

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

«На правах рукопису»

УДК 004.932.2

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

Н.І. Бурау

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Магістерська дисертація
на здобування ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»
зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Цифрова обробка зображень в поляриметричних тепловізорах
для розпізнавання обличь»

Виконав:

Студент II курсу, групи ПО-11мп

Танчук Владислав Сергійович

Науковий керівник:

Професор, д.т.н.

Колобродов Валентин Георгійович

Консультант з розробки стартап-проекту:

Професор, д.с.н.

Бояринова Катерина Олександрівна

Рецензент:

Доцент, к.т.н.

Терещенко Микола Федорович

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

Здобувач

Київ – 2022 рік

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Н. І. БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

**на магістерську дисертацію студента
Танчука Владислава Сергійовича**

1. Тема дисертації **«Цифрова обробка зображень в поляриметричних тепловізорах для розпізнавання обличь»**, науковий керівник дисертації Колобродов Валентин Георгійович, д.т.н., професор затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації «10» грудня 2022 р.
3. Об'єкт дослідження: процес формування зображення в поляриметричному тепловізорі.
4. Предмет дослідження: є алгоритми обробки зображення для розпізнавання обличчя в поляриметричному тепловізорі.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 5.1. Провести аналіз поляриметричних тепловізійних систем спостереження
 - 5.2. Огляд існуючих алгоритмів обробки зображень в поляриметричних тепловізора
 - 5.3. Розробка математичної моделі обробки зображень обличь в поляриметричних тепловізорах.
 - 5.4. Дослідити словникове навчання ознак для обробки поляриметричних зображень для створення моделі розпізнавання обличь.
 - 5.5 Створити алгоритм обробки зображень обличь в поляриметричних тепловізорах для систем розпізнавання обличь.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація в програмі PowerPoint

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

8. Консультанти розділів дисертації

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

9. Дата видачі завдання 31.10.2022 р

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|---|--|----------|
| 1 | Інформаційний пошук по тематиці поляриметричних тепловізорів та цифрової обробки зображення гетерогенного розпізнавання обличь. | 15.11.22 р. | |
| 2 | Огляд та аналіз архітектур поляриметричних тепловізорів | 15.11.22 р. | |
| 3 | Огляд явища поляризації та створення фізико-математичної моделі поляриметричного тепловізора | 15.11.22 р. | |
| 4 | Дослідження гетерогенного розпізнавання обличь та словинкового навчання ознак | 15.11.22 р. | |
| 5 | Створення алгоритму цифрової обробки видимих та поляриметричних теплових зображень обличь, для створення системи гетерогенного розпізнавання обличь, використовуючи словникове навчання ознак | 25.11.22 р. | |
| 6 | Оформлення магістерської дисертації та презентації | 30.11.22 р. | |

Студент

Танчук В. С.

Науковий керівник дисертації

Колобродов В.Г.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: ст. 101, рис. 31, табл. 24, джерел 41.

ЦИФРОВА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ В ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРАХ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧЬ

Розпізнавання обличь використовується в різних сферах, але найбільшого свого використання воно отримало у системах відеоспостереження. Більшість таких систем зосередженні на видимому діапазоні, тоді як розпізнавання обличь у ІЧ діапазоні не має такого широкого використання. На те є причини, так як є відкритим питанням, як саме ідентифікувати обличчя, зроблене у ІЧ діапазоні з обличчям у видимому. Для більш ефективної роботи розпізнавання обличь таких систем, є необхідність у використанні поляриметричних тепловізорів, так як явище поляризації дає змогу отримати набагато більше інформації про об'єкт спостереження.

Так, як головною задачею є ідентифікувати зображення обличчя у ІЧ діапазоні із зображення у видимому, необхідно провести гетерогенне розпізнавання обличь. Цифрова обробка такої системи полягає у синтезі зображень з ІЧ та видимого, таким чином, щоб результуючі зображення мали якомога більше спільних ознак. В даній роботі розглядається словникове навчання ознак, для виконання цього завдання. Метою роботи є створити алгоритм синтезу та обробки зображень на основі словникового навчання ознак.

Ключові слова: поляризація, поляриметр, тепловізор, цифрова обробка зображень, гетерогенне розпізнавання обличь, словникове навчання ознак, попередня обробка, патч, словник, розріджена функція, сингулярне розкладання матриці

ABSTRACT

Master's thesis: p. 101, fig. 31, tabl. 24, sources. 41

Face recognition is used in various fields, but it is most widely used in video surveillance systems. Most such systems focus on the visible range, while face recognition in the IR range is not as widely used. There are reasons for this, as it is an open question how exactly to identify a face taken in the IR range with a face in the visible. For more effective face recognition of such systems, there is a need to use polarimetric thermal imagers, as the phenomenon of polarization makes it possible to obtain much more information about the object of observation.

Since the main task is to identify a face image in the IR range from an image in the visible range, it is necessary to perform heterogeneous face recognition. The digital processing of such a system consists in the synthesis of IR and visible images in such a way that the resulting images have as many common features as possible. This work considers the dictionary learning of features to perform this task. The aim of the work is to create an algorithm for image synthesis and processing based on dictionary feature learning.

Keywords: polarization, polarimeter, thermal imager, digital image processing, heterogeneous face recognition, dictionary learning, preprocessing, patch, dictionary, sparse function, singular matrix decomposition.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ | 8 |
| Розділ 1. Огляд поляриметричних тепловізійних систем спостереження та цифрової обробки зображень для розпізнавання обличь | 11 |
| 1.1 Явище поляризації | 13 |
| 1.2 Принципи побудови поляриметричних тепловізорів | 17 |
| 1.3 Цифрова обробка зображень | 21 |
| 1.4 Висновки до розділу | 23 |
| Розділ 2. Аналіз принципів побудови поляриметричних тепловізорів | 25 |
| 2.1 Фундаментальні архітектури поляриметричних систем | 26 |
| 2.1.1 Архітектура на основі поділу часу | 26 |
| 2.1.2 Архітектура на основі поділу амплітуди | 30 |
| 2.1.3 Архітектура на основі поділу апертурної діафрагми | 32 |
| 2.1.4 Архітектура на основі поділу фокальної площини | 34 |
| 2.2 Рухі | 36 |
| 2.3 Висновки до розділу | 41 |
| Розділ 3. Фізико-математична модель поляриметричного тепловізора | 42 |
| 3.1 Основи поляризації світла | 42 |
| 3.2 Поляризація в природі | 43 |
| 3.3 Вимірювання поляризації | 44 |
| 3.4 Поляризаційні залежності | 46 |
| 3.5 Обробка поляриметричних односпектральних даних | 47 |
| 3.5.1 Накладення поляриметричних даних і покращення зображення | 50 |
| 3.5.2 Методи злиття зображень | 53 |
| 3.6 Висновки до розділу | 55 |

| | |
|--|----|
| Розділ 4. Аналіз алгоритмів обробки поляриметричних тепловізійних зображень для розпізнавання обличь | 57 |
| 4.1 Синтез зображень обличь | 60 |
| 4.1.1 Словникове навчання ознак | 62 |
| 4.2 Попередня цифрова обробка синтезованих зображень | 73 |
| 4.3 Фінальний алгоритм обробки зображень | 75 |
| 4.3 Висновки до розділу | 76 |
| Розділ 5. Розробка стартап-проекту «Система нічного спостереження з функцією розпізнавання обличь» | 78 |
| 5.1 Опис ідеї проекту | 78 |
| 5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартапу | 81 |
| 5.3 Розроблення ринкової та маркетингової програми стратегії проекту | 88 |
| 5.5 Висновки до розділу | 94 |
| Висновки | 95 |
| Використана література | 98 |

ВСТУП

Розпізнавання обличчя має широке застосування у комерційній, військовій та цивільній сферах діяльності, починаючи від розпізнавання людей на веб-сайтах в соціальних мережах і закінчуючи спостереженнями для національної безпеки. В даний момент часу, дослідження та розробки розпізнавання обличчя переважно зосереджені на видимому спектрі. Для спостереження в нічний час використання звичайних камер не задовольняє поставленій задачі, тому для цього використовують тепловізійні камери.

Основне питання розпізнавання обличчя полягає в тому, як точно ідентифікувати видиме зображення обличчя із зображеннями, зробленими в тепловому спектрі. Для більш ефективного розпізнавання, використання звичайних тепловізорів не є ефективним. Точної обробки зображення можна добитися, використовуючи поляриметричні тепловізори, які виділяють додаткові ознаки та геометричні деталі обличчя.

