавання в застосунку MATLAB код якої представлено в додатку 9. Результати цих розрахунків показані в наступному рисунку:

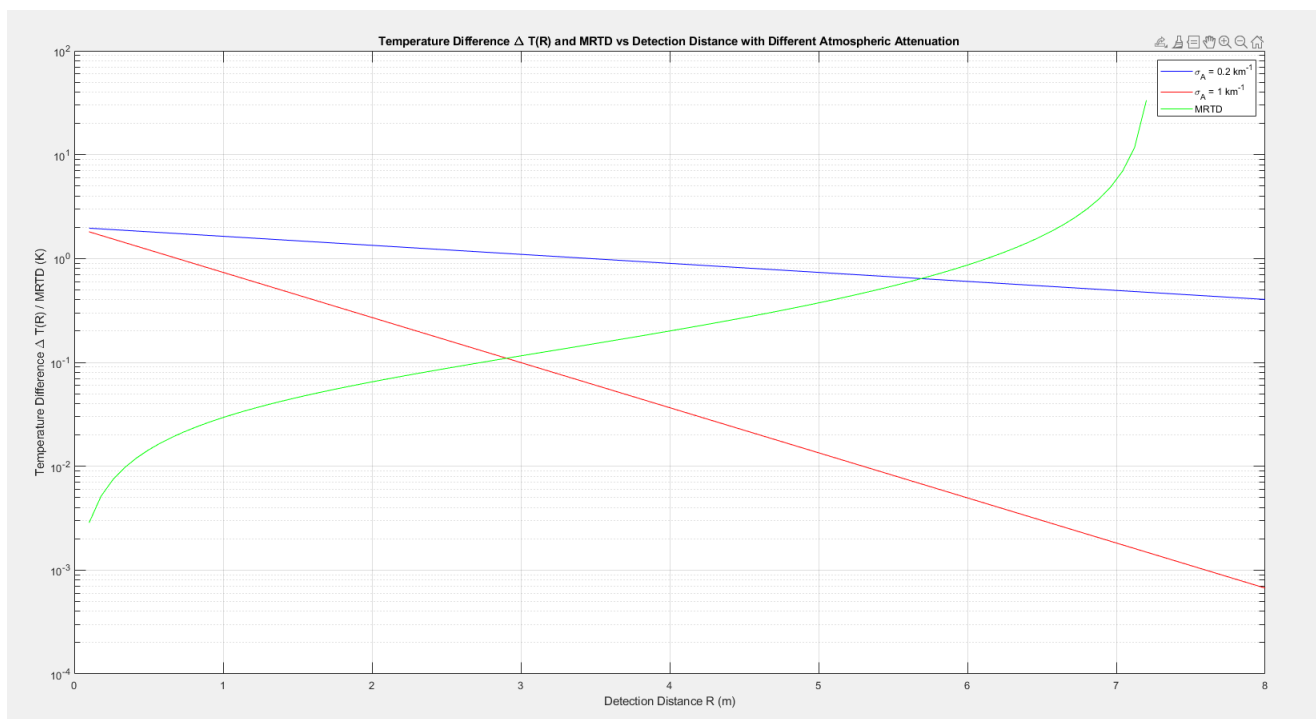


Рис. 1. Залежність різниці температур (ΔT) і мінімально розрізнявальної температурної різниці (MRTD) від відстані виявлення (R) з урахуванням різних рівнів атмосферної аттенюації (0.2 км^{-1} , 1 км^{-1}).

Червона крива (поглинання 0.2 км^{-1}): Ця крива показує, як змінюється різниця температур (ΔT) з відстанню виявлення при певному рівні атмосферної аттенюації (0.2 км^{-1}). Зі збільшенням відстані різниця температур зменшується, що свідчить про ослаблення сигналу через поглинання або розсіювання в атмосфері.

Зелена крива (поглинання 1 км^{-1}): Це схожа крива, але з більшим рівнем атмосферної аттенюації (1 км^{-1}). Як результат, різниця температур (ΔT) зменшується ще різкіше з відстанню в порівнянні з червоною кривою.

Синя крива (MRTD): Ця крива показує мінімальну розрізнявальну температурну різницю (MRTD), що є показником чутливості та роздільної здатності інфрачервоного сенсора. Зі збільшенням відстані MRTD збільшується, що вказує на те, що стає важче розрізняти невеликі температурні різниці на більших відстанях.

Максимальна відстань розпізнавання буде на перетині кривої MRTD з кривими зміни ΔT при різних погодних умовах, і ми бачимо що за поганих погодних умов максимальна дальність розпізнавання макету об'єкту за розмірами цілі НАТО складатиме приблизно 2.7 км , а при хороших погодних

умовах приблизно 5.7 км.

Висновок до розділу 3

У розділі 3 була розглянута фізико-математична модель поляриметричного тепловізора, а також проведені енергетичні розрахунки, що включають оцінку ефективності системи з урахуванням поляризаційних характеристик.

У підрозділі 3.1, присвяченому основам поляризації світла, було викладено теоретичні основи цього явища, що є ключовими для створення поляриметричних систем. Далі, у підрозділі 3.2, детально описано параметри Стокса, що характеризують стан поляризації світла. Вивчення цих параметрів дозволило визначити, як поляризаційні властивості сцени впливають на якість отриманих зображень.

Підрозділ 3.3 розглянув поляризацію в природних умовах, де було показано, як природні поверхні та атмосферні умови можуть змінювати поляризаційні характеристики світла, що важливо для налаштування і використання поляриметричних тепловізорів в реальних умовах.

Енергетичні розрахунки в підрозділі 3.7.1 дозволили оцінити, як різні параметри, такі як температура об'єкта, фону та ступінь поляризації, впливають на ефективність детектування в умовах низького контрасту. Розрахунки MRTD та MDTD в підрозділі 3.7.2, враховуючи поляризаційну складову, показали, що поляризація може значно покращити можливості виявлення та розпізнавання об'єктів на тлі складних сцен, що підтверджує важливість врахування поляризаційних параметрів для підвищення ефективності поляриметричних тепловізорів.

Таким чином, результати цього розділу підтвердили, що інтеграція поляризаційної інформації в процес обробки теплових зображень дозволяє суттєво покращити точність детектування об'єктів, підвищуючи ефективність роботи поляриметричних тепловізорів у складних умовах спостереження.

РОЗДІЛ 4: АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

4.1 Попередня обробка поляриметричних зображень

Обробка поляриметричних зображень починається з підготовки даних, яка включає корекцію сигналів та зменшення впливу шуму. Оскільки поляриметричні тепловізори працюють в умовах низької освітленості або за складних атмосферних умов, на вихідний сигнал значно впливають фактори навколишнього середовища.

Основні кроки попередньої обробки:

- Корекція фонові інтенсивності

Для виключення впливу змінної яскравості сцени використовуються методи нормалізації, що базуються на усередненні рівня яскравості в усьому зображенні.

- Фільтрація шуму

Просторові фільтри: Наприклад, медіанний фільтр усуває шум, зберігаючи при цьому контури об'єктів.

Вейвлет-фільтри: Ефективно видаляють високочастотні перешкоди, що часто виникають у тепловізорах.

- Компенсація геометричних спотворень

Використовуються методи калібрування, які коригують спотворення, викликані оптичною системою, для забезпечення точного співвідношення між просторовими координатами сцени і пікселями зображення.

Попередня обробка даних дозволяє забезпечити якісний аналіз поляризаційних характеристик та значно зменшити вплив шуму на кінцевий результат.

4.2 Виділення та аналіз поляризаційних параметрів

Ключовим етапом обробки є виділення параметрів Стокса, які описують стан поляризації у кожній точці зображення. З цих параметрів обчислюють:

DoLP (ступінь лінійної поляризації)

що відображає рівень поляризації в кожному пікселі.

AoLP (кут лінійної поляризації)

який характеризує напрямок поляризації.

Для отримання цих параметрів використовуються наступні алгоритми:

Спектральний аналіз

1. Аналіз поляризації в різних спектральних діапазонах (SWIR, MWIR, LWIR) для отримання додаткових даних про структуру та матеріал об'єктів.
2. Часовий поділ
3. Застосування моторизованих або електронних поляризаторів для отримання зображень при різних кутах (
4. Комбінація зображень

Отримання значень параметрів Стокса шляхом розв'язання системи рівнянь, що базуються на вимірних інтенсивностях.

Результати цього етапу є основою для подальшого аналізу поляризаційних властивостей сцени.

4.3 Злиття даних для покращення зображень

Одним із важливих методів обробки є комбінування поляризаційних даних із базовою інтенсивністю для отримання більш інформативних зображень.

Методи злиття:

1. Накладання кольорової інформації

Поляризаційна інформація (DoLP та AoLP) відображається у кольоровій гамі, яка накладається на сіре зображення. Це дозволяє візуально ідентифікувати області з високою поляризацією, що особливо корисно для аналізу сцен із низьким контрастом.

2. Інтеграція через багатопланові алгоритми

Використання пірамідальних структур, таких як Лапласівська піраміда, для комбінування деталей із різною просторовою роздільною здатністю.

Цей підхід забезпечує підвищення контрастності та зменшення шуму.

3. Методи логічного об'єднання

Використання функцій, що виділяють тільки поляризовані області, шляхом порогового обмеження значень DoLP.

Результат:

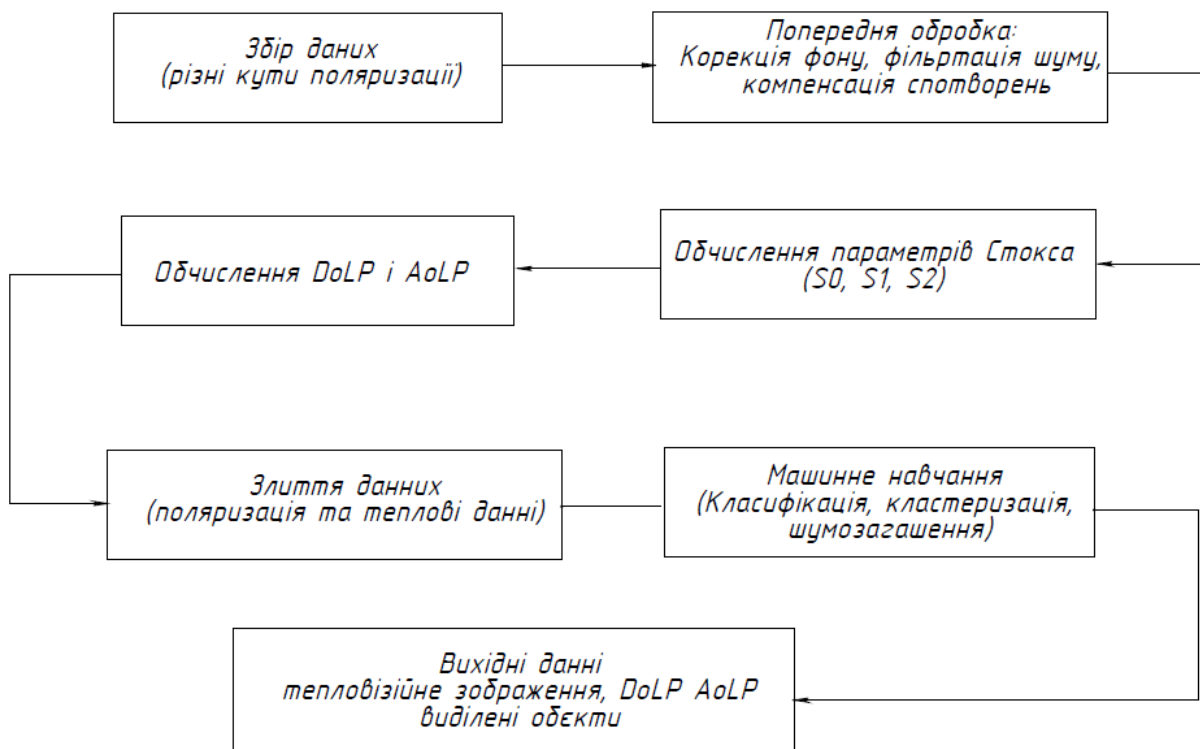


Рис 4.3.1 Схема розробленого алгоритму обробки поляризаційних тепловізійних зображень

Поєднані зображення забезпечують кращу інформативність, дозволяючи оператору або автоматизованим системам виявляти дрібні деталі, які залишаються непомітними на звичайних теплових зображеннях.

4.4 Інтелектуальні алгоритми для аналізу поляризаційних даних

Застосування методів машинного навчання (ML) і штучного інтелекту (AI) дозволяє значно автоматизувати аналіз поляриметричних даних.

Основні підходи:

1. Глибоке навчання

Використання нейронних мереж для класифікації об'єктів за їхніми поляризаційними сигнатурами.

Наприклад, CNN (Convolutional Neural Networks) ефективно

виділяють поляризаційні контури.

2. Регресійні моделі

Для визначення ступеня поляризації та її змін у різних ділянках сцени.

3. Алгоритми кластеризації

Метод К-середніх (K-Means) дозволяє групувати пікселі за їхніми поляризаційними характеристиками, що спрощує ідентифікацію об'єктів.

4. Інтелектуальна обробка шумів

AI-алгоритми дозволяють динамічно виявляти та усувати шумові компоненти без втрати корисної інформації.

Переваги:

Ці підходи забезпечують швидку і точну обробку великих обсягів даних, що є критично важливим для сучасних систем спостереження.

4.5 Моделювання та симуляція поляриметричних зображень

Використання симуляцій для валідації алгоритмів

Моделювання поляриметричних зображень дозволяє перевірити ефективність алгоритмів без необхідності проведення польових випробувань.

Для симуляцій використовуються програмні пакети, наприклад, MATLAB, Zemax або OpenCV, які дозволяють створювати поляризаційні карти об'єктів на основі їх фізичних властивостей.

Методи моделювання:

Генерація синтетичних поляризаційних даних

Використання моделей об'єктів зі специфічними матеріальними властивостями (наприклад, металів, тканин, водних поверхонь).

Симуляція динамічних умов, таких як змінне освітлення чи наявність атмосферних перешкод.

Реалізація фізичних моделей

Використання рівнянь Максвелла для опису розповсюдження поляризованого випромінювання.

Врахування особливостей відбиття, розсіювання і поглинання

випромінювання об'єктами різних типів.

Аналіз параметрів Стокса

Побудова синтетичних Стоксових векторів на основі модельних умов сцени.

Цей підхід дозволяє створювати тестові набори даних для тренування алгоритмів машинного навчання або перевірки працездатності методів аналізу.

4.6 Використання адаптивних фільтрів для динамічного шумозаглушення

Адаптивна обробка зображень

Традиційні методи шумозаглушення, такі як медіанний чи вейвлет-фільтри, мають обмеження у складних умовах. Використання адаптивних фільтрів дозволяє враховувати особливості сцени, зокрема змінний рівень шуму в різних ділянках зображення.

Основні підходи:

Адаптивний Вейвлет-фільтр

Зміна порогів шумозаглушення в залежності від локальної інтенсивності сигналу.

Підвищення точності виявлення об'єктів у високошумових зонах.

Фільтри Кальмана

Використання фільтру Кальмана для обробки поляриметричних зображень в реальному часі.

Цей підхід особливо ефективний для динамічних сцен, наприклад, для аналізу рухомих об'єктів.

Метод адаптивного порогоування

Використання динамічних порогових значень для виділення поляризованих областей, що дозволяє зберегти контури об'єктів навіть у присутності сильних перешкод.

4.7 Поляризаційна деконволюція

Мета деконволюції:

Поляризаційна деконволюція є критично важливим етапом обробки

даних, що дозволяє покращити просторову роздільну здатність, контрастність зображень та відновити деталі сцени, втрачені через обмежену апертуру оптичної системи чи впливи дифракції. Деконволюція спрямована на компенсацію викривлень і розмиття, що виникають унаслідок дії апаратної функції розсіювання точки (PSF, Point Spread Function) оптичної системи.



(a)



(b)

Рисунок 4.7.1: Використані набори даних наведені наступним чином: (a) — реальний набір даних, який ми зібрали, що містить зображення з параметрами S_0 , S_1 , DoLP і AoLP, розташовані зліва направо. (b) — відкритий набір даних. [53]

Призначення поляризаційної деконволюції:

Підвищення точності аналізу: Завдяки компенсації викривлень та відновленню структурних деталей, поляризаційні характеристики об'єктів аналізуються більш достовірно.

Покращення візуалізації: Використання деконволюції дозволяє виділити деталі, які залишаються прихованими через шум або дефокусування.

Сприяння автоматичній обробці: Збільшення якості вихідного зображення підвищує ефективність подальшого аналізу алгоритмами машинного навчання або автоматичними системами виявлення об'єктів.

Алгоритми деконволюції:

Деконволюція у поляризаційних тепловізорах базується на адаптації традиційних методів до обробки багатовимірних даних, що включають параметри поляризації (DoLP, AoLP) разом із яскравісною складовою.

4.7.1 Метод Річардсона-Люсі (RL):

Цей метод є одним із найбільш популярних ітеративних підходів:

Принцип: Реконструкція справжнього зображення ґрунтується на знанні апаратної функції розсіювання точки (PSF). RL дозволяє відновити деталі сцени через послідовне уточнення зображення шляхом оцінювання ймовірностей.

Особливості:

Добре підходить для низько контрастних сцен, що мають високий рівень шуму.

При адаптації до поляризаційних даних RL враховує різні компоненти сигналу, що дозволяє покращити точність обчислення параметрів DoLP та AoLP.

RL-алгоритм може бути оптимізований для паралельної обробки даних на GPU.

4.7.2. Регуляризація методом Тихонова:

Суть методу: Регуляризація додає додаткові обмеження до системи рівнянь деконволюції для уникнення перенавчання або посилення шуму. Вона базується на мінімізації функціоналу, що враховує як точність деконволюції, так і гладкість отриманого результату.

Переваги:

Стабілізація обчислювального процесу, особливо у випадках, коли PSF відома з похибками.

Можливість адаптації для обробки поляризаційних даних із сильно вираженим фоновим шумом.

Ітеративна реалізація: Для досягнення оптимального балансу між деталізацією та пригніченням шуму використовується ітеративне уточнення розв'язку.

4.7.3. Ітеративні методи деконволюції:

Принцип роботи: Ітеративні підходи будуються на повторному оновленні зображення з метою зменшення розбіжностей між реконструйованим та отриманим зображенням. Вони включають методи градієнтного спуску, які дозволяють враховувати поляризаційні параметри.

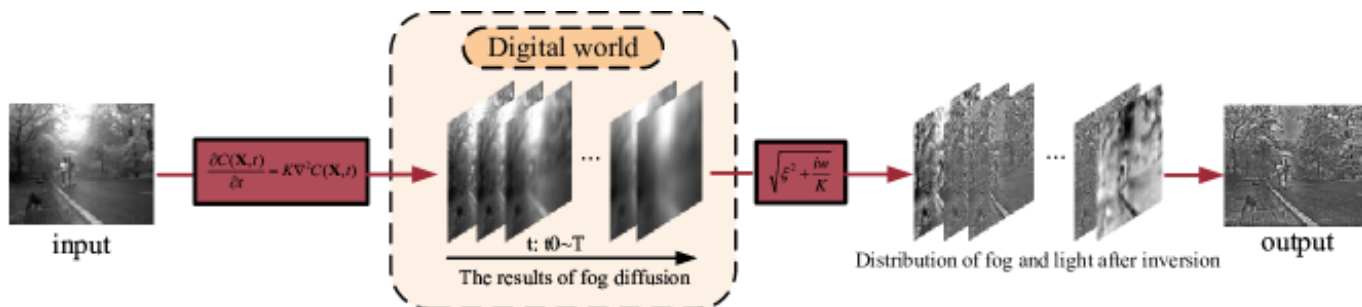


Рисунок 4.7.2 схема алгоритму з Дослідження з видалення туману на поляризаційних зображеннях зі статті в якій наведено методи деконволюції для покращення якості зображень за допомогою аналізу поляризаційх[53]

Варіанти:

Метод найменших квадратів із регуляризацією.

Методи адаптивної оптимізації, такі як метод Левенберга-Марквардта.

Інтеграція деконволюції з іншими методами:

Поляризаційна деконволюція може ефективно поєднуватися з методами попередньої обробки та злиття даних для досягнення оптимальних результатів:

Фільтрація шуму: Перед виконанням деконволюції застосовуються просторові або вейвлет-фільтри, що зменшують рівень шуму, не знижуючи просторової роздільної здатності.

Злиття даних: Після деконволюції відновлені поляризаційні компоненти можуть бути інтегровані з базовим зображенням для покращення інформативності сцени. Наприклад, деконволюція DoLP дозволяє краще візуалізувати області з високою поляризацією.

Використання у складних умовах:

Атмосферні спотворення: У разі значних викривлень через турбулентність повітря деконволюція із врахуванням змінної PSF дозволяє значно підвищити

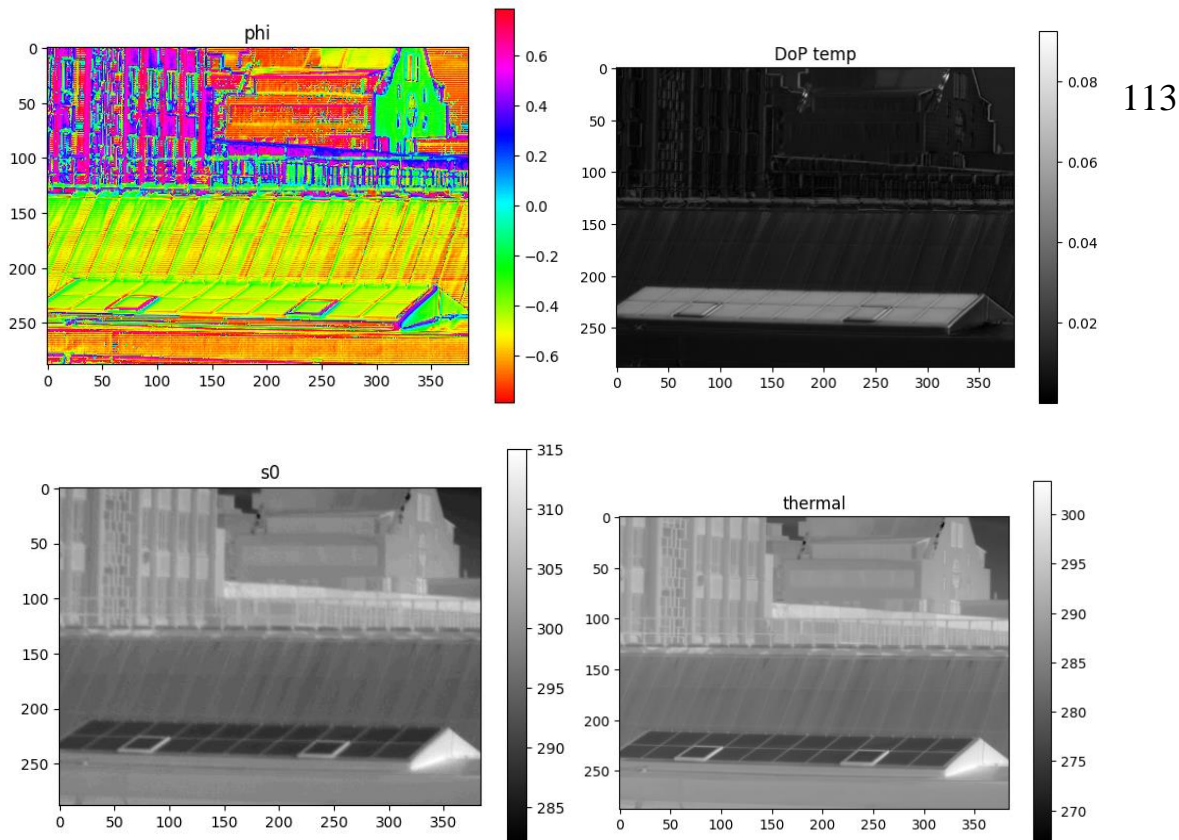


Рисунок 4.731 приклади кадрів виконаних під час практики в КБ СПБ “АРСЕНАЛ” однієї й тієї ж сцени при використанні різних

якість обробки.

Рухомі об’єкти: Алгоритми деконволюції можуть бути доповнені корекцією розмиття рухомих об’єктів, що особливо важливо для тепловізійних систем спостереження.

Інфрачервоні системи: Врахування особливостей роботи у спектральних діапазонах SWIR, MWIR та LWIR дозволяє досягти кращої деталізації.

Сучасні підходи до автоматизації деконволюції:

Штучний інтелект: Алгоритми на базі машинного навчання, зокрема глибокі нейронні мережі, можуть бути використані для автоматичного визначення PSF та оптимізації деконволюції у реальному часі.

Динамічні моделі PSF: У реальних системах PSF може змінюватися залежно від умов сцени (наприклад, відстань до об’єкта чи напрямок огляду). Використання адаптивних підходів забезпечує корекцію таких змін.

4.8 Використання алгоритмів супер роздільної здатності

Поліпшення якості поляриметричних зображень є критично важливим для підвищення точності аналізу та виявлення об’єктів. Алгоритми супер роздільної

здатності (Super-Resolution) дозволяють збільшити деталізацію зображень, отриманих з низькою роздільною здатністю, шляхом відновлення додаткової інформації на основі доступних даних.

Генеративно-змагальні мережі (GANs)

Основний принцип:

Генеративно-змагальні мережі — це сучасний підхід до створення високоякісних зображень. GANs складаються з двох основних компонентів: генератора і дискримінатора. Генератор створює нові зображення, а дискримінатор намагається відрізнити згенеровані зображення від реальних. В процесі тренування мережі обидва компоненти вдосконалюються, що дозволяє отримувати реалістичні результати.

Застосування у поляриметрії:

У контексті поляриметричних зображень GANs можуть бути використані для:

Відновлення втрачених деталей поляризаційних параметрів, таких як DoLP і AoLP.

Генерації високоякісних даних для тренування інших алгоритмів, що вимагають великого обсягу даних.

Це забезпечує кращу деталізацію та підвищує точність аналізу сцени.

Супер роздільна інтерполяція

Основний принцип:

Супер роздільна інтерполяція використовує алгоритми збільшення роздільної здатності, враховуючи просторові та текстурні особливості зображень. На відміну від звичайних методів масштабування, таких як бік бічна інтерполяція, цей підхід аналізує локальні градієнти і деталі, щоб уникнути розмиття.

Особливості у поляриметричних зображеннях:

Аналіз текстур: Поляризаційна інформація дозволяє краще враховувати тонкі деталі поверхонь, наприклад, напрямок волокон або мікроскопічні нерівності.

Адаптація до багатоспектральних даних: У випадку, коли поляриметричне зображення отримано у кількох спектральних діапазонах (SWIR, MWIR, LWIR), інтерполяція може використовувати крос-спектральну інформацію для покращення результату.

Метод багатокадрового відновлення

Основний принцип:

Метод передбачає об'єднання декількох кадрів тієї ж сцени, отриманих під різними поляризаційними кутами. Кожне зображення містить унікальну інформацію про сцену, яку можна комбінувати для отримання одного високоякісного зображення.

Застосування:

Компенсація шуму: Середнє значення даних з кількох кадрів допомагає зменшити вплив випадкових шумів.

Підвищення просторової роздільної здатності: Дані, отримані під різними кутами поляризації, додають нову інформацію про текстури та структури об'єктів.

Динамічний аналіз: Об'єднання кадрів дозволяє досліджувати зміни поляризаційних характеристик у часі, що корисно для виявлення рухомих об'єктів.

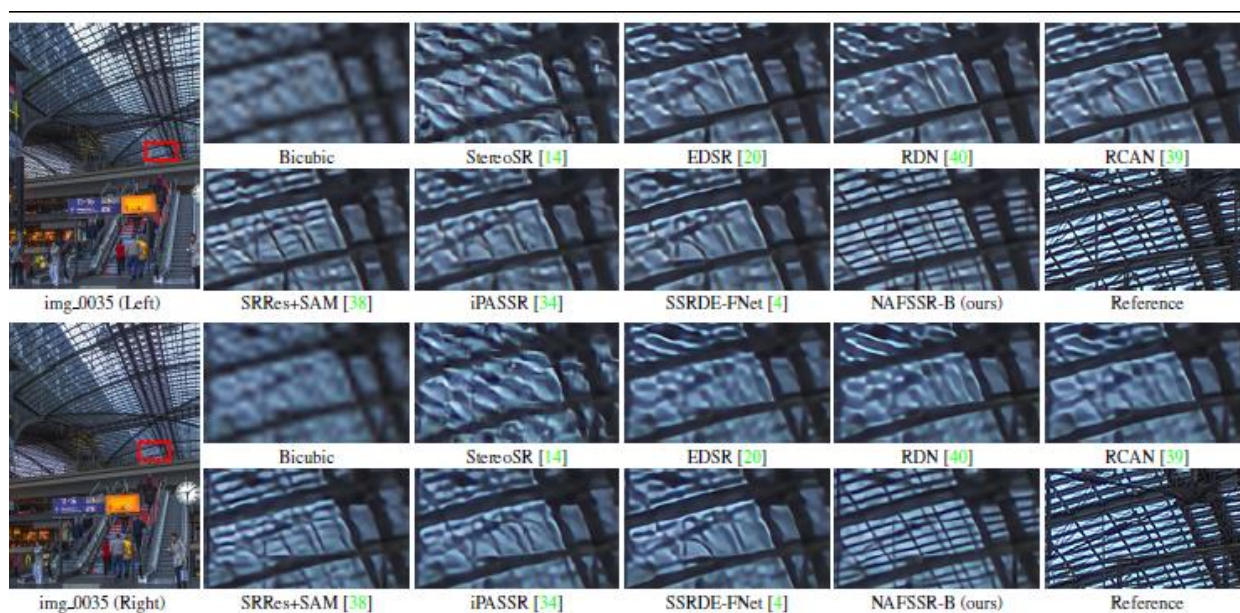


Рисунок 4.8.1 Візуальні результати (збільшення $\times 4$), отримані різними методами та алгоритмами супер роздільної здатності на наборі даних Flickr1024 [54].

Висновок до розділу 4

Розділ 4 охопив ключові аспекти обробки поляриметричних зображень у тепловізорах, спрямованих на підвищення їхньої якості, точності та інформативності. Було розглянуто методи попередньої обробки, які включають корекцію сигналів, фільтрацію шуму та компенсацію геометричних спотворень, що є основою для покращення аналізу даних. Використання параметрів Стокса дозволяє визначати ступінь і напрямок поляризації, що надає додаткову інформацію для аналізу сцени.

Особлива увага приділялася алгоритмам злиття даних, зокрема методам накладання кольорової інформації, багатошаровим алгоритмам і логічному об'єднанню, які дозволяють отримувати більш чіткі зображення навіть у складних умовах. Деконволюція та алгоритми супер роздільної здатності сприяють підвищенню просторової роздільної здатності та контрастності, що є критично важливим для ідентифікації об'єктів. Також розглянуто використання сучасних підходів машинного навчання для класифікації, аналізу та очищення даних.

Загалом, застосування цих алгоритмів забезпечує всебічний підхід до аналізу поляризаційних характеристик сцени, дозволяючи отримувати детальніші зображення, зменшувати вплив шуму і створювати високоякісні візуалізації. Це відкриває нові можливості для використання поляриметричних тепловізорів у військових, промислових і наукових цілях, забезпечуючи надійність та ефективність навіть у найскладніших умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЄКТУ ВИКОРИСТАННЯ

ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

5.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкта

У попередніх розділах було розглянуто принципи функціонування та переваги поляриметричних тепловізорів. Запропоновано їхню модернізацію шляхом інтеграції автоматизованої системи обробки поляризаційних даних і передачі зображень у реальному часі. У цьому розділі детально аналізується стартап-проєкт, основна мета якого — створення інноваційної системи спостереження, що поєднує тепловізійні та поляриметричні можливості для широкого спектра застосувань.[55]

Основна концепція стартапу — розробка та впровадження портативного поляриметричного тепловізора, здатного виявляти малопомітні об'єкти в складних умовах, таких як дим, пил, низький контраст або маскування. Така система дозволить здійснювати точне розпізнавання текстур, матеріалів і напрямку випромінювання на відстані до 500 м. Камера підтримує дистанційне керування та передавання даних через захищені канали зв'язку, що робить її ідеальною для військових, безпекових і промислових задач.

Особливості стартапу

Інноваційність: Використання поляриметричних алгоритмів для підвищення контрастності та точності виявлення.

Мобільність: Компактний розмір і вага дозволяють використовувати пристрій у польових умовах.