Існує багато методів обробки поляризаційних зображень обличчя. Один із таких методів є словникове навчання ознак. Завдяки цьому методу можна отримати зображення, яке буде мати спільні ознаки із зображенням обличчя у видимому діапазоні, при тому що зображення було створено в ІЧ діапазоні, використовуючи явище поляризації. А для покращення роботи моделі розпізнавання обличчя, необхідно використовувати різні методи цифрової обробки зображення, які теж будуть розглянуті в даній роботі.

Мета роботи: На основі дослідження поляриметричних тепловізійних систем спостереження обґрунтувати засоби підвищення якості зображення та способи їх обробки для створення системи розпізнавання обличчя, використовуючи явище поляризації та словникове навчання ознак.

Завдання для досягнення поставленої мети:

1. Провести аналіз поляриметричних тепловізійних систем спостереження.
2. Огляд існуючих алгоритмів обробки зображень в поляриметричних тепловізорах.
3. Розробка математичної моделі обробки зображень обличчя в поляриметричних тепловізорах.
4. Дослідити словникове навчання ознак для обробки поляриметричних зображень для створення моделі розпізнавання обличчя.
5. Створити алгоритм обробки зображень обличчя в поляриметричних тепловізорах для систем розпізнавання обличчя.

Об'єктом дослідження є процес формування зображення в поляриметричному тепловізорі.

Предмет дослідження є алгоритми обробки зображення для розпізнавання обличчя в поляриметричному тепловізорі.

Методи дослідження: досліджувались архітектури поляриметричних тепловізорів, на основі вже виконаних досліджень, які були викладені в різних роботах інших науковців. Також досліджувалось гетерогенне розпізнавання обличчя, а саме цифрова обробка тепловізійних поляриметричних та видимих зображень на основі словникового навчання ознак. Для того, щоб дослідити словникове навчання ознак, необхідно було реалізувати алгоритм, результатом якого є синтезовані зображення, які порівнюються між собою і тим самим аналізується ефективність роботи розглянутого методу.

Наукова новизна одержаного алгоритму цифрової обробки гетерогенного розпізнавання ознак полягає в тому, що раніше таку цифрову обробку зображень виконували іншими методами, більш складними у реалізації та використанні. Словникове навчання ознак, в свою чергу дає можливість виконувати поставлені задачі більш ефективно та не є гіршим за інші методи.

Апробація результатів дисертації: розроблений алгоритм був представлений на XV Всеукраїнській науково-практичній конференції "Погляд у майбутнє приладобудування" за напрямом оптичні та оптико-електронні прилади і системи.

Публікації:

1. Танчук В.С. Неоднорідне розпізнавання обличчя поляризаційним тепловізором, використовуючи словникове навчання ознак, 2022-4с
2. Танчук В.С. Метод виявлення малих цілей в інфрачервоному діапазоні на основі декомпозиції поляризаційної інформації, 2021-5с

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧЬ

Спостереження – це слідування за поведінкою, багатьма видами діяльності або дослід інформації з метою її збору, для впливу, управління чи маніпуляції.

Спостереження є скрізь: на робочих місцях відстежують продуктивність співробітників, у соціальних мережах відстежують кліки та завантаження, фінансові установи реєструють транзакції, рекламодавці збирають детальні дані про клієнтів, а служби безпеки відкачують телекомунікаційну діяльність кожного [1].

Системи спостереження мають дуже широке використання в безлічі галузях. Вони активно використовуються громадянами для захисту свого володіння, а також урядами для збору розвідувальних даних, включаючи шпигунство, запобігання злочинам, захисту процесу розробки, захисту особи, групи чи об'єкта. Також активно використовуються для запобігання та розслідування злочинів.

Одним із найрозповсюдженішим методом спостереження є спостереження з використанням камер. Камери відеоспостереження або камери безпеки, використовуються для спостереження за місцевістю. Вони часто підключені до записуючого пристрою або IP-мережі. Аналіз відзнятих матеріалів виконується завдяки автоматизованому програмному забезпеченню, яке організовує цифрові відеоматеріали в базу даних із можливістю пошуку, і програмному забезпеченню для аналізу відео, такому як VIRAT і HumanID. Завдяки дешевшим технологіям виробництва камери спостереження досить прості та недорогі, щоб використовувати їх у системах домашньої безпеки та для щоденного спостереження [2]. Але, зазвичай, такі системи мають один основний недолік, вони не мають можливості нічної зйомки, що значно обмежує їх використання.

Різні уряди, військові об'єкти та інші організації які потребують охорону та відеоспостереження 24/7 повинні мати змогу спостереження в нічний час або в місцях з поганим освітленням. Звідси і пішло широке використання тепловізійних систем (ТС) спостереження.

Тепловізійні системи або тепловізори, призначені для спостереження та контролю за тепловими полями шляхом перетворення їх у видимий аналог. Аналогом таких систем є телевізійні системи, які працюють у видимому діапазоні спектра і дають інформацію про об'єкт спостереження у звичайному для сприйняття вигляді. Телевізійне зображення формується, в основному, за рахунок відбиваючого випромінювання та різниці у коефіцієнтах відбиття об'єкта і фону. На відміну від видимого зображення, тепловізійне зображення формується за рахунок власного випромінювання та різниці у температурах і коефіцієнтах випромінювання поверхонь об'єкта і фону [3].

Разом із відеоспостереженням, виникає необхідність в створенні системи розпізнавання обличч людей. Така необхідність виникає для збільшення інформації про об'єкт, для забезпечення більшої захищеності.

Розпізнавання обличч має широкий спектр потенційних застосувань у комерційному, військовому та державному секторах. На даний момент дослідження та розробка систем розпізнавання обличч переважно зосереджені на видимому спектрі, так як алгоритми обробки таких зображень мають меншу складність і потребують менше ресурсів. Однак для спостереження вночі, та при відсутності освітлення, використання камер, що працюють у видимому спектрі не задовольняє поставлені задачі [4].

Існують вже готові реалізації моделей розпізнавання обличч з використанням тепловізійних камер. Але такі системи не завжди мають велику ефективність та якість.

Для системи розпізнавання обличч у інфрачервоному діапазоні було б непогано мати більше інформації про об'єкт спостереження, ніж просто теплове зображення.

Для виконання цієї задачі можна використати поляриметричні тепловізори, так як явище поляризації надає набагато більше інформації про об'єкт. Але такі поляриметричні системи мають низку недоліків, такі як складність архітектури, розміри та ціна. Тому є сенс знайти оптимальний варіант для поставленої задачі.

Також, для забезпечення ефективної роботи моделі розпізнавання обличь, необхідно використовувати цифрову обробку зображення, для виконання пост обробки та вилучення корисної інформації із зображення.

В даній магістерській дисертації виконувалось дослідження в наступних напрямках:

1. Явище поляризації
2. Принципи побудови поляриметричних тепловізорів
3. Цифрова обробка зображень

1.1 Явище поляризації

Разом із розвитком приймачів випромінювання та технологій їх виготовлення, системи спостереження мають змогу отримувати все більше інформації з фізичного світу. Людський зір завжди відіграє ключову роль у сприйнятті інформації, але, на жаль, з обмеженням, так як системи зору можуть сприймати лише часткову інформацію за межами видимого спектру. Наприклад, неможливо сприйняти інформацію, яку несе поляризоване світло, оскільки системи людського зору нечутливі до поляризації. З іншого боку, деякі морські та наземні тварини та комахи демонструють свою здатність відчувати та використовувати поляризоване світло для навігації, визначення місцезнаходження та полювання на здобич у своєму повсякденному житті.

Поляризація світла – це фізична характеристика оптичного випромінювання, яка описує поперечну анізотропію світлових хвиль, тобто нееквівалентність різних напрямків в площині, що перпендикулярна світловому променю [5].

Дане поняття вперше було описано в 1705 році, англійським вченим Ісааком Ньютоном. Перші дослідження явища поляризації світла були проведені голландським вченим Християном Гюйгенсом в 1690 році, з використанням кристалів ісландського шпату [6].

Поляризація є унікальною характеристикою поперечної хвилі, яка є явищем асиметрії напрямку вібрації та напрямку поширення. Порівняно зі звичайним зображенням, поляризаційне зображення виявляє поляризаційну інформацію цілі, що є дуже корисним для таких застосувань як виявлення, розпізнавання та ідентифікація цілей.