Автоматизація: Система підтримує автоматичний аналіз зображень та передавання результатів у реальному часі.

У таблиці 5.1 наведено детальну концепцію і потенційні ринки для цієї технології:

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проєкту

| Зміст ідеї | Напрямки застосування | Вигоди для користувача |
|---|--|---|
| <p>Портативний поляриметричний тепловізор із функцією дистанційної передачі даних, призначений для точного виявлення малопомітних об'єктів і аналізу їхніх характеристик за складних умов</p> | <p>Військовий сектор: Виявлення замаскованих цілей, аналіз текстур і матеріалів у зоні конфліктів</p> | <p>Висока точність виявлення цілей у складних умовах, таких як маскування, дим або низький контраст</p> |
| | <p>Промисловість: Моніторинг матеріалів і об'єктів на виробництвах, аналіз структурних дефектів</p> | <p>Оперативний контроль якості матеріалів і виявлення аномалій у реальному часі</p> |
| | <p>Екологічний моніторинг: Аналіз поверхонь і забруднень, моніторинг природних аномалій</p> | <p>Виявлення забруднень і ризиків у природному середовищі, навіть за обмеженої видимості</p> |
| | <p>Рятувальні служби: Пошук постраждалих і моніторинг зон лиха</p> | <p>Ефективний пошук постраждалих у складних умовах, таких як дим, пил чи погана освітленість</p> |

Таким чином, пропонується інноваційне рішення у сфері спостереження та аналізу, яке використовує передові поляриметричні тепловізійні технології для забезпечення високоточного виявлення об'єктів за будь-яких умов. Пристрій створений з урахуванням потреб військових завдань, проте його багатофункціональність дозволяє ефективно використовувати його також у промисловості, рятувальних операціях та екологічному моніторингу.

Основною перевагою є здатність аналізувати текстури, матеріали та характеристики об'єктів навіть у складних середовищах, таких як дим, пил або низький контраст. Поляриметричний тепловізор дозволяє проводити детальний моніторинг, що значно покращує ефективність роботи операторів у різних сферах, від охоронних систем до гуманітарних і дослідницьких місій.

У таблиці 5.2 представлено аналіз сильних, слабких та нейтральних характеристик проектної ідеї в порівнянні з аналогічними пропозиціями конкурентів. Це дозволяє визначити унікальні переваги проекту, а також аспекти, які потребують вдосконалення.[56]

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

| № п / п | Техніко-економічні характеристики ідеї | Мій проект | FLIR Systems X8580 | Polaris Pyxis SWIR | DIPOLE | W (слабка сторона) | N (нейтральна сторона) | S (сильна сторона) |
|---------|--|------------|--------------------|--------------------|--------|--------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | Поляриметричний аналіз | + | + | + | + | | | + |
| 2 | Якість тепловізійного зображення | Висока | Висока | Висока | Висока | | | + |

| | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---------|---------|---------|--------|---|--|---|
| 3 | Дистанційне керування | + | + | + | + | | | + |
| 4 | Захищений канал передачі даних | + | + | + | + | | | + |
| 5 | Компактність | Середня | Середня | Середня | Висока | | | + |
| | Час автономної роботи | 12 год | 10 год | 8 год | 12 год | | | + |
| | Вартість | Середня | Висока | Середня | Висока | + | | |

Висновок: Сильними сторонами запропонованого поляриметричного тепловізора є можливість детального аналізу об'єктів завдяки інтеграції поляриметричних технологій, висока якість тепловізійного зображення з роздільною здатністю 640×512 пікселів, а також наявність захищеної системи дистанційного керування та передачі даних. Ці характеристики дозволяють отримувати точні результати навіть у складних умовах, таких як маскування чи низький контраст. Крім того, тривалий час автономної роботи робить пристрій ефективним для тривалих спостережень у польових умовах.

Слабкою стороною є висока вартість продукту, що пов'язано з використанням передових компонентів і складністю виробництва. Однак, зважаючи на унікальні функціональні можливості, такі як аналіз поляризаційних характеристик і точність у складних умовах, продукт залишається

конкурентоспроможним на ринку спеціалізованого обладнання для спостереження, де висока якість і точність є критичними для користувачів у різних сферах

5.2 Аналіз ринкових можливостей та потенційних клієнтів

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проєкту

| № п/п | Ідея проєкту | Технології її реалізації | Наявність технологій | Доступність технологій |
|-------|---|---|----------------------|------------------------|
| 1 | Розробка автоматизованого поляриметричного тепловізора | Поляриметрична технологія для тепловізійних систем | Наявна | Доступна |
| | | Інтеграція поляризаційних фільтрів у тепловізійні камери | Наявна | Доступна |
| | | Система автоматизованого огляду та дистанційного керування | Наявна | Доступна |
| 2 | Розробка нових ефективних алгоритмів обробки поляриметричних зображень | Алгоритми для аналізу поляризаційних характеристик об'єктів | Наявна | Доступна |
| | | Алгоритми для покращення якості зображення в | Наявна | Доступна |

| | | | | |
|--|--|--|--------|----------|
| | | умовах низького контрасту | | |
| | | Алгоритми для автоматизованого виявлення аномалій і дефектів | Наявна | Доступна |

Пояснення:

Розробка автоматизованого поляриметричного тепловізора: Це проєкт, орієнтований на створення інноваційної системи, яка використовує поляризаційні фільтри для точного виявлення об'єктів у складних умовах, таких як маскування чи низький контраст. Включає автоматизовану систему огляду та дистанційного керування, що забезпечує повний огляд без фізичної присутності оператора.

Розробка нових ефективних алгоритмів обробки поляриметричних зображень: Цей проєкт спрямований на створення програмних алгоритмів для покращення якості зображень та підвищення точності виявлення об'єктів за допомогою поляриметричних даних. Алгоритми можуть включати покращення контрастності, виявлення дефектів і аномалій у складних умовах.

Ці технології вже мають значну наукову підтримку, і багато з них є доступними для впровадження завдяки розвитку поляриметрії, сенсорних технологій та алгоритмів комп'ютерного зору. [56] [55]

Результати аналізу свідчать про технологічну здійсненність проєкту, оскільки всі необхідні компоненти та технології, зокрема поляриметричні та тепловізійні системи, доступні для впровадження. Особлива увага приділяється інтеграції поляриметричних сенсорів і автоматизованих систем обробки даних, що дозволить створити ефективне і безпечне рішення для точного спостереження в складних умовах.

Наступним етапом є проведення аналізу ринкового потенціалу, оцінка попиту на поляриметричні тепловізори і вивчення конкурентного середовища, що дозволить визначити перспективи розвитку цього продукту на ринку

високотехнологічного обладнання для спостереження. [56]

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| № п/п | Показники стану ринку | Характеристика |
|-------|---|--|
| 1 | Кількість основних учасників ринку | 3-4 |
| 2 | Загальний обсяг продажів на одиницю продукції | 600 000 у.о. |
| 3 | Динаміка розвитку ринку | Ринок демонструє швидке зростання внаслідок підвищеного попиту на високоточні системи |
| 4 | Перешкоди для виходу на ринок | Висока вартість стартових інвестицій, необхідність отримання сертифікацій для військових застосувань |
| 5 | Вимоги до сертифікації та стандартизації | Необхідність відповідати стандартам для військових технологій, сертифікація за стандартами НАТО |
| 6 | Середній рівень рентабельності в галузі | 80% |

Аналіз ринкового середовища показує значний потенціал для реалізації проекту поляриметричного тепловізора. Хоча на ринку вже присутні кілька великих гравців, попит на високотехнологічні системи спостереження швидко зростає, зокрема через посилення військових та безпекових потреб. Високий рівень рентабельності галузі (80%) свідчить про привабливість цього ринку, незважаючи на високі початкові витрати та складний процес сертифікації, необхідний для відповідності військовим стандартам. [55]

Основними бар'єрами для входу на ринок є вимоги до сертифікації відповідно до міжнародних стандартів та специфікацій для військових

технологій. Водночас унікальні технічні рішення та зростаючий попит на поляриметричні тепловізори створюють сприятливі умови для успішної реалізації та масштабування проекту. Рішення, що поєднує точне виявлення об'єктів у складних умовах, є конкурентоспроможним і відповідає актуальним потребам в безпеці та моніторингу.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Далі проводимо визначення потенційних груп споживачів, їхніх характеристик та формуємо попередній перелік вимог до продукту для кожної з груп (табл. 5.5).

Таблиця 5.5. Потенційні групи клієнтів і вимоги до поляриметричного тепловізора

| № п/п | Потреба, що формує ринок | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку) | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару |
|--------------|--|---|---|---|
| 1 | Виявлення замаскованих об'єктів та моніторинг у складних умовах з використанням поляриметрії | Військові підрозділи, розвідувальні органи, спеціальні сили | Потрібна висока точність виявлення в умовах маскування та низького контрасту; потреба в інтеграції з іншими | Висока якість зображення; висока точність виявлення; інтеграція з іншими системами; здатність працювати в складних умовах |

| | | | | |
|---|---|--|--|---|
| | | | військовими системами | |
| 2 | Технічний моніторинг об'єктів у промислових і екологічних умовах з використанням поляриметрії | Промисловість, екологічні організації, наукові дослідження | Потріб на висока точність для виявлення дефектів та аномалій на поверхнях, виявлення забруднень, спостереження за природними процесами | Висока чутливість до малих змін у зображенні; здатність працювати в складних природних умовах; надійність у польових умовах |
| 3 | Пошук постраждалих в аварійних ситуаціях або в районах природних катастроф | Рятувальні служби, організації цивільного захисту | Потріб на мобільність і автономність для роботи в обмежених або небезпечних умовах; висока надійність у критичних ситуаціях | Компактність; мобільність; довготривала автономна робота; висока точність виявлення в складних умовах |

Розроблена система поляриметричного тепловізора призначена для безпечного спостереження за об'єктами в умовах будь-якої освітленості, з можливістю дистанційної передачі даних, і має великий потенціал для використання в таких сферах, як військова промисловість та сухопутні війська. Завдяки високому рівню конфіденційності переданої інформації та здатності функціонувати в складних бойових умовах, вона є ефективним інструментом для виконання різноманітних військових завдань. [56] [55]

Для глибшого розуміння ситуації на ринку, важливо оцінити фактори загроз та можливостей, що можуть вплинути на розвиток цього проєкту. На основі цієї оцінки буде сформовано орієнтовний перелік, що виведе ключові аспекти, на які потрібно звертати увагу. Дані наведено в таблицях 5.6 та 5.7.

Таблиця 5.6. Фактори загроз

| № п/п | Фактор | Зміст загрози | Можлива реакція компанії |
|--------------|-----------------------------|---|--|
| 1 | Технологічні ризики | Швидкий темп розвитку поляриметричних технологій та систем обробки даних | Інвестування в дослідження та розробки нових поляриметричних технологій, оновлення програмного забезпечення для оптимізації роботи системи |
| 2 | Зміни вимог користувачів | Збільшення потреби в адаптації до нових умов використання в різних сферах | Впровадження нових функцій, розробка спеціалізованих модифікацій для різних умов експлуатації |
| 3 | Безпека та конфіденційність | Ризик перехоплення даних при передачі між системами | Впровадження високозахисних систем шифрування, створення захищених каналів |

| | | | |
|---|----------------------|--|---|
| | | | передачі даних |
| 4 | Технічні неполадки | Проблеми з поляриметричними сенсорами та системами передачі даних | Регулярне технічне обслуговування, впровадження автоматичних систем діагностики та попередження поломок |
| 5 | Механічні ушкодження | Пошкодження при транспортуванні або в умовах жорсткої експлуатації | Розробка ударостійкого корпусу, використання матеріалів з підвищеною міцністю |

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

| № п/п | Фактор | Зміст можливості | Можлива реакція компанії |
|--------------|-----------------------|--|---|
| 1 | Технологічні переваги | Використання передових поляриметричних та тепловізійних технологій | Розробка інноваційних рішень, інтеграція нових алгоритмів обробки зображень та систем з підвищеною чутливістю |
| 2 | Зростання попиту | Підвищений попит на точні системи спостереження в умовах низького контрасту | Розширення виробництва, створення нових модифікацій для різних сфер застосування |
| 3 | Системна інтеграція | Можливість інтеграції з іншими військовими, охоронними та промисловими системами | Розробка універсальних інтерфейсів для підключення та інтеграції з іншими технологіями |
| 4 | Глобальний | Збільшення вимог | Вихід на |

| | | | |
|--|----------|---|---|
| | розвиток | до систем спостереження для різних галузей | міжнародний ринок, розвиток стратегічних партнерств, маркетингові кампанії для глобального впровадження |
|--|----------|---|---|

Наступним етапом є детальний аналіз конкурентного середовища, мета якого — вивчення ринкової конкуренції для оцінки позицій учасників ринку та впливу їхньої продукції на загальну ситуацію. Підсумки цього аналізу наведено в таблиці 5.8 [55]

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку поляриметричних тепловізорів

| Особливості конкурентного середовища | В чому проявляється дана характеристика | Вплив на діяльність підприємства |
|---|--|--|
| Тип конкуренції: монополістична | Наявність кількох великих виробників поляриметричних тепловізорів | Забезпечення високої якості продукту та постійне вдосконалення технологій |
| За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний | Присутність закордонних компаній, що виробляють аналогічні системи | Забезпечення конкурентоспроможності на міжнародному ринку, вихід на нові ринки |
| За галузевою ознакою: внутрішньогалузева | Конкуренція в межах оборонної, промислової та охоронної сфер | Спеціалізація на розробці рішень для військових і спеціалізованих застосувань |
| Конкуренція за видами товарів: | Конкуренція між різними типами | Підкреслення унікальності поляриметричних |

| | | |
|---|---|---|
| товарно-видова | систем спостереження, включаючи тепловізійні, оптичні, радарні системи | тепловізійних технологій |
| За характером конкурентних переваг: цінова | Високі витрати на розробку та виробництво зумовлюють високу ціну продукту | Оптимізація виробничих процесів для зниження вартості та підвищення ефективності |
| За інтенсивністю: марочна | Репутація виробника, важливість бренду на ринку | Створення сильної брендової ідентичності і довіри в галузі поляриметричних технологій |

Після проведеного аналізу конкуренції, буде здійснено більш детальне вивчення умов конкуренції в галузі за моделлю М. Портера. Результати цього аналізу представлені в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі | Потенційні конкуренти | Постачальники | Клієнти | Товари-замінники |
|-------------------------|---|--|---|--|---|
| Опис | Виробники поляриметричних тепловізорів, оптичних систем | Нові компанії з передовими поляриметричними технологіями | Постачальники оптичних сенсорів, поляризаційних | Військові підрозділи, охоронні компанії, рятувальні служби | Традиційні тепловізори, оптичні прилади |

| | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|--|---|
| | | | фільтрів | | без поляризації |
| Висновки | Середня інтенсивність конкуренції | Високі бар'єри для входу на ринок | Високий вплив постачальників на вартість компонентів | Високі вимоги до якості та функціональності продукту | Обмежена замінність, висока специфікація продукту |

Після завершення аналізу конкурентного середовища необхідно детально розглянути чинники, що впливають на здатність поляриметричного тепловізора успішно конкурувати на ринку та забезпечувати стабільний попит серед споживачів. До таких факторів належать технічні характеристики, функціональність, надійність і зручність у використанні. Результати цього аналізу представлені в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування |
|-------|-------------------------------|--|
| 1 | Якість зображення | Використання сучасних поляриметричних сенсорів та інноваційних оптичних технологій |
| 2 | Надійність передачі даних | Захищені канали зв'язку для передачі зображень і стійкість до зовнішніх перешкод |
| 3 | Автономність роботи | Тривалий час роботи від акумулятора для забезпечення польових операцій |
| 4 | Захищеність | Стійкість пристрою до механічних пошкоджень, зовнішніх впливів і |

| | | |
|---|------------------|--|
| | | кіберзагроз |
| 5 | Функціональність | Можливість аналізу поляризаційних властивостей об'єктів, дистанційне керування |

З аналізу таблиці 5.10 можна зробити висновок, що поляриметричний тепловізор відповідає високим стандартам якості завдяки використанню передових поляриметричних технологій і сучасних оптичних систем. Висока надійність передачі даних, тривалий час автономної роботи та стійкість до зовнішніх впливів роблять його ефективним і конкурентоспроможним рішенням для військових і спеціалізованих завдань. [56] [55]

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Бали (1-20) | Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з проектом |
|-------|-------------------------------|-------------|---|
| 1 | Якість зображення | 19 | -2 |
| 2 | Надійність передачі даних | 18 | -3 |
| 3 | Автономність роботи | 17 | -2 |
| 4 | Захищеність | 19 | -1 |
| 5 | Функціональність | 18 | -2 |

Завершальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу. Ця матриця дозволяє визначити сильні (Strengths) і слабкі (Weaknesses) сторони проекту, а також оцінити потенційні загрози (Threats) і можливості (Opportunities) для успішного виходу на ринок.