Поляризаційні характеристики світла відносяться до зміни поляризаційного стану під час пропускання або відбиття. Зміну поляризаційного стану можна, як правило, виразити вектором Стокса. Вектор Стокса був запропонований, коли Джордж Габріель Стокс вивчав частково поляризоване світло в 1852 році. Вектор Стокса представляє як повністю, так і частково поляризоване світло, яке використовується для виявлення поляризаційних зображень. Чотири параметри вектору Стокса $\vec{S} = [S_0, S_1, S_2, S_3]$ описують інформацію про поляризацію цілі, яку можна отримати за допомогою різного обладнання для формування зображень як прямо, так і опосередковано [7].

Для вимірювання вектору Стокса зазвичай, використовують наступну схему як показано на рис. 1.1: природнє світло проходить через поляризатор і фазову пластину, які, обертаючись, можуть змінювати кут поляризації або різницю фаз між складовими електромагнітної хвилі, після чого отримується група значень інтенсивності вихідного світла, які потрапляють на приймач випромінювання. Як результат, на виході приймача випромінювання, створюється електричний сигнал, на основі якого, після подальшої обробки, отримуються чотири параметра Стокса.

Оперуючи отриманими параметрами вектору Стокса, з'являється можливість обробки поляризаційних даних зображення. Для опису ступеню поляризації сцени використовуються дві стандартні міри: ступінь лінійної поляризації (з англ. Degree of Linear Polarisation, або DoLP) та кут лінійної поляризації. Обидві міри знаходяться використовуючи вектор Стокса.

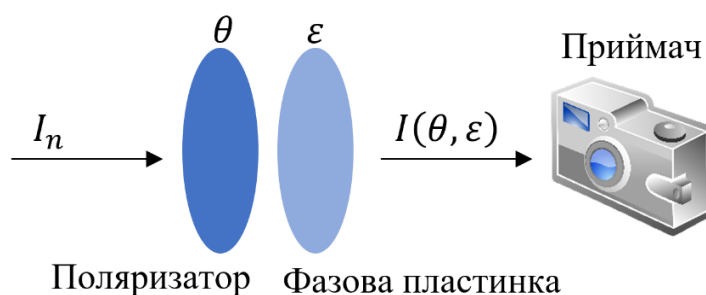


Рисунок 1.1. Схема поляризаційної камери

Використання системи подібній рис. 1.1, не є достатнім для розробки поляриметричного тепловізора. Поляриметричні тепловізори мають різні архітектури, різної складності та ціни. Їх конструкція явно складніші та дорожчі, ніж звичайна, не поляриметрична камера. Це і є недолік поляриметричних тепловізорів.

Важливо визнати, що цей недолік прийнятний, лише якщо приріст продуктивності є досить значним з точки зору конкретних експлуатаційних вимог. Але, на жаль, цей компроміс часто не помічають. Також, зрозуміло, що поляриметричні датчики вимагають іншої та більш складнішої обробки сигналів, ніж звичайні тепловізійні камери.

Ця складність стосується як розробки алгоритму, так і його реалізації в апаратному забезпеченні процесора. Також, в межах, де сцена не містить поляризаційної інформації, поляриметричний датчик повинен мати такі ж можливості, як і звичайний датчик. Досягнення такого витонченого зближення є складним завданням.

Існує багато методів обробки поляриметричних даних поляризаційного тепловізора. Тому необхідно провести порівняння та дослідити, для того, щоб обрати

найбільш оптимальний. В статті «Polarimetric imaging: system architectures and tradeoffs», дуже гарно описано різні методи обробки поляриметричних даних, та проведені досліди та порівняння [8].

В зазначеній роботі, для проведення порівняльної характеристики, протягом кількох років було проведено широкий спектр випробувань поляриметричних зображень. Ці випробування включали датчики, що працюють у різних спектральних діапазонах (видимий, ближній ІЧ, короткохвильовий ІЧ, середньохвильовий ІЧ та довгохвильовий ІЧ) для багатьох різних міських і сільських сцен, що містять різноманітні об'єкти інтересу. Дані записувалися за різних погодних умов і часу доби.

Поляриметричні дані були зібрані з використанням архітектури поділу часу (більш детально про архітектуру поділу часу буде описано в розділі 2) за допомогою обертового поляризатора на вхідних отворах камер (архітектура подібна рис. 1). Для початкових випробувань поляризатор обертало вручну проти каліброваної кутової шкали, що давало час захоплення приблизно десять секунд для чотирьох кутів поляризатора (0° , 45° , 90° , 135°). Як наслідок, використовуючи дану схему поляриметра, випробування обов'язково обмежувалися статичними сценами. На практиці, рослинність (трава, дерева), хмари можуть рухатися протягом зйому, що призводить до появи помилкових поляриметричних ознак. Проблема переміщення об'єктів на сцені була зменшена в другій половині випробувань, де використовувався моторизований поворотний сценічний майданчик. Однак це все ще архітектура на основі поділу часу, тому досліди все ще були схильні до помилок через рух сцени (наприклад, рух листя через пориви вітру) та рух бортової камери. Хоча поляриметри на основі поділу часу обмежені з точки зору допустимого руху сцени, вони широко використовуються під час випробувань. Це в першу чергу тому, що вони пропонують рішення для збору даних із дуже низьким рівнем інформації, що особливо важливо для випробувань із кількома датчиками, що працюють у різних діапазонах хвиль. Основною проблемою для такого масштабного випробування було оброблення зображень приймачем випромінювання разом із допоміжними метаданими. Тому необхідно було розробити два програмних інструменти, які дозволяли б

перейменувати файли та збирати допоміжну інформацію (включаючи погодні умови, відстань до об'єктів тощо). Можливість попереднього перегляду поляриметричних даних під час випробувань також виявилася надзвичайно корисною. Іншою проблемою була реєстрація зображень, яка складалася з реєстрації як вихідних даних з однієї камери, так і даних з різних камер, що працюють у різних спектральних діапазонах [8].

В розділі 3, більш детально розглядається використання вектору Стокса та методи обробки поляриметричних даних. Проведені порівняння різних методів та обрані найбільш оптимальні.

1.2 Принципи побудови поляриметричних тепловізорів

Як вже зазначалось раніше, поляриметричне зображення надає додаткову інформацію про сцену. Використовується ця інформація зазвичай у системах виявлення цілі та розпізнавання. Особливу цінність, поляриметри набувають у сучасній військовій техніці і у системах спостереження, так як, завдяки явищу поляризації, є змога розрізнити слабкі сигнатур цілей порівняно з їх оточенням.

Як відомо тепловізори перетворюють теплову інформацію об'єкта у видимий аналог, що допомагає бачити цілі, навіть у абсолютно темному оточенні. Всі тіла мають температуру і випромінюють ІЧ випромінення, а тепловізійні системи їх сприймають і перетворюють вже у зображення видимого діапазону. Але такі системи мають купу обмежень, щодо додаткової інформації про тіло, його форму, деталі і таке інше. Звідси і з'явилася потреба у використанні явища поляризації для тепловізійних оптичних систем.

Поляриметричний тепловізор представляє собою звичайний тепловізор, але на його матричний приймач випромінення потрапляє поляризоване світло. Тому і сама оптична система такого поляриметра не сильно відрізняється від системи звичайного

тепловізора. Звідси, для того, щоб розглянути принципи побудови поляриметричних ТС, необхідно умовно розділити це на дві частини:

1. Принципи побудови звичайних тепловізорів
2. Типи архітектур для створення поляризованого світла у ОС тепловізора

У загальному вигляді, тепловізійні системи можна представити у вигляді такої функціональної схеми, як зображено на рис. 1.2: інфрачервоне випромінювання від нагрітих об'єктів спостереження та фонів проходить через атмосферу і потрапляє в ОС приладу. ОС формує теплове зображення об'єктів та фонів у площині ПВ. Скануюча оптико-механічна система здійснює розгортку цього зображення і перетворює двомірний розподіл освітленості в одномірний світловий потік, який сприймає ПВ. ПВ перетворює цей потік в електричний відеосигнал, який після підсилення надходить у блоки аналогової та цифрової обробки. Після необхідних перетворень відеосигнал надходить до ВОП, де формується видимий аналог об'єкта та фону, які і сприймаються оператором [3].