Таблиця 5.12. SWOT-аналіз поляриметричного тепловізора

| Категорія | Пункти аналізу |
|-----------------------------------|--|
| Сильні сторони (Strengths) | <ul style="list-style-type: none"> - Висока точність аналізу завдяки поляриметричним технологіям - Інтеграція поляризаційного та тепловізійного аналізу - Захищена система передачі даних - Можливість роботи в складних умовах (дим, пил, низький контраст) |

| | |
|------------------------------------|--|
| Слабкі сторони (Weaknesses) | <ul style="list-style-type: none"> - Висока вартість компонентів - Залежність від постачальників поляризаційних фільтрів і сенсорів - Необхідність регулярного обслуговування для підтримки стабільної роботи |
| Можливості (Opportunities) | <ul style="list-style-type: none"> - Зростання попиту на високоточні системи спостереження - Розширення функціоналу (автоматизація, інтеграція з іншими системами) - Вихід на міжнародний ринок - Підвищення інтересу до поляриметричних технологій у сферах безпеки та екології |
| Загрози (Threats) | <ul style="list-style-type: none"> - Поява нових конкурентів з інноваційними рішеннями - Зміна потреб користувачів - Технологічні ризики (поява нових стандартів) - Економічна нестабільність, яка може вплинути на інвестиції та попит |

SWOT-аналіз показує, що поляриметричний тепловізор має значні переваги завдяки своїм технологічним характеристикам і широким можливостям для адаптації до ринкових умов. Основні ризики пов'язані з вартістю компонентів, залежністю від постачальників та змінними умовами ринку. На основі цих даних можна сформулювати альтернативні стратегії, спрямовані

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження поляриметричного тепловізора

| № п/п | Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки | Ймовірність отримання ресурсів | Строки реалізації |
|--------------|---|---------------------------------------|--------------------------|
| 1 | Стратегія лідерства на ринку високоточних поляриметричних систем | Висока | 14 місяців |
| 2 | Стратегія розширення функціоналу пристрою та впровадження модифікацій | Середня | 12 місяців |
| 3 | Стратегія виходу на міжнародний | Низька | 24 місяців |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | ринок із залученням стратегічних партнерів | | |
|--|--|--|--|

Серед запропонованих альтернатив оптимальним вибором є стратегія лідерства на ринку високоточних поляриметричних систем. Ця стратегія має найвищу ймовірність отримання ресурсів і найкраще відповідає поточним умовам ринку, враховуючи високий попит на подібні технології в оборонній та спеціалізованій сфері.

5.4 Розроблення ринкової моделі проекту

Процес розробки ринкової стратегії розпочинається з визначення стратегій охоплення ринку, що передбачає ідентифікацію цільових груп потенційних споживачів. Деталізована інформація про ці групи представлена в таблиці 5.14.

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів для поляриметричного тепловізора

| № п/п | 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 |
|--------------|---|--|--|---|---------------------------------|
| 1 | Сухопутні війська ЗСУ | Висока | Високий | Середня | Середня |
| 2 | Підрозділи спеціального призначення | Висока | Високий | Висока | Середня |
| 3 | Прикордонна служба | Висока | Середній | Низька | Висока |
| 4 | Розвідувальні підрозділи | Висока | Високий | Висока | Середня |

| | | | | | |
|--------------------------------------|--|---------|----------|--------|--------|
| 5 | Промислові компанії для екологічного моніторингу | Середня | Середній | Низька | Висока |
| Які цільові групи обрано: 1, 2, 3, 4 | | | | | |

За результатами аналізу потенційних груп споживачів було визначено чотири основні цільові групи, що належать до силових структур. Ключовими критеріями вибору стали високий рівень готовності до впровадження інноваційного продукту та значний попит на такі системи спостереження. Приватні охоронні компанії отримали менший пріоритет через обмежений попит та специфічність застосування тепловізора.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно розробити стратегію розвитку, що відповідає потребам кожної цільової групи та максимізує ефективність використання продукту.

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку поляриметричного тепловізора

| № п/п | Обрана альтернатива розвитку проєкту | Стратегія охоплення ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи | Базова стратегія розвитку |
|-------|---|---------------------------|---|---------------------------|
| 1 | Розробка поляриметричного тепловізора з передовими технологіями та унікальними характеристиками | Стратегія спеціалізації | <ul style="list-style-type: none"> - Інноваційність поляриметричних технологій - Висока якість зображення - Автоматизація керування - Захищена передача даних | Стратегія диференціації |

Обрана стратегія диференціації передбачає створення поляриметричного тепловізора з унікальними технічними характеристиками, що відповідають специфічним вимогам військових підрозділів та інших спеціалізованих сфер. Ключовими факторами успіху є інноваційність поляриметричних технологій і висока якість виконання продукту, що забезпечує його конкурентоспроможність на ринку. [56] [55]

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки, яка визначить подальший напрямок розвитку та забезпечить ефективну позицію на ринку високотехнологічних спостережних систем (табл. 5.16).

Таблиця 5.16. 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 характеристик и товару конкурента? | Стратегія конкурентної поведінки |
|--------------|---|---|---|--|
| 1 | Ні | Комбінована стратегія | Ні, розробка власних інноваційних рішень | Стратегія спеціалізованог о послідовника |

Враховуючи вимоги споживачів у обраних сегментах, а також обрані стратегії розвитку та конкурентної поведінки, була розроблена стратегія позиціонування поляриметричного тепловізора. Вона базується на забезпеченні високої якості продукту, інноваційних технологіях та здатності задовольнити специфічні потреби цільових груп, зокрема військових підрозділів і охоронних служб. Результати цієї стратегії представлені в таблиці 5.17.

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування поляриметричного тепловізора

| № п/п | Вимоги до товару цільової аудиторії | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту | Вибір асоціацій |
|-------|---|---------------------------|---|--|
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> - Висока якість зображення - Надійність роботи - Захищений канал передачі даних - Автоматизоване керування - Простота використання | Стратегія диференціації | <ul style="list-style-type: none"> - Інноваційні поляриметричні технології - Висока якість виконання - Відповідність військовим стандартам - Технічна підтримка | <ul style="list-style-type: none"> - Надійність - Інновації - Безпека - Професіоналі з |

Розроблена ринкова стратегія враховує специфіку застосування поляриметричного тепловізора в умовах військових операцій та особливості продукту. Основний акцент зроблено на забезпеченні високої якості та надійності пристрою, що є критично важливими для цільових груп, таких як військові підрозділи та спеціальні служби. Стратегія диференціації дозволить створити унікальну пропозицію на ринку, орієнтуючись на специфічні вимоги клієнтів, а фокус на військовому сегменті забезпечить глибоке розуміння потреб користувачів та точну відповідність їхнім вимогам. [56]

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим етапом розробки маркетингової програми є створення концепції товару, яку споживач отримає в результаті покупки. У таблиці 5.18 підсумовуються результати аналізу конкурентоспроможності цього товару.

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції поляриметричного тепловізора

| № п/п | Потреба | Вигода, яку пропонує товар | Ключові переваги перед конкурентами |
|----------|--|--|--|
| 1 | Безпечне спостереження за об'єктами в денний та нічний час | Забезпечення цілодобового спостереження через поляриметричний тепловізор з можливістю дистанційної передачі відеоінформації. Висока мобільність і компактність. | <ul style="list-style-type: none"> - Інноваційне поляриметричне керування - Висока якість зображення в складних умовах - Дистанційне керування і передача даних - Панорамний огляд 360° - Захищені канали передачі інформації |

На основі ключових переваг поляриметричного тепловізора можна стверджувати, що він є чудовою основою для розробки маркетингової програми стартап-проекту. Основні переваги пристрою включають автоматизоване керування, що забезпечує високу ефективність спостереження і зручність використання. Висока якість тепловізійного зображення гарантує отримання чіткої і деталізованої інформації за будь-яких умов освітлення. Крім того, цифрова обробка зображення значно розширює функціональність приладу, роблячи його гнучким та адаптованим до різних ситуацій. [56] [55]

Наступним етапом є розробка трирівневої маркетингової моделі продукту, яка дозволить більш детально окреслити стратегії просування та позиціонування на ринку, враховуючи особливості кожного сегмента споживачів (табл. 5.19).

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі поляриметричного тепловізора

| Рівні товару | Сутність та складові |
|--|--|
| I. Товар за задумом | Поляриметричний тепловізор з можливістю дистанційної передачі відеоінформації для безпечного спостереження в денний і нічний час з розширеними можливостями по виявленню і аналізу об'єктів. |
| II. Товар у реальному виконанні | <p style="text-align: center;">Властивості/характеристики</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Якість поляриметричного зображення: Висока чіткість та деталізація у складних умовах. 2. Швидкість обробки та передачі даних: Швидке передавання відеоінформації на відстань. 3. Надійність системи: Стійкість до зовнішніх впливів, механічних пошкоджень та кіберзагроз. 4. Дальність виявлення цілей: Велика дальність для виявлення малопомітних об'єктів. 5. Кут огляду 360°: Панорамний огляд для повного контролю. 6. Захищеність каналу передачі: Захищені канали зв'язку для забезпечення конфіденційності. <p>Якість: відповідність військовим стандартам і ISO.</p> <p>Пакування: Протиударний кейс для транспортування.</p> <p>Марка: «PolarVision».</p> |
| III. Товар із підкріпленням | <p>До продажу: Навчання персоналу, проведення тестування в польових умовах.</p> <p>Після продажу: Технічна підтримка 24/7, гарантійне обслуговування протягом 2 років.</p> <p>Захист товару: Патентування технології, реєстрація торгової марки.</p> |

Після визначення трьох рівнів моделі поляриметричного тепловізора

можна встановити орієнтовні цінові межі для цього продукту, а також провести аналіз рівня доходів цільових груп споживачів. Це допоможе правильно оцінити, яка ціна буде конкурентоспроможною та доступною для потенційних покупців, враховуючи їхні фінансові можливості і потреби. Результати цього аналізу будуть наведені в таблиці 5.20.

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни для поляриметричного тепловізора

| № п/п | Рівень цін на товари-замінники | Рівень цін на товари-аналоги | Рівень доходів цільової групи споживачів | Верхня та нижня межі встановлення ціни |
|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| 1 | 40000-850000 грн | 200000-550000 грн | Військове фінансування | 50000-150000 грн |

При встановленні ціни на поляриметричний тепловізор важливо враховувати цінову політику конкурентів, а також фінансові можливості потенційних клієнтів. Ціновий діапазон від 50 000 до 150 000 гривень був визначений з метою забезпечення конкурентоспроможності на ринку, враховуючи бюджетні обмеження цільових груп, зокрема військових і охоронних структур.

Наступним етапом є визначення оптимальної системи збуту, що передбачає вибір найефективнішої стратегії продажу і каналу дистрибуції для максимізації охоплення цільових споживачів (табл. 5.21).

Таблиця 5.21. Формування системи збуту поляриметричного тепловізора

| № п/п | Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів | Функції збуту | Глибина каналу збуту | Оптимальна система збуту |
|--------------|--|---|-----------------------------|---|
| 1 | Закупівля через тендерні процедури та | - Проведення випробувань, технічна підтримка, | Нульового рівня | Прямі продажі через власних представників |

| | | | | |
|--|-------------------|---|--|--|
| | державні програми | навчання персоналу, гарантійне обслуговування | | |
|--|-------------------|---|--|--|

Для збуту обрано прямиий канал, що передбачає доставку кожного поляриметричного тепловізора від виробника безпосередньо кінцевим споживачам. Такий підхід включає не лише доставку товару, але й встановлення контакту з клієнтом, налаштування приладу та надання постійної підтримки протягом усього періоду експлуатації. Прямий канал дає можливість здійснювати повний контроль над усіма етапами — від виробництва до сервісного обслуговування — і забезпечує високий рівень сервісу для кінцевих користувачів.

Останнім етапом маркетингової програми є розробка концепції маркетингових комунікацій, що забезпечить ефективне інформування цільових споживачів про продукт та його переваги (табл. 5.22).

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій поляриметричного тепловізора

| № п/п | Специфіка поведінки цільових клієнтів | Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти | Ключові позиції, обрані для позиціонування | Концепція рекламного звернення |
|--------------|---|---|--|---|
| 1 | Потреба в безпечному огляді навколишнього простору з укриття в будь-яку пору доби | Прямий контакт, спеціалізовані виставки, технічні конференції | Якість, точність, ефективність роботи, надійність, адаптація до екстремальних умов | Демонстрація можливостей тепловізора через випробування, що показують всі функції та переваги системи |

Розроблений поляриметричний тепловізор надає унікальні можливості для ефективного спостереження за навколишнім середовищем в будь-який час доби, гарантуючи високий рівень безпеки. Компанія зосереджує свої зусилля на встановленні прямого контакту з потенційними клієнтами, активно беручи участь у форумах, технічних конференціях та виставках, що сприяє обміну інформацією та підвищує зацікавленість до продукту. Позиціонування продукту базується на таких перевагах, як висока якість зображення, точність виявлення, ефективність роботи, надійність та здатність адаптуватися до складних умов. Завдяки гарантованій ефективності та надійності, цей прилад стає ідеальним вибором для військових та спеціалізованих операцій. Компанія планує продемонструвати всі переваги системи під час тестових заходів, де буде показано її функціональність та високу якість. [56] [55]

5.5 Організація реалізації стартап-проєкту

Під час розробки концепції маркетингових комунікацій для поляриметричного тепловізора з автоматичним управлінням було визначено, що основними пріоритетами для цільової аудиторії є висока чутливість системи, надійність у складних умовах та можливість точної обробки поляриметричних зображень у реальному часі. Для забезпечення ефективного інформування клієнтів особлива увага приділяється таким каналам комунікації, як участь у спеціалізованих виставках, проведення польових демонстрацій та співпраця з галузевими експертами.

Для досягнення цілей проєкту важливо акцентувати увагу на конкурентних перевагах поляриметричного тепловізора: інноваційність технології, висока якість зображення, автоматизація процесів і зручність інтеграції в існуючі системи військового та цивільного спостереження. Ці аспекти будуть основою для створення довіри до продукту і залучення ключових клієнтів, таких як військові підрозділи, прикордонні служби та спеціальні підрозділи безпеки.

Таблиця:5.23 Команда стартап-проєкту

| Учасник | Посада | Завдання, що необхідно виконати |
|---------|--------|---------------------------------|
|---------|--------|---------------------------------|

| команди | | |
|---|------------------------------------|--|
| Інженер-оптик | Керівник розробки оптичної системи | Розробка конструкції оптичної частини поляриметричного тепловізора. Компонування елементів оптики. |
| Інженер-електронщик | Головний спеціаліст з електроніки | Розробка схеми підключення електронних компонентів. Інтеграція сервоприводу з системою управління. |
| Програміст-розробник | Головний програміст | Створення програмного забезпечення для обробки поляриметричних даних. Тестування алгоритмів. |
| Фахівець із калібрування | Інженер калібрування | Налаштування сенсорів та системи автоматизації. Випробування в лабораторних умовах. |
| Менеджер проекту | Керівник проекту | Координація робіт команди. Контроль дотримання строків та бюджету. |
| Маркетолог | Менеджер з продажів | Аналіз ринку, формування стратегії продажів, презентація продукту на галузевих заходах. |
| Спеціаліст з технічної підтримки | Менеджер підтримки клієнтів | Забезпечення навчання клієнтів. Супровід під час інтеграції обладнання. |

Ця структура команди забезпечує ефективну реалізацію всіх етапів стартап-проекту, від розробки до впровадження та підтримки продукту на ринку.

Таблиця 5.24 Календарний план реалізації стартап-проєкту

| № | Зміст етапу | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Собівартість реалізації |
|------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|-------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Дослідження ринку та аналіз вимог | | | | | | | | | | | | | 0 |
| 2 | Розробка концепції поляриметричного тепловізора | | | | | | | | | | | | | 500\$ |
| 3 | Формування технічного завдання | | | | | | | | | | | | | 700\$ |
| 4 | Розробка оптичної системи та електронної частини | | | | | | | | | | | | | 1500\$ |
| 5 | Розробка програмного забезпечення | | | | | | | | | | | | | 2000\$ |
| 6 | Тестування та виправлення недоліків | | | | | | | | | | | | | 400\$ |
| | Пошук інвесторів та фінансування | | | | | | | | | | | | | 1200\$ |
| | Організація виробництва | | | | | | | | | | | | | 25000\$ |
| | Проведення маркетингової кампанії та продажі | | | | | | | | | | | | | 5000\$ |
| Сума | | | | | | | | | | | | | | 36 300\$ |

На основі розробленого календарного плану, загальна вартість реалізації проєкту поляриметричного тепловізора з автоматичною обробкою даних оцінюється приблизно у 36 300 доларів США. Ця сума охоплює всі основні етапи, включаючи аналіз ринку, розробку концепції, технічного завдання,

створення оптичної системи, розробку програмного забезпечення, тестування, пошук інвестицій, запуск виробництва та проведення маркетингової кампанії.

Для залучення інвестицій доцільно використовувати спеціалізовані заходи, такі як виставки військової техніки та інноваційних технологій. Під час презентацій особливий акцент слід зробити на конкурентних перевагах тепловізора, таких як висока чутливість, точність поляриметричних вимірювань і здатність працювати в екстремальних умовах. Також варто розглянути можливість залучення фінансування через краудфандингові платформи, як-от Kickstarter чи Indiegogo, які можуть стати ефективними інструментами для розширення фінансової бази. [56]

Додатково, необхідно підготувати деталізовану таблицю витрат, яка включатиме всі матеріали та компоненти, необхідні для виготовлення пристрою. Такий підхід дозволить ефективніше планувати використання ресурсів, підвищити прозорість фінансової структури проекту та сприятиме довірі з боку потенційних інвесторів.

Витрати на виробництво

| № п/п | Витрати | Тип | Терміни постачання/виконання | Вартість, \$ |
|-------|--|------|------------------------------|--------------|
| 1 | Камера EVIDIR Alpha | ---- | 20 днів | 7000 |
| 5 | Дюралюміній Д16 або аналог | --- | 3 днів | 500 |
| 6 | сервопривід Dynamixel XC Series або аналог | --- | 10 днів | 150 |
| 7 | Поляриметрична пластина WP-H-K-34-50M або аналог | --- | 25 днів | 8000 |
| | Фазова пластинка PO-TWP-L4-25-FIR | --- | 25 днів | 7000 |
| 8 | Підписки на ПЗ | --- | 1 днів | 50 |
| 9 | Розхідні матеріали | ---- | 5 днів | 50 |
| Сума | | | | 19750 |

Для початку виробництва поляриметричного тепловізора з автоматичною обробкою даних на першому етапі необхідно 19 750 доларів. Витрати включають

ключові компоненти, такі як камера EVIDIR Alpha, поляриметрична пластина WP-H-K-34-50M, сервопривід Dynamixel XC Series, дюралюміній для корпусу, а також фазову пластинку PO-TWP-L4-25-FIR. Крім того, враховано витрати на підписки на програмне забезпечення та розхідні матеріали.

Цей бюджет дозволяє забезпечити закупівлю основних компонентів для виготовлення прототипу, проведення калібрування та тестування, а також підготовку до наступних етапів виробництва та реалізації продукту.

5.6 Розроблення бізнес-моделі стартап-проєкту

Бізнес-модель є важливим елементом планування та реалізації стартапу для поляриметричного тепловізора. Вона охоплює детальний план, що описує механізми створення, доставки та отримання цінності для компанії. Коректно розроблена бізнес-модель дозволяє оцінити потенційний прибуток, а також визначити життєздатність і інвестиційну привабливість проєкту, зокрема в умовах високого попиту на спеціалізоване обладнання для оборонного сектору.

Для створення бізнес-моделі поляриметричного тепловізора була обрана концепція Canvas, розроблена О. Остервальдером та І. Пінье, яка включає дев'ять ключових блоків. Ось основні структурні елементи бізнес-моделі:

Ключові партнери:

Виробники поляриметричних сенсорів та тепловізійних матриць

Постачальники оптичних елементів для інфрачервоного діапазону

Виробники охолоджуючих систем для тепловізійних сенсорів

Постачальники електронних компонентів

Науково-дослідні інститути з досвідом у галузі тепловізійних та поляриметричних технологій

Сертифікаційні органи

Логістичні компанії для доставки та складування

Ключові види діяльності:

Розробка та виробництво поляриметричних тепловізорів

Калібрування і налаштування систем

Інтеграція систем передачі даних

Розробка програмного забезпечення для обробки поляриметричних зображень

Тестування приладів в різних умовах

Сертифікація військових систем

Навчання персоналу для роботи з тепловізійним обладнанням

Ціннісна пропозиція:

Спостереження за об'єктами в будь-який час доби з високою чіткістю

Виявлення об'єктів за їх тепловим випромінюванням

Можливість безпечного огляду з укриття

Дистанційна передача зображень

Панорамний огляд з автоматичним скануванням

Висока чутливість та роздільна здатність зображення

Захист від виявлення противником

Можливість збереження та аналізу отриманих зображень

Відносини з клієнтами:

Спеціалізована технічна підтримка 24/7

Навчання персоналу роботі з обладнанням

Регулярне калібрування та обслуговування систем

Оновлення програмного забезпечення

Модернізація існуючих систем

Консультації щодо оптимального використання обладнання

Сегменти користувачів:

Розвідувальні підрозділи ЗСУ

Підрозділи спеціального призначення

Прикордонна служба

Підрозділи територіальної оборони

Спеціальні служби

Охоронні структури стратегічних об'єктів

Канали збуту:

Державні закупівлі через систему Prozorro

Прямі контракти з силовими структурами

Співпраця з волонтерськими організаціями

Участь у військових виставках

Демонстрації та польові випробування

Спеціалізовані тендери

Структура витрат:

Закупівля компонентів (сенсори, матриці, оптика)

Розробка та виробництво оптичних систем

Створення програмного забезпечення для обробки зображень

Витрати на калібрування та тестування приладів

Сертифікація продукції для військових стандартів

Навчання персоналу

Маркетингові заходи

Логістика та зберігання

Джерела доходів:

Продаж поляриметричних тепловізорів

Сервісне обслуговування та калібрування приладів

Модернізація існуючих систем

Розробка спеціальних модифікацій для конкретних умов

Навчальні програми для персоналу

Технічні консультації

Продаж запасних частин

Ця бізнес-модель дозволяє ефективно спланувати запуск і розвиток стартапу, враховуючи всі важливі елементи для успішного виходу на ринок поляриметричних тепловізорів.

Таблиця 5.24. Бізнес-модель стартап-проекту "Поляриметричний тепловізор"

| Ключові партнери | Ключові види діяльності | Ціннісні пропозиції | Відносини з клієнтами | Сегменти користувачів | Канали збуту | Структура витрат | Джерела доходів |
|------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------------|-----------------|
|------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------------|-----------------|

| и | сті | ція | ами | увачів | | т | |
|---|--|--|--|--|---|---|--|
| - Виробни ки полярим етрични х сенсорів та тепловіз ійних матриць | - Розробк а та виробни цтво полярим етрични х тепловіз орів | - Спостер еження в будь- який час добы з високим рівнем чіткості | - Спеціа лізован а технічн а підтри мка 24/7 | - Розвід увальн і підроз діли ЗСУ | - Держав ні закупів лі через систему Prozorr o | - Закупі вля компо нентів і сенсор ів | - Продаж полярим етрични х тепловіз орів |
| - Постача льники оптични х елементі в для ІЧ- діапазон у | - Калібру вання та налашту вання тепловіз ійних систем | - Виявлен ня об'єктів за теплови м випромі нювання м | - Навчан ня роботі з теплові зійним обладн анням | - Підроз діли спеціа льного призна чення | - Прямі контрак ти з силови ми структу рами | - Розро бка та вироб ництв о оптич них систем | - Сервісне обслуго ввання та калібрув ання |
| - Постача льники електро нних компоне нтів | - Інтеграц ія систем передачі даних | - Безпечне спостере ження з укриття | - Регуля рне калібру вання та обслуго вуванн | - Прико рдонна служба | - Співпра ця з волонте рським и організ аціями | - Створ ення програ мног забезп ечення для | - Модерні зація існуючи х систем |

| | | | | | | | |
|--|---|---|--------------------------------------|-------------------------------------|--|---|------------------------------------|
| | | | я | | | обробки зображень | |
| - Науково-дослідний інститут і з досвідом у галузі тепловізіонних технологій | - Розробка програмного забезпечення для обробки зображень | - Дистанційна передача теплових зображень | - Оновлення програмного забезпечення | - Підрозділи територіальної оборони | - Участь у військових виставках | - Витрати на калібрування, тестування та сертифікацію | - Розробка спеціальних модифікацій |
| - Сертифікаційні центри | - Тестування в різних умовах експлуатації | - Панорамний огляд з автоматичним скануванням | - Модернізація існуючих систем | - Спеціальні служби | - Демонстрації та польові випробування | - Сертифікація продукції | - Навчальні програми |
| - Логістичні компанії | - Сертифікація продукції | - Висока чутливість і роздільна | - Технічні консультації | - Охоронні структури | - Спеціалізовані тендери | - Логістика та зберігання | - Технічні консультації |

| | | | | | | | |
|--|--|---|--|--------------------------|--|--|-----------------------------------|
| | | здатність зображення | | стратегічних об'єктів | | | |
| | | - Захист від виявлення противником | | | | | - Продаж запасних частин |

Розроблена бізнес-модель для поляриметричного тепловізора враховує особливості застосування цього обладнання у військовому середовищі та специфіку ринку оборонних технологій. Основна увага приділяється забезпеченню високої якості зображення та надійності в складних польових умовах. Модель передбачає можливість швидкого масштабування виробництва у разі зростання попиту, що є важливим фактором у поточних умовах військових конфліктів.

Ключовим елементом бізнес-моделі є фокус на довгострокових партнерських відносинах із клієнтами, що включають комплексні послуги, такі як калібрування, обслуговування та модернізація поляриметричних тепловізорів. Це забезпечує стабільний дохід і дозволяє постійно вдосконалювати продукт на основі реального досвіду його використання в бойових умовах.

Запропонована бізнес-модель має високий потенціал для успішної реалізації проєкту та стабільного розвитку на ринку військової техніки, забезпечуючи високу конкурентоспроможність у довгостроковій перспективі.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

У процесі розробки стартап-проєкту «Поляриметричний тепловізор» був проведений комплексний аналіз ринкових можливостей та перспектив комерціалізації продукту. Результати дослідження дозволяють зробити наступні

ВИСНОВКИ:

Аналіз ринкових можливостей показав значну потребу в поляриметричних тепловізорах, зокрема для військових та безпекових організацій, особливо в умовах сучасних військових конфліктів. Система спостереження, що поєднує поляриметрію та тепловізію, є важливим елементом для ефективного виявлення противника в складних умовах освітлення.

Дослідження потенційних груп клієнтів підтвердило наявність чітко визначених сегментів споживачів, зокрема розвідувальні підрозділи, спеціальні служби та прикордонна служба, які потребують високотехнологічного обладнання для спостереження та виявлення об'єктів у складних умовах.

SWOT-аналіз проєкту виявив ключові конкурентні переваги поляриметричного тепловізора: високий рівень чутливості, здатність до роботи в різних умовах освітлення, висока якість зображення, можливість дистанційної передачі даних, панорамний огляд, та надійність у польових умовах.

Аналіз конкуренції показав, що інноваційне поєднання тепловізійних та поляриметричних технологій дає конкурентну перевагу на ринку, де висока чутливість та здатність адаптуватися до специфічних бойових умов є важливими факторами успіху.

Розроблена бізнес-модель демонструє життєздатність проєкту, завдяки наявним зв'язкам з постачальниками сенсорів та оптики, оптимізованій структурі витрат, а також ефективним каналам збуту через державні закупівлі та прямі контракти з військовими структурами.

Маркетингова програма передбачає активну участь у виставках, польових випробуваннях, а також співпрацю з волонтерськими організаціями, що дозволить забезпечити високу видимість продукту на ринку.

Фінансово-економічний аналіз підтвердив високу рентабельність виробництва, потенціал для швидкої окупності та можливості для масштабування в умовах зростаючого попиту на технології спостереження.

Організаційна структура проєкту передбачає належний контроль за виробництвом, забезпеченням якості, технічним супроводом та оперативним

сервісним обслуговуванням для забезпечення безперебійної роботи продукту.

Таким чином, аналіз підтверджує, що стартап-проект «Поляриметричний тепловізор» має високі шанси на успішну реалізацію на ринку військової техніки. Унікальні технологічні характеристики, такі як поєднання поляриметрії та тепловізії, а також поточні потреби ЗСУ у висококласних системах спостереження, забезпечують проекту перспективи для подальшого розвитку і впровадження на ринку.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було розроблено та вдосконалено концепцію поляриметричного тепловізора, що базується на інтеграції поляризаційних характеристик з тепловими зображеннями для покращення ефективності виявлення та розпізнавання об'єктів. Важливими етапами дослідження стали аналіз існуючих рішень у галузі поляриметричних тепловізорів, вибір оптимальних компонентів для поляриметричного блоку, а також розробка алгоритмів обробки зображень для підвищення точності та ефективності виявлення.

У процесі роботи було здійснено огляд сучасних методів обробки поляриметричних зображень, що дозволило виявити значний потенціал для вдосконалення існуючих технологій. Зокрема, були розроблені алгоритми для обробки та аналізу поляризаційних характеристик, що підвищують контрастність та дозволяють досягти кращих результатів при роботі в умовах низької контрастності сцени. Також було визначено важливість інтеграції поляризаційних елементів, таких як поляризатори та фазові пластини, для досягнення високої ефективності роботи поляриметричного тепловізора.

Однією з основних результатів дослідження є розробка методів, які дозволяють ефективно використовувати поляризаційні характеристики для підвищення ймовірності виявлення об'єктів, а також зниження впливу шуму на якість зображень. Ці методи можуть бути успішно застосовані не тільки в тепловізійних системах, але й в інших сферах, де необхідно забезпечити точне розпізнавання об'єктів у складних умовах.

Робота має важливе значення для розвитку поляриметричних тепловізійних систем та алгоритмів обробки зображень у сфері оптико-електронних систем. Її результати можуть бути застосовані в різних галузях, включаючи військові, промислові та наукові дослідження, де необхідно забезпечити точне і швидке виявлення об'єктів у складних умовах спостереження.

Таким чином, проведене дослідження вносить вагомий вклад у

вдосконалення поляриметричних тепловізорів та відкриває нові можливості для їх застосування у практичних задачах, де важлива висока точність виявлення та розпізнавання об'єктів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колобродов, Н. Шустер. Инфракрасная термография часть 1. 5-24
2. BIESZCZAD, Grzegorz; GÖGLER, Sławomir; ŚWIDERSKI, Jacek. Review of design and signal processing of polarimetric imaging cameras. Opto-Electronics Review, 2021, 29.
3. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS2021342578A1>
4. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS11385104B2>
5. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://techlinkcenter.org/technologies/facial-recognition-via-thermal-imaging-enables-wider-use-of-image-database/c0b24f7d-f8a2-4c01-9b02-81c9ec42f9f9>
6. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS2021342578A1>
7. [Електронний ресурс] Режим доступу: US Patent for Combined multi-spectral and polarization sensor Patent (Patent # 12,018,983 issued June 25, 2024) - Justia Patents Search
8. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS12018983B2>
- 9 [Електронний ресурс] Режим доступу:
https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US95576892&_cid=P10-M49PIL-66904-1
10. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS12018983B2>
11. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://lazarsci.com/project/polartronic-v/>
12. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS10775298B1>

13. [Электронный ресурс] Режим доступа: [US Patent for Polarimeter Patent \(Patent # 5,005,977 issued April 9, 1991\) - Justia Patents Search](#)
14. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS5005977A>
15. [Электронный ресурс] Режим доступа: [Pyxis - Polaris Sensor Technologies, Inc..](#)
16. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://navystp.com/vtm/open_file?type=brochure&id=N68335-18-C-0049
17. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.gophotonics.com/whitepapers/details/1222-pyxis-enhanced-thermal-imaging-with-a-division-of-focal-plane-polarimeter>
18. [Электронный ресурс] Режим доступа: [DSS 2014: Polarized imager shows intruders in a new light; 'eTherm' from Polaris Sensor Technologies improves contrast of thermal imaging | www.inknowvation.com](#)
19. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://inside.oceanologyinternational.com/2020/09/13/polarized-thermal-hybrid-cameras-for-improved-detection-of-oil-spills/>
20. J. E. Solomon. Polarization imaging, May 1981, pp. 1537-1544
21. Дипломна робота «Оптико-електронна система поляриметричного тепловізора Голик В.О КПІ 2023
22. TYDEX. ИЧ-поляризатори. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/IR_polarizers.pdf(дата звернення 12.01.2024)
23. В.Г. Колобродов, Н. Шустер. Инфракрасная термография часть 2. 71-142
24. WALDMAN, Gary. Introduction to light: The physics of light, vision, and color. Courier Corporation, 2002
25. CHANDRASEKHAR, Subrahmanyan. Radiative transfer. Courier Corporation, 2013.
26. EMERY, W.; CAMPS, A. Basic Electromagnetic Concepts and Applications

to Optical Sensors. In: Introduction to Satellite Remote Sensing. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2017. p. 43-83

27. Поляризація світла. Закон Малюса. URL: http://www.slipukhina.in.ua/wpcontent/uploads/labs_zoshyt/labs2/lab11/index.html (дата звернення 15.01.2024).