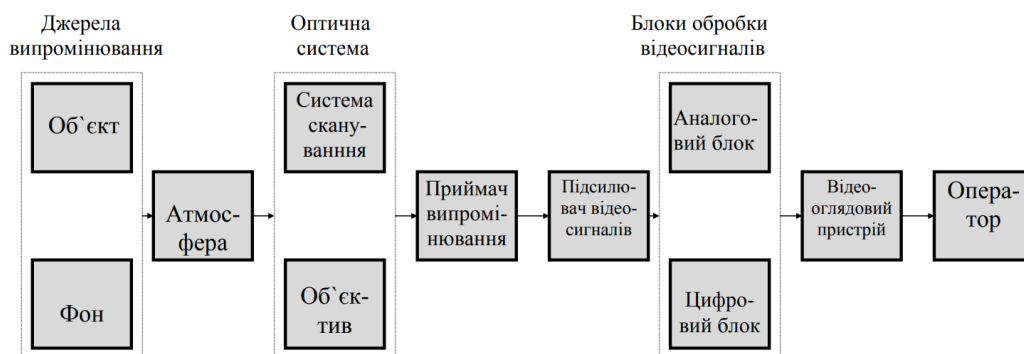


Рисунок 1.2. Функціональна схема узагальненої тепловізійної системи

Основними елементами схеми на рис.2, є: оптична система (ОС) та приймач випромінювання (ПВ).

ОС тепловізора представляє собою комбінацію різних оптичних елементів, таких як: лінзи (сферичні і асферичні), дзеркала, призми, світлофільтри. Важливою складовою частиною ОС є інфрачервоний об'єктив, призначений для формування зображення об'єктів та фонів у площині ПВ в заданому спектральному діапазоні.

Вимоги до світлосили об'єктива та якості зображення визначаються завданнями, які вирішує ТС. При проектуванні об'єктива завжди доводиться шукати компромісне рішення з точки зору створення простого об'єктива, який забезпечує потрібні світлосилу та якість зображення [3].

ПВ перетворює світловий потік, який проходить через ОС і потрапляє на нього, в електричний сигнал, над яким потім проводиться цифрова обробка та створення зображення. Головними ознаками ПВ є: робоча область спектру та його чутливість. Для ТС робоча область спектру ПВ повинна бути у області від 3 до 5 або від 8 до 14 мкм.

Після того, як ми розглянули основну схему ТС, необхідно розглянути основні типи архітектур для створення поляризованого світла у ОС тепловізора. Їх поділяють на 4 типи:

1. Поділ часу
2. Поділ амплітуди
3. Поділ апертурної діафрагми
4. Поділ фокальної площини

Для архітектури *поділу часу* (з англ. Division of Time) використовуються обертові світлофільтри, такі як поляризаційна або фазова пластинки, для вимірювання різних станів поляризації. Приклад такої схеми можна побачити на рис. 1.1.

Архітектура *поділу амплітуди* (з англ. Division of Amplitude) складається з двох-чотирьох окремих ПВ. Амплітуда падаючого випромінювання ділиться за допомогою світло-розділювачів або решіток для формування двох-чотирьох зображень сцени на двох-чотирьох ПВ. Кожне зображення з ПВ відповідає своїй орієнтації поляризації.

У архітектурі *поділу апертурної діафрагми* (з англ. Division of Aperture), випромінювання, що проходить площину апертурної діафрагми, розділяється на чотири окремі канали, зображення в кожному каналі відповідає зображенню сцени.

Для архітектурі *поділу фокальної площини* (з англ. Division of Focal Plane) створюється окрема поляризаційна маска, яка має розташовується перед ПВ. Ця маска складається з комірок розміром 2x2, де кожен елемент комірки відповідає відповідному куту поляризації 0, 45, 90, 135. Загальний розмір маски повинен відповідати розміру матриці ПВ.

Як вже було зрозуміло, ці архітектури відрізняються між собою тим, що мають різне розташування світлових фільтрів у ОС, які в свою чергу виконують поляризацію світла для різних її орієнтацій. Тому об'єднавши знання про основи проектування ТС та знання різних архітектур поляриметрів, можна спроектувати поляриметричний тепловізор, який буде виконувати поставлені задачі. Ціна, якість, формфактор будуть залежить від обраних оптичних елементів ТС, від обраного ПВ та від обраної архітектури, так як кожна архітектура має свою складність у виготовлені та відповідно свої плюси та мінуси, стосовно якості та експлуатації.

Більш детально про кожен архітектуру та про ТС, описано в розділі 2. Також на основі розглянутих архітектур та різних ТС, було знайдено поляриметричний тепловізор, який чудово підходить для виконання поставлених задач в даній роботі.

Назва розглянутого поляриметричного тепловізора Рухіс (рис. 2.1). Цей поляризаційний тепловізор, розроблений компанією Polaris Sensor Technologies, Inc, представляє собою поляриметр на основі мікроболометичної матриці, який створює поляриметричне відео для ІЧ діапазону. Цей поляриметр базується на архітектурі поділу фокальної площини, має компактний розміри та завдяки використанню даної архітектури та мікроболометичної матриці, не потребує активного охолодження.

1.3 Цифрова обробка зображень

Цифрова обробка зображень (з англ. Digital Image Processing або DIP) – це створення алгоритмів для обробки цифрових зображень використовуючи комп'ютерні технології. Вхідними даними для DIP є цифрові зображення, наприклад фото або відеокадри. Вихідними даними, після обробки, є такі ж цифрові зображення які мають цікаву для спостереження інформацію, в залежності від алгоритму. DIP використовують для підготовки даних до розпізнавання об'єктів, для виділення необхідної інформації або для підготовки даних до використання різних моделей, які працюють з даними зображеннями.

Системи розпізнавання обличчя все частіше і частіше використовуються в різних сферах. Такі системи використовуються для надання дозволу на проходження в місця з обмеженим доступом, або для систем спостереження, щоб визначити ціль та вилучити якомога більше інформації про людину.

Зазвичай задачу по створенню системи розпізнавання обличчя називають міжмодельним гетерогенним розпізнаванням обличчя (з англ. Cross-model heterogeneous face recognition або HFR). HFR є однією з найскладніших областей досліджень біометрії та комп'ютерного зору. Основною метою HFR є точне розпізнавання/ідентифікація видимого зображення обличчя за допомогою зображень, отриманих за допомогою альтернативних видів спектру, таких як тепловий спектр.

Для цієї задачі необхідно мати відповідні системи спостереження, виконати цифрову обробку зображення, щоб підготувати дані для моделі, та вже зібрану базу даних про людей, для того щоб було з чим порівнювати та тим самим розпізнавати об'єкт спостереження.

Відповідні бази даних вже існують на об'єктах з обмеженим доступом, або база даних про злочинців, які вже підлягали кримінальній відповідальності. Системи спостереження теж повинні бути відповідні, для того щоб можна було отримувати

зображення в гарній якості та з достатньою інформацією. Наразі нас цікавить випадок, коли необхідно виконати розпізнавання обличчя у нічний час або в місцях з поганою освітленістю. Для цього, в якості камер відеоспостереження необхідно використовувати поляриметричні тепловізори. Які саме поляриметричні ТС підходять для виконання даного завдання, було розглянуто раніше.

Як вже зазначалось, бази даних з зображеннями обличчя людей вже існують, але ці зображення зроблені у видимому для людського ока діапазоні. А наша задача розпізнавати обличчя із зображень які було зроблені в ІЧ діапазоні. Тому головною задачею для виконання розпізнавання є виконання цифрової обробки зображення, щоб підготувати дані для моделі та отримати якомога більше спільних ознак між зображеннями обличчя видимого та ІЧ спектрів.

Останнім часом було проведено значну кількість досліджень гетерогенного розпізнавання обличчя (HFR):

1. Перетворення поляриметричного у видиме зображення обличчя використовуючи синтезу з керуванням самоувагою [9];
2. Синтез видимого зображення обличчя з теплового використовуючи кількох областей обличчя [10];
3. Синтез зображень обличчя видимого діапазону з зображень теплового використовуючи генеративні змагальні мережі [11];
4. Глибинне перцептивне співставлення для крос-модального розпізнавання обличчя [12];
5. Навчання спільного представлення для гетерогенного розпізнавання обличчя [13];
6. Впорядкований дискримінаційний метод спектральної регресії для гетерогенного розпізнавання обличчя [14].

Задача всіх вище зазначених методів полягає в том, щоб синтезувати зображення обличчя у видимому спектрі, використовуючи зображення створені у

тепловому спектрі. Також, всі ці дослідження відрізняються між собою тим, що використовують різні методи синтезу видимого зображення обличчя. Більш детально про кожен метод буде описано в Розділі 4.

Також, існує ще один метод для синтезу видимого зображення використовуючи поляриметричні зображення обличчя. Цей метод називається словниковим навчанням ознак. Полягає він в тому, що створивши відповідний навчений словник, можна відновити поляриметричне зображення обличчя, використовуючи розріджене відновлення [15].

Після того, як було отримане синтезоване зображення необхідно провести попередню обробку, для підготовки даних перед використанням їх в моделі розпізнавання обличчя. Існують різні методи цифрової обробки зображення, які використовуються в залежності від поставленої задачі. В даній роботі будуть розглядатись такі види цифрової обробки обробки:

1. Виконання фільтрації низьких та високих частот
2. Виділення країв зображення
3. Дескриптор ознак гістограми напрямлених градієнтів (англ. *histogram of oriented gradients*, HOG) [16]
4. Детектор лінійних сегментів [17]

Отримавши синтезоване зображення і виконавши попередню цифрову обробку, є змога у точному розпізнаванні цього обличчя, використовуючи різні типи моделей розпізнавання обличчя.

1.4 Висновки до розділу

Системи спостереження набувають все більшого використання в різних галузях. Розвиток технологій дає змогу створювати все складніші і ефективніші

системи відеоспостереження. Використання ТС надає можливості для спостереження за об'єктами у нічний час або в місцях з поганим освітленням. А використання ще й поляриметричних тепловізорів надає набагато більше інформації ніж звичайні ТС.

Також, розвиток комп'ютерних технологій та такого наукового напрямку, як цифрова обробка зображень, надає можливість у створенні систем розпізнавання обличчя, навіть для поляриметричних ТС які працюють у ІЧ діапазоні. Завдяки різним методам обробки зображень, ми маємо змогу синтезувати зображення обличчя у видимому діапазоні, використовуючи зображення зроблені в ІЧ спектрі.

В даному розділі, було розглянуто явище поляризації, методи обробки поляризаційної інформації. Також оглянуто різні принципи поляриметричних ТС, їх архітектури. На основі розглянутого буде обрано камеру, яка найбільш підходить для виконання поставлених задач.

Також, була описана теорія та розглянуто різні види цифрової обробки. Зазначені дослідження, які проводилися для гетерогенного розпізнавання обличчя, та різні методи попередньої цифрової обробки зображень. На основі цього буде обрано основний напрям та метод цифрової обробки зображення, проведено дослідження та порівняння.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

Поляриметричне зображення надає додаткову інформацію про сцену. Ця додаткова інформація може бути використана для покращення виявлення цілі та ефективності систем розпізнавання. Така інформація особливо цінна для розрізнення слабких сигнатур цілей порівняно з їх оточенням, тому явище поляризації має зростаючий інтерес для сучасної військової техніки і для систем спостереження.

Однак вилучення поляризаційного зображення додає складності з точки зору конструкції фізичного датчика. Для поляриметрів зображення зазвичай потрібно отримати чотири зображення однієї сцени в різних поляризаційних орієнтаціях, а це несе за собою необхідність додавання спеціальної обробки даних.

Ці труднощі вводять обмеження продуктивності системи з точки зору часової та просторової роздільної здатності, а також мають супутні погіршення, пов'язані з використанням додаткових оптичних компонентів. Також не треба забувати про питання, пов'язані з конструкцією, її надійністю та вартістю.

Що стосується обробки поляриметричних даних, потрібна точна реєстрація та калібрування для вилучення незначних поляризаційних сигнатур, які зазвичай зустрічаються в природних сценах. Поляриметричні зображення потім повинні бути оброблені, що висуває додаткові вимоги до розробки програмного забезпечення та системного процесора.

Отже, важливо, щоб був проведений аналіз, знайдені компроміси які давали б оптимальний приріст продуктивності і мали розумні фінансові і виробничі затрати.

В цьому розділі розглядаються можливості поляриметричних систем. Розглянуті різні архітектури систем. Також, у розділі 2 розглядаються оптимальні фінансові затрати, де реальні експлуатаційні переваги поляриметра порівнюються з їх впливом на вартість, розмір, вагу та потужність. Також наведено огляд базових

фізичних архітектур, у якому висвітлено переваги та обмеження різних конструктивних рішень поляриметрів.

2.1 Фундаментальні архітектури поляриметричних систем

Існує багато різних конфігурацій камер для створення поляризаційних зображень, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Однак поляриметри зазвичай поділяються на чотири основні архітектури, які базуються на методі, за допомогою якого формуються зображення з різною орієнтацією поляризації [18]:

1. Поділ часу
2. Поділ амплітуди
3. Поділ апертурної діафрагми
4. Поділ фокальної площини

2.1.1 Архітектура на основі поділу часу

Архітектура на основі поділу часу є, однією з найпростіших. У цій схемі інформація про поляризацію генерується послідовно (з поділом у часі) за допомогою обертового поляризатора або хвильової пластини. Обертання фільтра можна застосовувати вручну або за допомогою моторизованого етапу обертання фільтра, а поляриметрична постійна часу відповідає періоду, протягом якого чотири зображення сцени захоплюються під різними кутами поляризатора. Такий підхід простий у реалізації та має низьку вартість, що робить його ідеальним для початкового збору даних та досліджень оцінки технологій [19][20].

Основним недоліком схеми поділу часу є те, що будь-яке переміщення сцени за постійну часу призведе до потенційних поляриметричних помилок. Також, ще одним недоліком є те, що будь-який рух датчика протягом постійної часу також призведе до помилок поляризації, які можна виправити лише за допомогою обробки та вирівнювання зображення. Ступені механічного обертання зазвичай обмежуються діапазоном від кількох до 100 Гц. Альтернативним підходом до використання механічного обертання є використання хвильових пластин, показники заломлення яких контролюються електронним способом. Як правило, вони засновані на світлокристаличних приладах.

Необхідно також враховувати вплив поляризаторів на випромінювання, що проходить через систему. Для ідеального поляризатора, випромінювання, що проходить від неполяризованого джерела, становить 50%, але для реального поляризатора ця цифра зазвичай знижується до 40%. У випадку, коли ефективність системи обмежена перешкодами, сигнатури цілі та перешкоди будуть зменшені на однакові (або подібні) величини, що призведе до однакового співвідношення сигналу до перешкод (з англ. Signal to Clutter Ratio або SCR). Однак у випадку, коли ефективність обмежена шумом, співвідношення сигнал/шум (з англ. Signal to Noise Ratio або SNR) буде знижено.

Найбільш розповсюдженою будовою архітектури поділу амплітуди є конструкція з обертовим поляриметром, який знаходиться перед камерою. Як вже зазначалось, існують конструкції з використанням хвильових пластин, показники заломлення яких контролюються електронним способом, для таких конструкцій обертовий механізм не потрібен, але і ціна таких пластин немала, тому найчастіше використовують конструкцію з обертовим поляриметром. Приклад такої схеми можна побачити на рис. 2.1.

Дана схема складається з поляриметричної пластинки, яка обертається, використовуючи двигун, контролера, який посилає команди на обертання та фіксує поточний кут, та камери, у нашому випадку інфрачервоного діапазону, так як розглядається поляриметрична тепловізійна система [20].

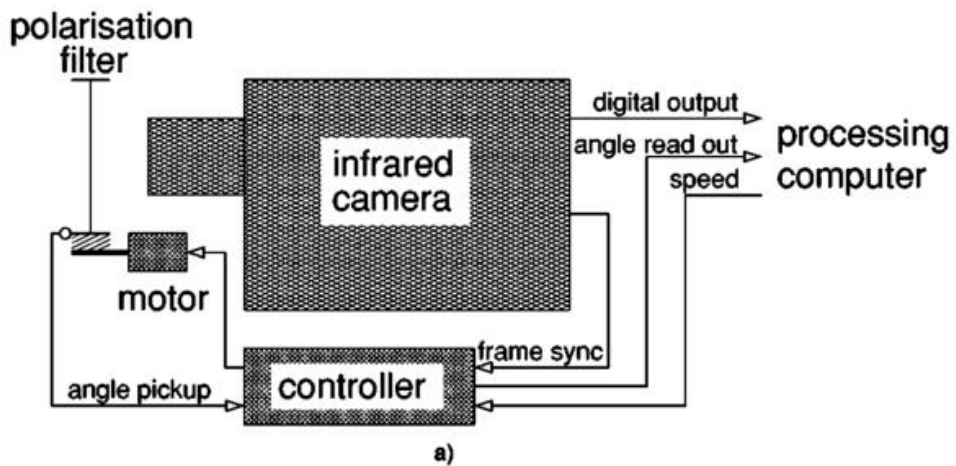


Рисунок 2.1. Конструкція поляриметричного тепловізора, з обертвим механізмом поляриметричної пластини

Задача контролера полягає в тому, щоб синхронізувати обертання поляризаційного фільтра з кадровою синхронізацією камери. Для кожного повороту фільтра, між 6 та 60 кадрами відбувається синхронізація кадрів камери, так як повороти фільтра нестабільні. Ще однією особливістю контролера є налаштування швидкості повороту пластинки.