28. [Електронне видання] / Лебедь О. О., Гаращенко В. І., Гульчук В. А., Мислінчук В. О. – Рівне : НУВГП, 2020. – 49 с. с. 16

29. Introduction to Compensators and Retardation Plates. URL: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/polarized/compensators/> (дата звернення 18.01.2024).

30. Використаний малюнок. URL: https://studfile.net/html/2706/757/html_dG7bUAtAIIt.dsML/img-8isaav.png (дата звернення 18.01.2024).

31. BHARTI, Manisha; CHATTOPADHYAY, Diptangshu. Simulative analysis of manchester coded DPSK FSO in diverse weather conditions. International Journal of Information Technology, 2021, 13.6: 2237-2243.

32. БРИГІНЕЦЬ, Валентин Петрович, et al. Фізика 2. Розділ Оптика. 2017.

33. ZHAO, Yongqiang; PAN, Quan; ZHANG, Hongcai. Material classification based on multiband polarimetric images fusion. In: Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VII. SPIE, 2006. p. 58-65.

34. [Електронний ресурс] Режим доступу: PanthIR <https://www.excelitas.com/product/panthir-medium-range-hd-ready-uncooled-lwir-camera>

35. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.globalsat.tech/OASYS.UTCxii.html>

36. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.trijicon.com/discontinued-products/details/irco-35>

37. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://viperimaging.com/product/opgal-eyecgasmulti/>

38. [Електронний ресурс] Режим доступу:

<https://heathus.com/product/eyecgas-multi/>

39 <https://promsystem.com.ua/product/opgal-eyecgas-2-0-teplovizor-dlya-vyyavlennya-vytokiv-gazu/>

40 [EVIDIR alpha thermal imaging cameras and infrared modules | Jenoptik](#)

41 [EVIDIR alpha infrared camera modules: thermal imaging and thermography for system integration](#)

42 [EVIDIR® - Sierra-Olympia Tech.](#)

43. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.robotis.us/xc/>

44 [Електронний ресурс] Режим доступу:<https://hitecrd.com/hs-7955tg-high-torque-titanium-gear-coreless-ultra-premium-servo/>

45. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://www.maxongroup.com/maxon/view/https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/488607product/488607>

46. [Електронний ресурс] Режим доступу:<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=WP50H-Z>

47.[Електронний ресурс] Режим доступу:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1118&pn=WP25H-Z

48. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://www.alphalas.com/products/polarization-optics/tunable-waveplates.html>

49. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/4d6bca8e-8ee3-4f86-9a40-b3a13edd9365/content>

50. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Poincaresp.png>

51. [Електронний ресурс] Режим доступу:http://kirkmcd.princeton.edu/e166/pol%20papers/mcmaster_rmp_33_8_61.pdf

52. Крутиус А.Р., студент гр. ПО-31мп, д.т.н., проф. Колобродов В.Г..КПІ ім. Ігоря Сікорського 2024 **Аналіз економічної ефективності використання**

оптикоелектронних систем на базі поляриметричних тепловізорів

53. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://ar5iv.org/html/2411.09924>

54. [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://arxiv.org/pdf/2204.08714v2>

55. Гавриш, О. А., Бояринова К. О., Копішинська К. О. Розробка стартап-проектів. Конспект лекцій : навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 2,88 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 188 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/29447>

56. Гавриш, О. А., Бояринова К. О., Копішинська К. О. Розробка стартап-проектів: практикум: навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 2,11 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 116 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/29450>



PanthIR

Long Wave Infrared (LWIR) Uncooled Continuous Zoom Camera

PanthIR uncooled thermal camera has been future proofed by design, being optimised for both 17 μ m and 12 μ m focal plane arrays including HD formats. The ruggedised camera uses a proven zoom mechanism to provide up to 10x continuous optical zoom allowing eyes on tracking of targets at all times.

Key Features

- Optimised for 12 μ m Focal Plane Arrays
- x10 Continuous Zoom
- HD Ready*
- Long range performance—MBT Detection @ 14.5 km
- Automatic Athermalisation

Applications

- Fixed Position Border Surveillance
- Remote Weapon Stations
- Vehicle Mounted Surveillance
- Anti-UAS platforms



Lens Parameters

| | |
|-------------------|-------------------------|
| Focal Length | 19mm WFOV 190mm NFOV |
| Zoom Ratio | x10 |
| F Number | F/1.3 |
| Close Focus Range | 5 metres |
| Optical Coating | Hard Carbon |

Field of View

| | | HFOV (°) |
|---------------------|------|----------|
| 640 x 480 12µm | NFOV | 2.3° |
| | WFOV | 22.9° |
| 640 x 480 17µm | NFOV | 3.3° |
| | WFOV | 32.0° |
| 1024 x 768 12µm | NFOV | 3.7° |
| | WFOV | 35.8° |
| 1280 x 1024 12µm | NFOV | 4.6° |
| | WFOV | 44.0° |

Sensor Parameters

| | |
|---------------|-----------------|
| Spectral Band | 7.5 - 14µm |
| Resolution | Various options |
| Pixel Pitch | 17µm or 12µm |
| NETD | <80mK* |

* Core dependent

Power Requirements

| | |
|-----------------------|--------------|
| Power Source | MIL-STD-1275 |
| Power Range | 16-50V |
| Power at Steady State | < 5W |

For technical information contact us at:

Phone: +44 (0) 1745 588000
sales@uk.qloptiq.com
www.excelltas.com

We reserve the right to alter, without notice, the specification of our products in the brochure

Features & Capabilities

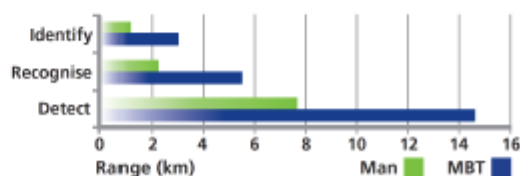
- White Hot / Black Hot
- Electronic Zoom
- Non-uniformity correction
- Automatic athermalisation

Electronic Formats

Video Outputs NTSC or PAL;

Communications RS 232/422/485

Range Performance (for 12µm sensor)



Mechanical Interface

| | |
|---|--------------------|
| Weight | <5kg |
| Size | 164mm dia. x 275mm |
| Custom mounting interfaces available on request | |

Environmental Specifications

| | |
|-----------------------|----------------|
| Operating Temperature | -46°C to +70°C |
| Storage Temperature | -51°C to +71°C |
| Vibration | MIL-STD-810G |
| Mechanical Shock | MIL-STD-810G |
| Solar Radiation | MIL-STD-810G |
| Sealing | IP67 |

Trijicon[®] UTC[™]x/ UTC[™]xii

UNIVERSAL THERMAL CLIP-ON

UNPARALLELED PERFORMANCE AT AN UNRIVALED SIZE

The Trijicon[®] UTC[™]x/UTC[™]xii sight is a high-performance, universal, thermal clip-on designed to pair with existing weapon sights. The Trijicon[®] UTC[™]x/UTC[™]xii complements existing day sight systems between 1x and 10x magnification and is optimal for surveillance and long-range applications.

COMPATIBLE WITH 1X–10X DAY SCOPES

Clip the Trijicon[®] UTC[™]x/UTC[™]xii on in front of existing day optics up to 10x magnification without needing to re-zero or re-train.

BUILT TO SURVIVE

Designed, constructed, and tested to MIL-STD-810G.

USER-FRIENDLY

Intuitive user interface that is consistent across all Trijicon[®] OASYS products minimizes training requirements.



Trijicon[®] UTC[™]xii



Compatible with magnified optics up to 10x magnification.



Trijicon® UTC™ x/ UTC™ xii Product Specifications:

| | UTC™ x | UTC™ xii | |
|---|---|--|------------------|
| WEIGHT AND DIMENSIONS | Color | | |
| | Black | | |
| | Weight (without batteries) | 26 oz (0.74kg) | 20.5 oz (0.58kg) |
| | Length | 6.8 in (173mm) | 6.25 in. (158mm) |
| | Width | 3.3 in (84mm) | 3.25 in. (82mm) |
| | Height | 3.3 in (84mm) | 3.10 in. (79mm) |
| IMAGING CHARACTERISTICS | IR camera | | |
| | Pixel pitch | 17 μ m | 12 μ m |
| | Sensor | Uncooled microbolometer | |
| | Wavelength | 8-12 μ m | |
| | Pixel format | 640 x 480 array | |
| | Refresh rate | 30/60Hz | |
| | NE δ T | < 50mK at F/1 | |
| | Range (NVTherm model) | 80% probability (60Hz), 0.75m ² size target | |
| | Detect | 2650m | |
| | Display | | |
| | Color | Monochrome | |
| | Size | 640 x 480 | |
| | Optical magnification | 1X | |
| | Digital magnification | 0.5X and 2X | |
| | Field of view | 7.5° diagonal (6° horizontal x 4.5° vertical) | |
| | Optical co-use | Unity to 10X+ | |
| | Eye relief distance | 50mm | |
| Optical focus | Manual | | |
| Diopter adjust | | | |
| Diopter adjustment | None set to 800 meters | | |
| POWER | Power source | (1) or (2) CR 123 (3V system) | |
| | Power up | 3 seconds | |
| | Battery operating life @25°C | 2.25 hr (1 battery) 5.5 hours (2 batteries) | |
| ENVIRONMENT | Operating temp | -25°F (-32°C) to 122°F (50 °C) | |
| | Storage temp | -40°F (-40°C) to 160°F (71 °C) | |
| | Immersion | Tested at 66 ft for 2 hrs | |
| | Climatic zones | Hot, basic | |
| COMPASS | Digital magnetic compass | Yes | |
| IMAGE STORAGE | Capability | 100 snapshots | |
| | Image format | 8-bit uncompressed raw binary file | |
| WEAPON MOUNT/ ACCURACY INFORMATION | Weapon mount format | M1913 Milspec | |
| | Weapon mount | LaRue modified LT648 | |
| | Aim point | 1 MOA | |
| | Eyepiece centerline height (from top of rail) | 1.310 in. | |



Trijicon® UTC™ x



Trijicon® UTC™ xii

© 2019 Trijicon, Inc. | P.O. Box 930059 | 49385 Shafer Avenue | Wixom, Michigan | 48393-0059 USA
703-445-1600 | info@trijicon.com | www.TrijiconOASYS.com | PML4068 Rev(0)1218

**EXPORT
WARNING**

Export of the commodities described herein is strictly prohibited without a valid export license issued by the U.S. Department of State, Directorate of Defense Trade Controls as proscribed in the International Traffic in Arms Regulations (ITAR), Title 22 Code of Federal Regulation, Parts 120-130.

ДОДАТОК 3



DRAGON-S12

Uncooled Thermal Imager In-line Thermal Weapon Sight

DRAGON-S12 is the new In-line Thermal Sight, part of the latest development in thermal imaging technology from Excelitas. Providing snipers with 24hr surveillance and target engagement capability.

DRAGON-S12 utilizes a state of the art 640x480 format 12 μ m, 60Hz uncooled thermal sensor coupled with a near silent shutter, delivering class leading sensitivity and uniformity.

DRAGON-S12 is part of the DRAGON family of uncooled thermal products from Excelitas that utilizes the latest in uncooled thermal camera, electronics and optical technologies to deliver world leading performance and reliability.

DRAGON-S12 attaches to Picatinny and NATO accessory rails in front of the day sight via a quick release throw lever, providing 24hr capability without the need to remove or re-zero the day sight.

DRAGON-S12 thermal sight is designed specifically to meet target and surveillance requirements for military customers and law enforcement agencies providing high performance within a lightweight compact and rugged military qualified design.

DRAGON-S12 delivers a capability to detect, recognise and identify man and vehicle targets 24hours a day, in poor visibility, in total darkness and through battlefield obscuration.



DRAGON-S12

Uncooled Thermal Imager In-line Thermal Weapon Sight

Main features

| |
|---|
| Thermal Imager: Sensor: 640x480, 12µm, 60 Hz VOx (Near silent shutter) Horizontal Field Of View: 5.3° Focus Range: 25m to ∞ Diamond Like Carbon (DLC) Anti-Reflection optical coating |
| Display Type: OLED, full color, 1280 x 1024 |
| Magnification: x1 |
| Controls and Functionality: Modes: Off / TI / Edge, Color, Menu Functionality: Brightness, Polarity, NUC, Digital Zoom |
| I/O Port: RS232 Comms, External Power, Video Out, USB2 |
| Power: 3 x 1.5v AA Cells Polarity Protection >7hrs continuous operation |
| Nominal dimensions: 191mm (L) x 88mm (W) x 103mm (H) |
| Weight: 850g - Excludes: Lens cap, light security shroud, 3 x AA Lithium Cells |
| Finish: Various paint options available |

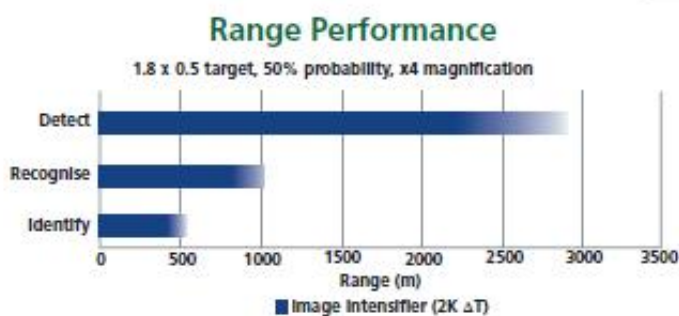
Environmental

| |
|---|
| DEF Stan 00-35 Part 3 (Environmental) Temperature (Operating) Temperature (Storage) Thermal Shock Solar Radiation Shock – Drop Test (Sight Alone, Field Pouch and Logistical) Shock – Vibration (Fixed Wing Propeller, Rotary Wing, Tracked and Wheeled Vehicle) Low Air Pressure and Transportation Chemical and Biological (Resistance and Decontamination) Dust and Sand (Wind Blown) Water Immersion (20m) Driving Rain Mist, Fog and Low Cloud Salt Atmosphere Mould Growth |
| DEF Stan 08-41 Part 1/1 (Chemical and Biological) Chemical and Biological Hardening Decontamination – In Service decontaminants |
| DEF Stan 59-411 Part 3 (Electro-Magnetic Effects) Electro Magnetic Compatibility – Emissions and Susceptibility |



Package

| |
|---|
| Standard: DRAGON-S12 Weapon Sight Lens Cap and Light Secure Shroud Transportation Case and Field Pouch Operators Manual Lens Cleaning Kit |
| Options: Multi-Function Remote Control |



For technical information contact:

Qioptiq Limited
 sales@uk.qioptiq.com
 phone +44 (0)1745 588000
 www.qioptiq.com



Trijicon REAP-IR[®]

Mini Thermal Rifle Scope



The REAP-IR[®] mini thermal rifle scope is a small, rugged, and powerful thermal rifle scope that lets you engage targets in any light. The heart of the system is a state-of-the-art 640x480, 12 micron thermal image sensor that provides superior image quality in any lighting condition. Redesigned electronic hardware and a new digital thumbstick improve system response and enables the use of external USB power sources and digital video recorders. It's engineered to last and built in the USA.