Також, в таких схемах часто замість одного поляризатора використовують колесо з набором різних поляризаторів для різних кутів поляризації та типів поляризації. Приклад такого колеса можна побачити на рис. 2.2. Така схема відрізняється від схеми на рис. 2.1 тільки типом поляриметричної пластинки, а в іншому, принцип роботи абсолютно однаковий.

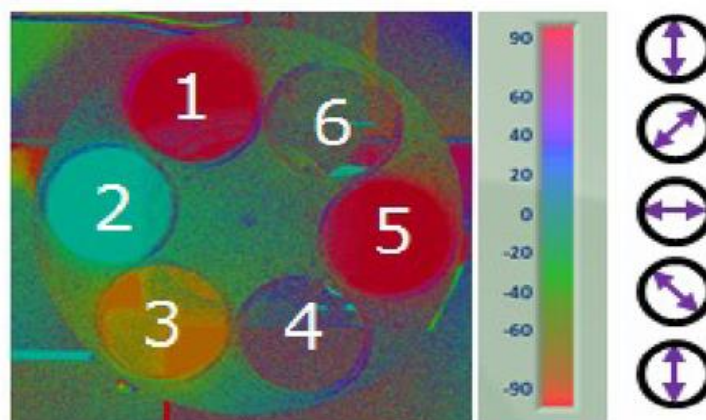


Рисунок 2.2. Колесо з набором різних пластин

На рис. 2.2, позиції від 1 до 3 відповідають положенням пластин поляризатора з різною орієнтацією. Позиції 4 і 6 відповідають тестовому положенню, де немає поляризаційних елементів. Позиція 5 відповідає положенню пластини еліптичної поляризації [19].

Архітектура на основі поділу часу є дуже простою у виготовленні та дешевою, порівняно з іншими архітектурами. Але головним її недоліком є низька частота кадрів. Справа в тому, щоб отримати одне поляриметричне зображення, необхідно зробити 4 таких зображення, для різних кутів поляризації ($0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$), а для отримання таких зображень необхідно виконувати поворот фільтру, тому така система повільніша більш ніж в 4 рази порівняно з іншими поляриметричними камерами. Більш того, сам поворотний механізм не є надійним і інколи можна отримати зіпсоване зображення.

Існують різні способи вирішення цієї проблеми. Розглянемо один з методів. Нехай один поляриметричний кадр складається з 4 кадрів, для різних кутів поляризації: $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$. Якщо робити по черзі кожен кадр за проміжок часу dt , то отримання одного поляриметричного кадру займало б час $4dt$. Це дуже повільно, тому є пропозиція замість того, щоб робити один поляриметричний кадр з 4 нових кадрів, при кожному разі коли робиться кадр для одного із кутів поляризації, доповнювати його кадрами інших кутів з минулого поляриметричного кадру. Порівняння цих двох методів, можна побачити на рис. 2.3 [19].

Використовуючи цей метод, система поляриметра з архітектурою поділу часу може отримувати дані з тією ж частотою кадрів, що й сама камера. Але все ж таки залишаються затримки, так як поворот поляриметра теж займає деякий час, тому картинка все ще залишається повільною. Також інколи зображення може бути зроблене в момент повороту, що теж псує інформацію на зображенні.

Тому для систем спостереження дана архітектура не є підходящою, так як для таких систем необхідно отримувати поляриметричні зображення з високою частотою та якістю, щоб мати якомога більший набір даних у високій якості. Також, така

система має великі розміри і не дуже зручна для перенесення та монтування в місцях спостереження.

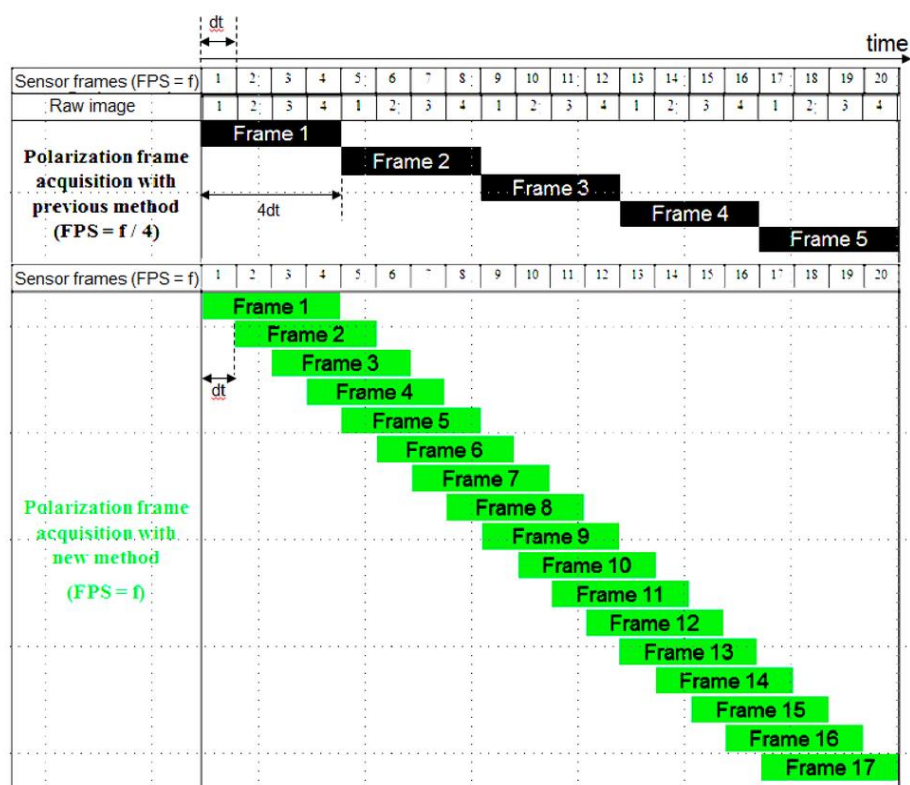


Рисунок 2.3. Порівняння запропонованого методу отримання поляриметричних кадрів

2.1.2 Архітектура на основі поділу амплітуди

Для поляриметрів заснованих на архітектурі поділу амплітуд, амплітуда падаючого випромінювання ділиться за допомогою світло-розділювачів або решіток для формування чотирьох зображень сцени на чотирьох різних площинах зображення. Кожна площина зображення відповідає різній орієнтації поляризації, і зазвичай для захоплення зображення використовуються чотири камери [21].

Основна перевага поділу амплітуди полягає в тому, що чотири поляризаційні зображення записуються майже одночасно (залежно від синхронізації зчитування

камери), і це долає проблеми пов'язані з рухом датчика протягом постійної часу, яку ми зустрічаємо в архітектурі на основі поділу часу.

Однак системи на основі поділу амплітуди вимагають використання дільників променя, що призводить до додаткових втрат енергії, а також потребує додаткових камер. Ці фактори можуть призвести до погіршення співвідношення сигнал/шум (SNR), величина якого залежить від втрат і характеру шуму (наприклад, шум випадкових фотонів, шум детектора, а також залишковий шум фіксованого шаблону від кожного детектора). Також така архітектура поляриметрів потребує більшого об'єму та більшої термічної/механічної стабільності, що може бути проблематичним для багатьох практичних застосувань.

Один з прикладів таких оптичних схем з архітектурою поділу амплітуди є схеми з використанням світлоділильної решітки, яка розташована під кутом 45 до оптичної осі, та розділяє промінь на той що відбився та пройшов через сітку. Таким чином, ми отримуємо два поляризаційні зображення з кутами поляризації 0 та 90. Ці зображення фіксуються двома камерами відповідно.

Але для отримання вектору стоса необхідно чотири зображення для чотирьох кутів поляризації, тому для отримання поляризаційного зображення з кутами поляризації 45 та 135, виконується поворот світлоділильної решітки на 90, тим самим решітка встановлюється під кутом -45 до оптичної осі [21].