> Superior Image Quality

- 640x480 resolution - 4 times as many pixels as competing 320 systems
- 12 micron pixel pitch - smaller footprint than 17 micron systems
- 60 Hz Frame rate - Improved clarity for moving images
- New manual focus adjustment (60mm only)

> Improved Controls

- Improved digital thumbstick provides faster system response
- New USB-C port allows the use of external power sources

> Legendary Trijicon Durability

- Designed, constructed and tested to MIL-STD-810G
- Made in the USA

— The Science of Brilliant[®] —

At Trijicon, we are bound by a commitment to industry-leading research, design, and testing to seek innovative aiming solutions that constantly redefine "brilliant." That's why Trijicon products are subjected to the below testing methods.



Alaska-to-Africa Tested | Immersion Tested | Solid Zero Tested
Vibration Tested | Drop Tested

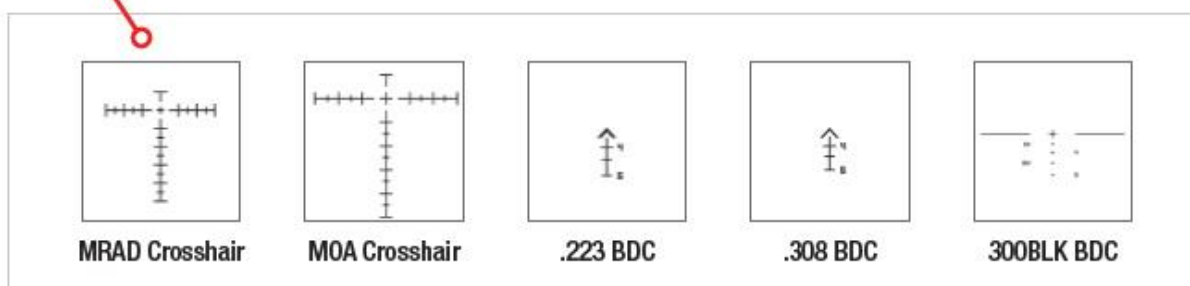
Visit [Trijicon.com/Science](https://www.trijicon.com/Science) to learn more.

Features and Benefits

- A** **Faster System Control**
New and improved digital thumbstick provides improved system response
- B** **Expanded Functionality**
New USB-C connector allows the use of external battery packs and download of analog and digital video with available adapter with compatible DVRs
- C** **Premium Image Quality**
New manual focus adjustment (60mm only) for improved image quality at all distances
- D** **Vertical Battery Compartment Design**
This vertical design creates a slimmer look and is engineered for increased durability and solid battery connection
- E** **Mounting Versatility**
New quick release mount featuring Trijicon® Q-LOC™ Technology provides multiple mounting locations with the ability to affix the scope rapidly and reliably in the dark
- F** **Improved Reticle Choices**
User-selectable reticle choices include the classic crosshair, and new MRAD, MOA, .223 REM, .308 WIN, and 300BLK BDC



F



Specifications



| System | REAP-24-3 | REAP-35-3 | REAP-60-3 |
|-------------------------|--|--|--|
| Sensor Resolution | 640x480 | 640x480 | 640x480 |
| Sensor Micron | 12 μ m | 12 μ m | 12 μ m |
| Sensor Type | Vox Vanadium Oxide | Vox Vanadium Oxide | Vox Vanadium Oxide |
| Frame Rate | 60 Hz | 60 Hz | 60 Hz |
| Display Type | Digital OLED | Digital OLED | Digital OLED |
| Thermal Sensitivity | < 50 mK | < 50 mK | < 50 mK |
| Spectral Response | 8-12 μ m | 8-12 μ m | 8-12 μ m |
| Field of View | 18° | 12° | 7° |
| Eye Relief | 27mm | 27mm | 27mm |
| Diopter | -6 / +2 | -6 / +2 | -6 / +2 |
| Optical Magnification | 1.2x | 1.75x | 3x |
| Digital Zoom | 1-8x | 1-8x | 1-8x |
| Combined Magnification | 1.2-9.6x | 1.75-14x | 3-24x |
| Objective Lens | 24mm f/1.2 | 35mm f/1.2 | 60mm f/1.25 |
| Battery Pack | Top Loading / Vertical | Top Loading / Vertical | Top Loading / Vertical |
| Battery Type | (2) CR123 and/or External USB | (2) CR123 and/or External USB | (2) CR123 and/or External USB |
| Battery Life | Approx. 4 hrs using (2) CR123 | Approx. 4 hrs using (2) CR123 | Approx. 4 hrs using (2) CR123 |
| Environmental | -25.6°F (-32°C) to 122°F (50°C) Operating -59.8°F (-51°C) to 160°F (71°C) Storage | -25.6°F (-32°C) to 122°F (50°C) Operating -59.8°F (-51°C) to 160°F (71°C) Storage | -25.6°F (-32°C) to 122°F (50°C) Operating -59.8°F (-51°C) to 160°F (71°C) Storage |
| Submersion | 1m / 1 hr | 1m / 1 hr | 1m / 1 hr |
| Weight | 24.7 oz / 728g | 26.5 oz / 751g | 37.8 oz / 1071g |
| Dimensions** (LxWxH) | 8.4 in. x 3.1 in. x 2.9 in. (214.1mm x 79.3mm x 73.1mm) | 8.6 in. x 3.1 in. x 2.9 in. (220.4mm x 79.3mm x 73.1mm) | 9.7 in. x 3.1 in. x 2.9 in. (247.6mm x 79.3mm x 73.1mm) |
| User Interface | Joystick | Joystick | Joystick |
| Mounting Kit | Mini Picatinny Rail Mount | Mini Picatinny Rail Mount | Mini Picatinny Rail Mount |
| Easy Zero | Y | Y | Y |
| Image Capture | Y | Y | Y |
| MSRP | \$6,999 | \$7,999 | \$9,499 |

** length does not include flip caps, width does not include mount knob, height from top of rail

ДОДАТОК 4

THALES

In partnership with

thalesgroup.com**PRECISION AS SIMPLE AND ACCURATE AS BY DAY**

- For precision calibers: 12.7 mm / .50 and below
- A family with medium (9°) and long range (6°) versions
- Range and Field of view thanks to high resolution, 640 x 480 pixels
- Comfortable and natural shooting position
- Performance in compact packaging

**CECILE-TS****THERMAL WEAPON SIGHT**



CECILE-TS

Thermal Weapon Sight

OVERVIEW

Cecile-TS is a Thermal Weapon Sight for precision calibers, 12.7 mm / .50 and below, with the latest uncooled technology for leading edge night performance.

APPLICATIONS

Individual and crew-served weapons

FEATURES AND BENEFITS

- For precision calibers and heavy machine guns (12.7 mm / .50 and below), offering high shock resistance thanks to integrated dumpers and long range, accurate aiming
- A family with medium and long range versions
 - Version 9°, 2.7x (5.4x, 10.8x with e-zoom)
 - Version 6°, 4x (8x, 16x with e-zoom)
- Range and Field of view thanks to high resolution, 640 x 480 pixels
- Comfortable with long eye-relief (60mm) and low eye-piece position allowing natural shooting position
- Performance in compact packaging thanks to latest uncooled technology, 17 μm pitch

TECHNICAL CHARACTERISTICS

VERSIONS

Long range version

- Magnification: x4 (x8, x16 with e-zoom)
- Field of view: 6.2° (H) x 4.6° (V)

Medium range version

- Magnification: x2.7 (x5.4, x10.8 with e-zoom)
- Field of view: 9° (H) x 6.7° (V)

Spectral band

- LWIR (8-12 μm)

Batteries

- 4 AA batteries / rechargeable batteries (Lithium, Alkaline, Ni-MH)
- Easily replaceable battery pack
- 8-hour continuous battery life with standard lithium batteries

Mechanical interfaces

- NATO standard
- MIL-STD-1913 "Picatinny"

Command and Control

- Intuitive, 5-button interface
- Fast reticule control
- Analogue video output
- RS-232 serial link
- External power supply
- USB Link

Weight

- < 1.5 kg

Dimensions

- 389 mm (L) x 104 mm (H) x 74 mm (W)

Full MIL-SPEC

- MIL-STD-810G
- MIL-STD-461F

ACCESSORIES

- Transit case
- Tactical pouch
- Operator's manual
- Lens cleaning kit

ДОДАТОК 6



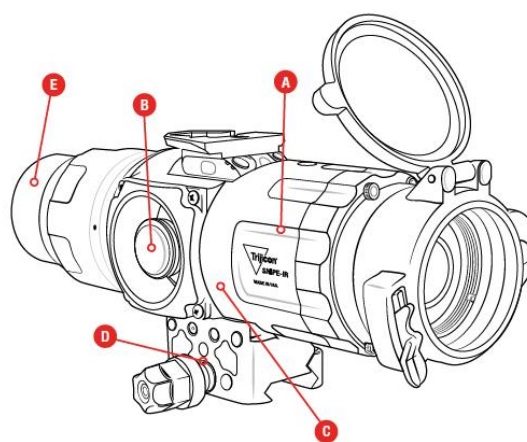
Trijicon
SNIPE-IR®

THE NEXT-GENERATION CLIP-ON SIGHT

The Trijicon SNIPE-IR® is designed to become one with your optical day sight, both on the battlefield and on the hunting field. It comes with a 640x480, 12-micron VOx sensor and OLED digital micro display that give you clear, brilliant imagery at a fast 60 Hz frame-rate system—even through pitch-black darkness. The Trijicon SNIPE-IR is optimized for use with a 4x day optic but will work with variable sights up to approximately 6x.

Features and Benefits

- A Outstanding Image Quality**
The state-of-the-art 640x480, 12 micron, 60 Hz thermal core provides exceptional clarity in complete darkness.
- B Easy-to-Use**
The miniature thumbstick, simple menu system, and user configurable quick select menu enable quick zeroing and intuitive control.
- C Built to Endure**
The machined 6061 aluminum housing was designed and tested to MIL-STD-810G for years of worry-free use in the field.
- D DLOC Quick Release Mount**
This mount design retains zero and enables rapid transition from handheld observation to rifle mounted use.
- E Collimating Eyepiece for Clip-On Use**
Seamless integration with existing day optics.



Specifications



| | IRCO-35 |
|-------------------------|--|
| Sensor Type | Uncooled VOx (Vanadium Oxide) |
| Thermal Sensitivity | <50mk |
| Sensor Resolution | 640x480 Pixels |
| Sensor Pitch | 12 Micron |
| Frame Rate | 60 Hz with a 30 Hz Power Save Mode |
| Spectral Response | 8 – 12 Micron |
| Display Type | Digital OLED |
| Field of View | 12° Horizontal |
| System Modes | CLIP-ON / HYBRID / DEDICATED |
| Basic Features | E-Zoom, Polarity |
| Advanced Features | NO-SHOT ZERO Image Capture DFC – Digital Focus Control |
| Start-Up Time | Approx. 5 Seconds |
| Video Output | Analog RS-170 (with Optional Cable) |
| Battery Type | (2) CR123 Lithium |
| Battery Life | 3.5 Hours @ 60 Hz |
| Weapon Mount | Mini D-LOC Mount – Standard Model |
| Day Sight Compatibility | 1x up to 4x Fixed Sights 1–4x and 1–6x Variable Sights 2.5–10x up to 4–12x Variable Sights |

| | IRCO-35 |
|------------------------|--|
| Weight | 24.6 oz. / 700g |
| Dimensions (L x W x H) | 7.4 x 2.95 x 3 in. |
| Exit Pupil | 30mm Clip-On |
| Environmental | -40c to +55c Operating -45c to +75c Storage |



MAGNIFIED

REFLEX

IRON SIGHTS

ELECTRO OPTICS

ARCHERY

ДОДАТОК 7



EVIDIR alpha infrared camera modules

Technical Specifications for OEM-Modules

| EVIDIR alpha infrared camera cores | |
|--|---|
| Detector Type | Uncooled microbolometer with 12 µm pixel pitch |
| Spectral range | LWIR 8 µm... 14 µm |
| Safe max detector load | Radiations corresponding to black body radiation of 1000°C |
| Dynamic range | 16 bit |
| Frame rate options | <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 9Hz (no export regulations) • 60Hz (30Hz on request) |
| Shutter Type | Mechanical shutter or long-term & stable shutterless |
| Image Data | <ul style="list-style-type: none"> • Corrected RAW 16 bit • Mono 8 bit • YCrCb 4:2:2 • YCrCb 4:4:4 • RGB 24 bit |
| Thermal sensitivity | ≤ 30mK (≤ 20mK under special conditions) Conditions for <30mK: <ul style="list-style-type: none"> • F number = f/1.0 • Tambient = 22°C • Tobject = 30°C • smooth level - smooth 9 |
| Electrical Data | |
| Supply voltage | 3.3 V DC |
| Power consumption | <ul style="list-style-type: none"> • Cameras with detector 320x240: ≤ 0.85W • Cameras with detector 640x480: ≤ 1.05W |
| Environmental Operation | |
| Ambient temperature | -40°C ... 70°C (Viewer) (to be verified) -25°C ... 60°C (Radiometer) (Depending on overall heat dissipation. Max. detector temperature must not be exceeded.) Lower or higher temperatures on request |
| Max detector temperature | +85°C Ensure forced cooling if required to limit detector temperature |
| Relative max. air humidity | 10 ... 95% without condensation |
| Transport/storage | |
| Ambient temperature | -40°C... +85°C |
| Relative max air humidity | 10 ... 95% without condensation |
| IP protection according to ISO 20553 | <ul style="list-style-type: none"> • Body, OEM camera core: No protection • Lens: Front side sealing to IP 67 Protected against ingress of dust protected in case of temporary immersion in water |
| EVIDIR alpha cameras as Viewer models | |
| Spatial resolution | OEM Core 320 Viewer: 320 x 240 pixels OEM Core 640 Viewer: 640 x 480 pixels |
| Visualization range | -40°C... +120°C, optional +600°C |

| | | | |
|--|---|--|-------------------------------------|
| Non-Uniformity Correction | <ul style="list-style-type: none"> Shutter based NUC with mechanical shutter (shutter NUC) Shutterless algorithms with object NUC (external action required) | | |
| Video interface | <ul style="list-style-type: none"> Parallel CMOS Serial CameraLink | | |
| Control interface | Serial UART, command line based | | |
| Dimensions, weight (body only) | | | |
| Camera with shutter | 30 x 30 x <20mm ³ (width x height x length, without lens) | | |
| Camera without shutter | Customer specific solution 30 x 30 x <20mm ³ (width x height x length, without lens) 25 x 25 x <20mm ³ (width x height x length, without lens) - on request | | |
| Weight | ≤ 30g (without lens) | | |
| Standard lens options (further lenses on request) | Camera: OEM Core 320 Viewer HFoV x VFoV 15.9° x 11.9° 30° x 23° 60° x 44° | Focal length 14.0mm 7.2mm 3.9mm | F-Number f/1.0 f/1.0 f/1.1 |
| | Camera: OEM Core 640 Viewer HFoV x VFoV 17.6° x 13.2° 31° x 24° 75° x 55° | Focal length 25.0mm 14mm 6.2mm | F-Number f/1.0 f/1.0 f/1.0 |
| EVIDIR alpha cameras as Radiometric models | | | |
| Spatial resolution | OEM Core 320 Radiometer: 320 x 240 pixels OEM Core 640 Radiometer: 640 x 480 pixels | | |
| Measurement range | -40°C... +120°C 0°C... +600°C | | |
| Measurement Accuracy | <ul style="list-style-type: none"> ± 5K or ± 5% (higher value is valid) (to be verified!) at temperatures: T_{ambient} = -15°C ... 35°C T_{object} = -40°C ... 600°C High accuracy range of measurement range 1 ± 3K (to be verified!) at temperatures: T_{ambient} = 5°C ... 35°C T_{object} = 0°C ... 120°C High accuracy range of measurement range 2 ± 3% (to be verified!) at temperatures: T_{ambient} = 5°C ... 35°C T_{object} = 120°C ... 600°C | | |
| Radiometric functions | Three output options: <ul style="list-style-type: none"> Camera generates temperature data of each pixel (16 Bit) Viewer image (8 bit B/W or 16/24 Bit false color) with temperature information (8 isotherms and 3 operator defined regions of interest ROI) Mixed mode - Viewer image (8 bit B/W) combined with additional output of radiometric data (16 bit) - on demand | | |
| Non-Uniformity Correction | <ul style="list-style-type: none"> Shutter based NUC with mechanical shutter (shutter NUC) | | |
| Video interface | <ul style="list-style-type: none"> Parallel CMOS Serial CameraLink | | |
| Control interface | Serial UART, command line based | | |
| Dimensions, weight (body only) | 30 x 30 x <20mm ³ (width x height x length, without lens) | | |
| Weight | ≤ 30g (without lens) | | |
| Standard lens options (further lenses on request) | Camera: OEM Core 320 Radiometer HFoV x VFoV 15.9° x 11.9° 30° x 23° 60° x 44° | Focal length 14.0mm 7.2mm 3.9mm | F-Number f/1.0 f/1.0 f/1.1 |
| | Camera: OEM Core 640 Viewer HFoV x VFoV 17.6° x 13.2° 31° x 24° 75° x 55° | Focal length 25.0mm 14mm 6.2mm | F-Number f/1.0 f/1.0 f/1.0 |