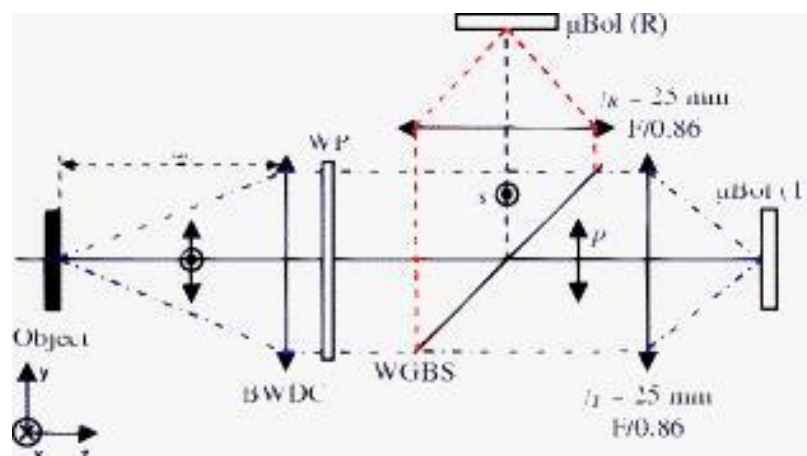


Рисунок 2.4. Схема системи на основі архітектури поділу амплітуди

Архітектура на основі поділу амплітуди, також не дуже підходить для систем спостереження. Перш за все, розглянута архітектура вимагає мінімум дві камери, а для ТС, це є дуже дорого, так як ціна однієї тепловізійної камери дуже висока. Також, ця система, через свою конструкцію, має дуже великі розміри та велике споживання енергії, що робить її не дуже зручною для використання в системах спостереження. Ще один недолік, це поворотний механізм світлоділительної решітки, як вже розглядалось раніше, такі системи мають низьку частоту кадрів, але ця архітектура має більше FPS в порівнянні з архітектурою поділу часу.

2.1.3 Архітектура на основі поділу апертурної діафрагми

В оптичній системі є дві унікальні площини: апертурна діафрагма і польова. Через кожену точку польової діафрагми проходить випромінювання з кожної точки сцени. Блокування випромінювання в цій точці не впливає на поле зору датчика, а просто обмежує кількість енергії, що надходить до фокальної площини. Аналогічно, якщо випромінювання, що проходить площину апертурної діафрагми, розділити на чотири окремі канали, зображення в кожному каналі відповідатиме зображенню сцени. Це і є принцип архітектури поляриметра на основі поділу апертурної діафрагми, де чотири зображення зазвичай формуються в одній фокальній площині [22].

Дана архітектура є дуже компактною та може надавати одночасно поляризаційні зображення в різних орієнтаціях. Одним з обмежень цієї архітектури є те, що поле зору або просторова роздільна здатність менші порівняно з архітектурою поділу часу, оскільки чотири суміжні зображення сцени формуються на одній фокальній площині.

На рис. 2.5 зображено один із концептів ОС на основі архітектури поділу апертури.

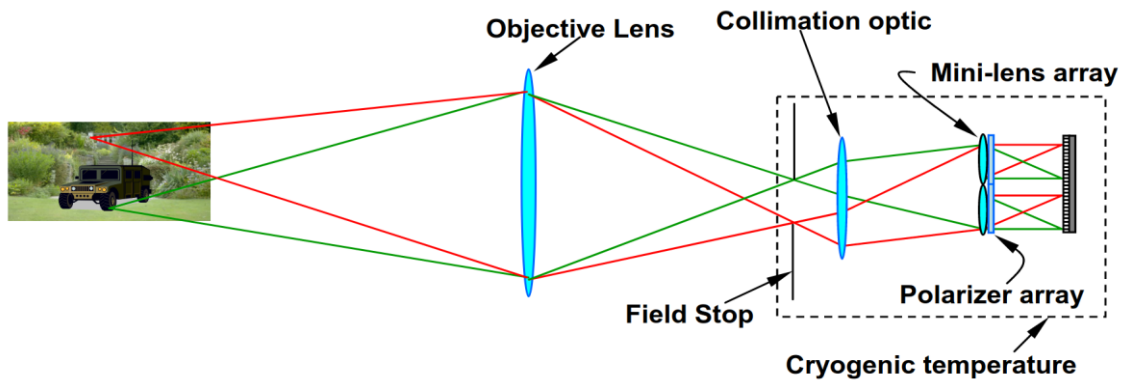


Рисунок 2.5. ОС на основі архітектури поділу апертурної діафрагми

Для формування зображення об'єкта на польовій діафрагмі використовується стандартний об'єктив камери. Польова діафрагма та ОС містяться всередині вакуумного приладу Дьюара. Колімаційна оптика формує зображення апертури лінзи об'єктива на матриці міні-лінз так, що світло, що падає на лінзу об'єктива, рівномірно розподіляється між чотирма елементами міні-лінзи. Кожен елемент міні-лінзи формує зображення об'єкта на ФРА. Поляризатор розміщується після кожної міні-лінзи для вимірювання різного стану поляризації на об'єкті. Для цієї конструкції поляриметра використовується набір із чотирьох лінійних поляризаторів під кутом 0, 45, 90 і 135 градусів. Крім того, для вимірювання станів кругової поляризації також можна використовувати інші поляризаційні елементи. Приклад зображення використовуючи розглянутий концепт можна побачити на рис. 2.6 [22].



Рисунок 2.6. Зображення, отримані використовуючи, камеру на основі архітектури поділу апертурної діафрагми

Архітектура поділу апертури показує дуже гарні результати. Використовуючи розглянуту ОС, можна отримати доволі якісні поляриметричні зображення. Також дана архітектура не має проблем з низькою частотою кадрів та синхронізацією отриманих поляризованих зображень для різних кутів поляризації, як було описано вище у архітектурах поділу часу та амплітуди, так як тут зображення для кутів поляризації 0, 45, 90 і 135 градусів отримується одночасно. Однак, такі ОС мають велику складність у виготовленні та проєктуванні. Також, ще одним недоліком таких ОС є те, що вони мають мале поле зору та роздільну здатність. Через це, ОС з архітектурою поділу апертурної діафрагми не дуже підходять для систем спостереження.

2.1.4 Архітектура на основі поділу фокальної площини

Наступний тип архітектури заснований на розподілі площини зображення, однак, на відміну від методу обмеження апертурної діафрагми, кожна позиція на фокальній площині відповідає певній позиції в сцені, і розділення вихідного сигналу приймача випромінення на чотири квадранти дасть чотири зображення, які не перекриваються. Але це не дає нормально результату для поляриметричної системи зображення. Однак, якщо сусідні пікселі у фокальній площині (зазвичай 2 x 2) сформовані в «комірці», тоді можна сформувані поляриметричне зображення, якщо кожен піксель у комірці чутливий до різних орієнтацій поляризації (рис. 2.7). Це називається поділом фокальної площини або мультиплексуванням фокальної площини. Пікселі матриці не чутливі до поляризації, тому маску зазвичай розташовують близько до фокальної площини, яка містить поляризаційні елементи в необхідних орієнтаціях, щоб дозволити комірці генерувати поляризаційне зображення [23].

На рис. 2.7 зображено приклад комірки (розміром 2x2) поляризаційної маски, яка складається з поляризаційних градок для різних кутів поляризації. Ця маска

розташовується перед FPA і тим самим кожен піксель матриці буде відповідати відповідному куту поляризації. А на рис. 2.8 зображено, як саме розташована ця маска на FPA, ширина ґратки 500 нм [23].