| Command Interface (CMD) | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---|----------------------------------|--|-------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------|--|----------------------------------|--------|---|--|
| General | | | | | | | | | | | | | |
| Purpose | Control of the camera | | | | | | | | | | | | |
| interface type | Serial UART interface | | | | | | | | | | | | |
| Interface parameters | | | | | | | | | | | | | |
| Default baud rate | 115.200 baud (adjustable via command interface) | | | | | | | | | | | | |
| Maximum baud rate | depending on the design of the customers backend | | | | | | | | | | | | |
| data bits | 8 | | | | | | | | | | | | |
| stop bits | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Parity | No parity | | | | | | | | | | | | |
| Operability | | | | | | | | | | | | | |
| Image Failures | In the factory setting, all defective pixels are replaced by data from neighboring non-defective pixels. The operability is determined by the number, position and groupings of defects. | | | | | | | | | | | | |
| Cluster definition | <p>A cluster is defined as a group of at least two dead pixels adjacent by side or corner. The clusters are defined by their size in term of dead pixels.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4C3 means 4 clusters of 3 dead pixels max • A 3x3 cluster refers to any grouping of defective pixels in which there is a defective pixel which does not have at least 1 adjacent neighbor which is non-defective <p>For example, a 3x3 neighborhood in which all pixels are defective is a 3x3 cluster since the center pixel does not have a non-defective neighbor adjacent to it. Furthermore, a defective pixel on the edge of the array for which all 3 adjacent neighbors are defective also constitutes a 3x3 cluster, as does a defective pixel in a corner of the array for which all 3 adjacent pixels are defective.</p> <p>The following table defines the requirements for operability.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sensor Size</th> <th>Total Defects</th> <th>Bad Columns/lines</th> <th>Defect Clusters</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>OVGA 320x240</td> <td>≤ 1,5%</td> <td>0</td> <td>Area 160x120: 4C3* Area 320x240: no 3x3 clusters*</td> </tr> <tr> <td>VGA 640x480</td> <td>≤ 1,5%</td> <td>0</td> <td>Area 160x120: 4C3* Area 640x480: no 3x3 clusters*</td> </tr> </tbody> </table> | Sensor Size | Total Defects | Bad Columns/lines | Defect Clusters | OVGA 320x240 | ≤ 1,5% | 0 | Area 160x120: 4C3* Area 320x240: no 3x3 clusters* | VGA 640x480 | ≤ 1,5% | 0 | Area 160x120: 4C3* Area 640x480: no 3x3 clusters* |
| Sensor Size | Total Defects | Bad Columns/lines | Defect Clusters | | | | | | | | | | |
| OVGA 320x240 | ≤ 1,5% | 0 | Area 160x120: 4C3* Area 320x240: no 3x3 clusters* | | | | | | | | | | |
| VGA 640x480 | ≤ 1,5% | 0 | Area 160x120: 4C3* Area 640x480: no 3x3 clusters* | | | | | | | | | | |
| Image disturbances (IMD) | <p>The uniformity of an image may not be present despite a homogeneous surface such as a uniformly heated wall. These deviations can have several reasons such as contamination or surface defects.</p> <p>These formation non-uniformities are perceived as deviations from the neighboring image environment as a disturbance.</p> <p>The allowed number of IMDs are shown in the following table. The central for OVGA sensor is defined as 160x120 pixels as well as for VGA sensor as 320x240 pixels.</p> <p>Type IMD 1: radius ≤ 10 pixels Type IMD 2: radius > 10 pixels</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sensor Size</th> <th>In Central</th> <th>Outside Central</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>OVGA 320x240</td> <td>≤ 1 Type IMD 1 0 Type IMD 2</td> <td>≤ 2 Type IMD 1 ≤ 1 Type IMD 2</td> </tr> <tr> <td>VGA 640x480</td> <td>≤ 1 Type IMD 1 0 Type IMD 2</td> <td>≤ 3 Type IMD 1 ≤ 2 Type IMD 2</td> </tr> </tbody> </table> | Sensor Size | In Central | Outside Central | OVGA 320x240 | ≤ 1 Type IMD 1 0 Type IMD 2 | ≤ 2 Type IMD 1 ≤ 1 Type IMD 2 | VGA 640x480 | ≤ 1 Type IMD 1 0 Type IMD 2 | ≤ 3 Type IMD 1 ≤ 2 Type IMD 2 | | | |
| Sensor Size | In Central | Outside Central | | | | | | | | | | | |
| OVGA 320x240 | ≤ 1 Type IMD 1 0 Type IMD 2 | ≤ 2 Type IMD 1 ≤ 1 Type IMD 2 | | | | | | | | | | | |
| VGA 640x480 | ≤ 1 Type IMD 1 0 Type IMD 2 | ≤ 3 Type IMD 1 ≤ 2 Type IMD 2 | | | | | | | | | | | |
| Mechanical test conditions | | | | | | | | | | | | | |
| Oscillations, noisy | <p>Test norm: DIN EN 60068-2-64, Tab. A8</p> <p>Excitation: wideband noise</p> <p>Frequency: 10 Hz - 2000 Hz</p> <p>Load: 10 Hz 100 Hz 4 (m/s²)²/Hz 79,7 m/s² rms</p> <p>Duration: 10 minutes per axis</p> <p>Axes: 3</p> <p>Operating mode: unpacked, active</p> | | | | | | | | | | | | |
| Oscillations, sinusoidal | <p>Test norm: DIN ISO 9022-(3)-36-06-2</p> <p>Stimulation: sinusoidal with floating frequency</p> <p>Frequency: 10 Hz - 2000 Hz 10 Hz (1 cycle)</p> <p>Load: 0.13 mm / 2 g</p> <p>Cycle rate: 1 oct/min</p> <p>Number of cycles: 10 per axis</p> <p>Axes: 3</p> <p>Operating mode: unpacked, active</p> | | | | | | | | | | | | |

| | | | |
|--------------------------------------|---|--|--|
| Continuous shock | Test norm: Stimulation: Load: Number of shocks: Operating mode: | DIN ISO 9022-(3)-31-05-1 semi-sinusoidal 30 g / 8 ms 1000 per direction Axes: 3 (Ø directions) unpecked, passive | |
| Climatic test conditions | The following test conditions are fulfilled | | |
| Cold, Passive | Test norm: Temperature: Duration: Operating mode: | DIN ISO 9022-10-08-1 -40°C 16 h unpecked, passive | |
| Cold Active | Test norm: Temperature: Duration: Operating mode: NUC Interval: | DIN ISO 9022-10-05-2 See "Environmental Operation" on page 1 16 h unpecked, active 2 sec. | |
| Dry heat passive | Test norm: Temperature: Duration: Operating mode: | DIN ISO 9022-11-05-1 +85°C 16 h unpecked, passive | |
| Dry heat, active | Test norm: Temperature: Duration: Operating mode: NUC Interval: | DIN ISO 9022-11-05-1 See "Environmental Operation" on page 1 16 h unpecked, active 2 sec. | |
| Constant humid heat | Test norm: Temperature: Humidity: Duration: Operating mode: | DIN ISO 9022-12-02-1 +40°C 90-95% rel. humidity 96 h unpecked, passive | |
| Rapid temperature change | Test norm: Temperature: Transfer time: | DIN ISO 9022-15-02-1 t ₁ = -25°C t ₂ = +40°C ≤ 20 sec | |
| Electromagnetic compatibility | Test | Test norm | Target value |
| | Emitted interference | DIN EN 61326-1 | |
| | Radio interference radiation | DIN EN 5511 | Group 1 Class A (VGA) Class B (DVGA) |
| | Interference immunity | DIN EN 61326-1 | |
| | electrostatic discharge | DIN EN 61000-4-2 | |
| | electromagnetic RF fields | Din EN 61000-4-3 | 0.08 - 1 GHz 10 V/m |
| | | Din EN 61000-4-3 | 1.4 - 2.0 GHz 3 V/m |
| | | Din EN 61000-4-3 | 2.0 - 2.7 GHz 1 V/m |



ДОДАТОК 8

```

import numpy as np
from scipy.constants import h, c, k

# Вхідні дані
lambda_min = 8e-6 # Мінімальна довжина хвилі [м]
lambda_max = 14e-6 # Максимальна довжина хвилі [м]
T_background = 300 # Температура фону [К]
delta_T = 1 # Різниця температур між ціллю та фоном [К]
NETD = 0.03 # NETD камери [К]
pixel_size = 12e-6 # Розмір пікселя [м]
focal_length = 18.6e-3 # Фокусна відстань [м]

# Поляризаційні характеристики
DoLP_target = 0.6 # Ступінь поляризації цілі
AoLP_target = np.radians(45) # Кут поляризації цілі [рад]
DoLP_background = 0.2 # Ступінь поляризації фону
AoLP_background = np.radians(90) # Кут поляризації фону [рад]

# Закон Планка
def planck_law(wavelength, T):
    return (2 * h * c**2 / wavelength**5) / (np.exp(h * c / (wavelength * k * T)) - 1)

# Інтегрування радіації
def integrated_radiance(T):
    wavelengths = np.linspace(lambda_min, lambda_max, 1000)
    spectral_radiance = planck_law(wavelengths, T)
    return np.trapz(spectral_radiance, wavelengths)

# Радіація для фону та цілі
L_background = integrated_radiance(T_background)
L_target = integrated_radiance(T_background + delta_T)
delta_L = L_target - L_background

# Інтенсивності без поляризації
S0_target = L_target
S0_background = L_background

# Інтенсивності з урахуванням поляризації
S1_target = DoLP_target * S0_target * np.cos(2 * AoLP_target)
S2_target = DoLP_target * S0_target * np.sin(2 * AoLP_target)
I_target = 0.5 * (S0_target + S1_target + S2_target)

```

```

S1_background = DoLP_background * S0_background * np.cos(2 *
AoLP_background)
S2_background = DoLP_background * S0_background * np.sin(2 *
AoLP_background)
I_background = 0.5 * (S0_background + S1_background + S2_background)

# Різниця інтенсивностей
delta_I = I_target - I_background

# Розрахунок MDTD
MDTD = NETD / delta_L # Без поляризації
MDTD_polarized = NETD / delta_I # З урахуванням поляризації

# Розрахунок MTF (передавальної функції)
def MTF(frequency, focal_length, pixel_size):
    nyquist_frequency = 1 / (2 * pixel_size) # Nyquist frequency
    if frequency > nyquist_frequency:
        return 0 # MTF is zero beyond Nyquist frequency
    return 1 - (frequency / nyquist_frequency)

# Частота та розрахунок MRTD
spatial_frequencies = np.linspace(0, 1 / pixel_size, 10) # Просторові частоти [м^-1]
MRTD_values = []
MRTD_polarized_values = []

for f in spatial_frequencies:
    mtf = MTF(f, focal_length, pixel_size)
    if mtf > 0:
        MRTD_values.append(MDTD / mtf)
        MRTD_polarized_values.append(MDTD_polarized / mtf)
    else:
        MRTD_values.append(np.inf) # Немає розрізнення
        MRTD_polarized_values.append(np.inf)

# Виведення результатів
print(f'MDTD (без поляризації): {MDTD:.4f} К')
print(f'MDTD (з поляризацією): {MDTD_polarized:.4f} К\n')

print("MRTD (без поляризації) для різних частот:")
for f, mrt in zip(spatial_frequencies, MRTD_values):
    print(f'Частота: {f:.2e} м^-1, MRTD: {mrt:.4f} К')

print("\nMRTD (з поляризацією) для різних частот:")
for f, mrt_p in zip(spatial_frequencies, MRTD_polarized_values):
    print(f'Частота: {f:.2e} м^-1, MRTD: {mrt_p:.4f} К')

```

ДОДАТОК 9

```

% Вхідні дані
T_t = 300; % Температура цілі, К
T_d = 300; % Температура датчику, К
T_b = 298; % Температура фону, К
epsilon = 1; % Коефіцієнт поглинання випромінювання
f_o_prime = 50e-3; % Задня фокусна відстань об'єктива, м (50 mm)
D = 50e-3; % Діаметр апертури об'єктива, м (50 mm)
f_f = 50; % Частота кадрів, Гц
C_1 = 37415; % Вт*см^-2*мкм^4
C_2 = 14388; % мкм*К
sigma = 5.67 * 10^-8; % Вт/(К^4*м^2)
K_prime = 1.38 * 10^-23; % Дж/К
A_D_sqrt = 12e-6; % sqrt(A_D) в метрах (12 μm)
t_e = 0.2; % с
SNR_d = 4.5;
beta_D = 0.28;
V_t = 2.3; % м довжина тест об'єкта
a_const = 2.3; % в метрах
V_D = 12e-6; % V_D (в метрах)

t_0 = 1/(2*f_f); % Одиничний часовий інтервал

% Обчислення D'_B
D_B_prime = sqrt(epsilon / (8 * K_prime * sigma * (T_b^5 + T_d^5)));

% Інтегральна функція M1
M1 = @(lambda, T_t) (C_1 ./ (lambda.^5 .* (exp(C_2 ./ (lambda .* T_t)) - 1)))
.* (C_2 ./ (lambda .* T_t.^2));

```

```

% Обчислення M_I за допомогою інтеграції від 8 мкм до 14 мкм
lambda1 = 8; % мкм
lambda2 = 14; % мкм
M_I = integral(@(lambda) M1(lambda, T_t), lambda1, lambda2);

% Обчислення NETD
NETD = (4 * (f_o_prime / D) * sqrt(f_f)) / (A_D_sqrt * (M_I * D_B_prime)) *
10^-3;

% Початкова температурна різниця
delta_T0 = T_t - T_b;

% Значення sigma_A для різних умов
sigma_A_good = 0.2; % для хороших погодних умов
sigma_A_bad = 1; % для обмеженої видимості

% Визначення діапазону відстаней
R_values = linspace(0.1, 8, 100);

R_rvalues = linspace(0.1, 8, 100);

% Розрахунок delta_T(R) для кожного значення R для двох різних sigma_A
delta_T_good = delta_T0 * exp(-sigma_A_good * R_values);
delta_T_bad = delta_T0 * exp(-sigma_A_bad * R_values);

% Обчислення MTF на основі просторової частоти
alpha_D = V_D / f_o_prime; % рад кутове миттєве поле зору пікселя

% Функція для обчислення нормалізованої sinc

```

```

normalized_sinc = @(x) sin(pi * x) ./ (pi * x);

% Функція для обчислення MTF на основі просторової частоти
mtf = @(R) normalized_sinc(R/4*a_const*alpha_D*10^3);

% Функція для обчислення MRTD
calculate_mrtd = @(R) (0.93 * SNR_d * NETD * (R/a_const)) ./ (mtf(R) .*
sqrt(f_f * t_e));

% Обчислення значень MRTD для кожного R
mrtd_values = calculate_mrtd(R_rvalues);

% Побудова графіка для всіх трьох функцій
figure;
semilogy(R_values, delta_T_good, 'b', 'DisplayName', '\sigma_A = 0.2 km^{-1}');
1});
hold on;
semilogy(R_values, delta_T_bad, 'r', 'DisplayName', '\sigma_A = 1 km^{-1}');
semilogy(R_rvalues, mrtd_values, 'g', 'DisplayName', 'MRTD');
xlabel('Detection Distance R (m)');
ylabel('Temperature Difference \Delta T(R) / MRTD (K)');
title('Temperature Difference \Delta T(R) and MRTD vs Detection Distance
with Different Atmospheric Attenuation');
grid on;
legend show;

```