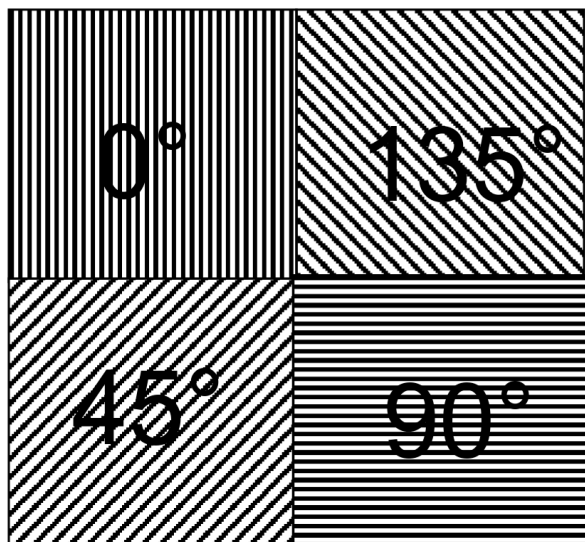


Рисунок 2.7. Приклад комірки перед пікселями FPA

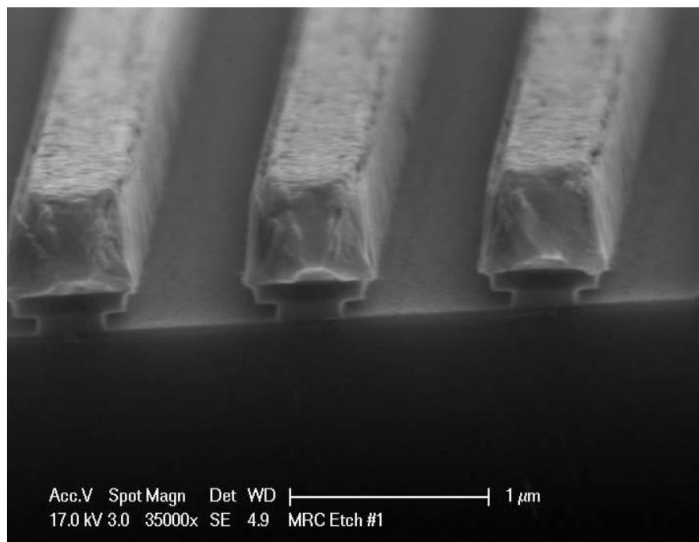


Рисунок 2.8. Зображення маски над FPA скануючого електронного мікроскопа

Архітектури поділу фокальної площини має багато переваг, таких як компактний розмір і фізичну міцність. Поляриметричні дані генеруються за мінімальний проміжок часу, і проблеми з реєстрацією зображень немає. Однак, щоб комірка створювала поляриметричну сигнатуру точки сцени, усі чотири пікселі повинні однаково відбирати отримане випромінювання. Іншими словами, функція розподілу точки зображення (з англ. Point Spread Function або PSF) повинна охоплювати всі пікселі в комірці, що призводить до втрат роздільної здатності зображення. Крім того, якщо центр функція розподілу точки зображення не знаходиться в центрі комірки, тоді будуть отримані помилки, і це буде найбільш суттєвою проблемою для точкових об'єктів і країв об'єкту на зображеннях, через що можуть бути згенеровані помилкові поляриметричні сигнатури.

Поляриметричні тепловізори побудовані на основі архітектури поділу фокальної площини підходять для систем спостереження. Використання цих камер значно спростить отримання поляриметричних зображень у ІЧ спектрі. Далі буде

розглянуто камеру Puxis, побудовану на основі цієї архітектури, описано її характеристики та сильні сторони. Також розглянуто приклад поляриметричних зображень обличчя в ІЧ діапазоні.

2.2 Puxis

Інфрачервоні поляриметричні датчики вимірюють не лише звичайну теплову інтенсивність цільової сцени, але й величину поляризації та орієнтацію площини поляризації. Вимірюючи один або більше параметрів поляризаційного еліпса, можна витягти деталі з цільової сцени, які не видно при використанні лише звичайних тепловізорів.

Для збору даних зазвичай використовуються лабораторні або прототипні системи з обмеженнями щодо допустимої кількості руху цілі або сенсорної платформи, і зазвичай потрібен підключений комп'ютер для збору та обробки даних. Тим не менш, продуктивність і чутливість невпинно покращуються, тоді як вимоги до розміру, ваги та потужності зменшуються, що дозволяє використовувати поляриметричні зображення для ширших або реальних застосувань.

У минулому ці вимірювання проводилися з використанням великих наукових інструментів, які не можна було використовувати в руках. Але розробка матриць інфрачервоних датчиків без охолодження призвела до значного зменшення розміру, ваги, потужності та вартості високоефективних поляриметричних датчиків, таких як пристрій, показаний на рис 2.9.

Puxis – поляриметр на основі мікроболометричної матриці, який створює поляриметричне відео в режимі реального часу зі звичайних, поляриметричних і злитих зображень. Поляризаційна маска інтегрована в оптичну систему тісно перед мікроболометричною матрицею, вона фіксує всі стани поляризації, завдяки чому, система стає несприятливою до артефактів руху датчика або сцени [26].



Рисунок 2.9. Поляриметр Рухіс з поляриметричною мікро матрицею, яка встановлена щільно перед мікроболометричною матрицею

Система працює від батареї, міцна і важить близько чверті фунта, і її можна встановити на шоломі або тримати в руках. Вбудована обробка зображення поляризації дозволяє оператору бачити поляриметричні сигнатури в реальному часі. Можливі як аналогові, так і цифрові виходи за допомогою сенсорного керування, доступного через інтерфейс планшета.

Інтенсивність і орієнтація інфрачервоного поляриметричного сигналу залежить від температури поверхні, орієнтації, шорсткості поверхні, властивостей матеріалу, кута до датчика, випромінювання неба та фонового випромінювання землі, що відбивається від цілі. Часто сигнатура поляризації, яка була створеної об'єктом спостереження часто відрізняється від навколишнього фону, і, що найважливіше, ця різниця часто присутня навіть тоді, коли сигнатура інтенсивності об'єкта знаходиться в тепловій рівновазі з фоном [24][25]. Іншими словами, ціль може бути абсолютно невидимою на зображенні зі стандартною інтенсивністю, водночас демонструючи сильну поляриметричну ознаку. Ця можливість покращеного захоплення цілей продемонстрована на зображеннях, наведених на рис 2.10.

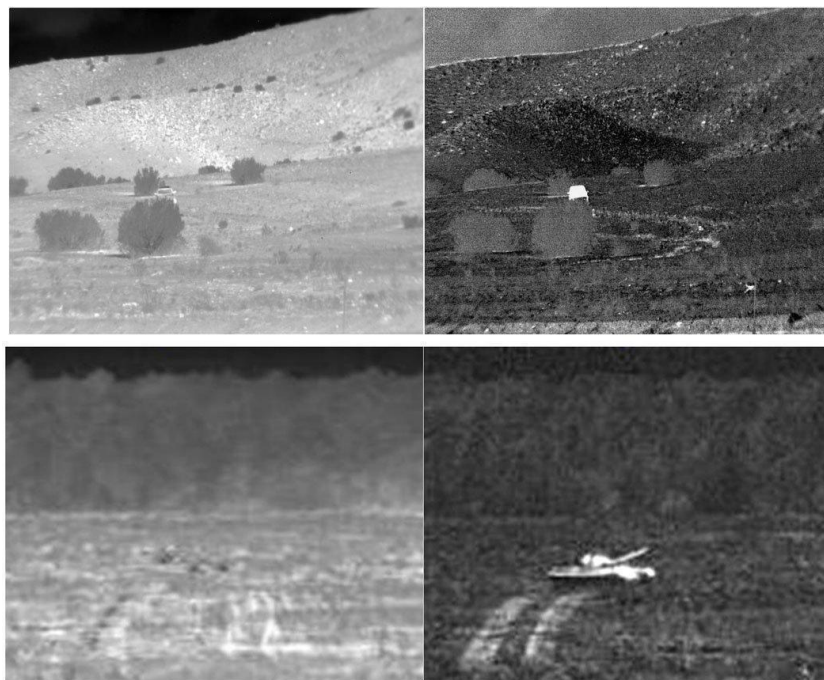


Рисунок 2.10. Порівняння зображень інфрачервоної інтенсивності (зображення з ліва) та інфрачервоних поляриметричних зображень (зображення з права) цільової сцени

Наведені зображення на рис.2 показують застосування переважно для військового використання. Однак завдяки портативному датчику з мінімальним допоміжним обладнанням можливість швидко та легко збирати дані в різноманітних ситуаціях дозволяє досліджувати інші аспекти інфрачервоної поляриметрії. Сюди входить виявлення нафти на воді, стеження за проїжджою частиною та виявлення краю дороги, а також відстеження пішоходів і транспортних засобів.

Поляриметричний тепловізор Рухіс заснований на архітектурі поділу фокальної площини. Цей тепловізор має поляризаційний масив (маска) приєднаний до ФРА прямо над пікселями сенсора в межах кількох мікрон. Для застосування в інфрачервоному випромінюванні піксельна поляриметрична матриця використовує ПЧ-підкладку, таку як кремній, германій або селенід цинку. Металевий шар наноситься на підкладку, а потім дротяна сітка витравлюється на металевому шарі за допомогою стандартних методів обробки напівпровідників, створюючи дротяну сітку. У Рухіс кремнієва підкладка, а металеві дроти виготовлені з алюмінію.

Поляризатори орієнтовані на 0° , 45° , 90° , 135° (зліва направо, зверху вниз, рис. 2.11) [26].

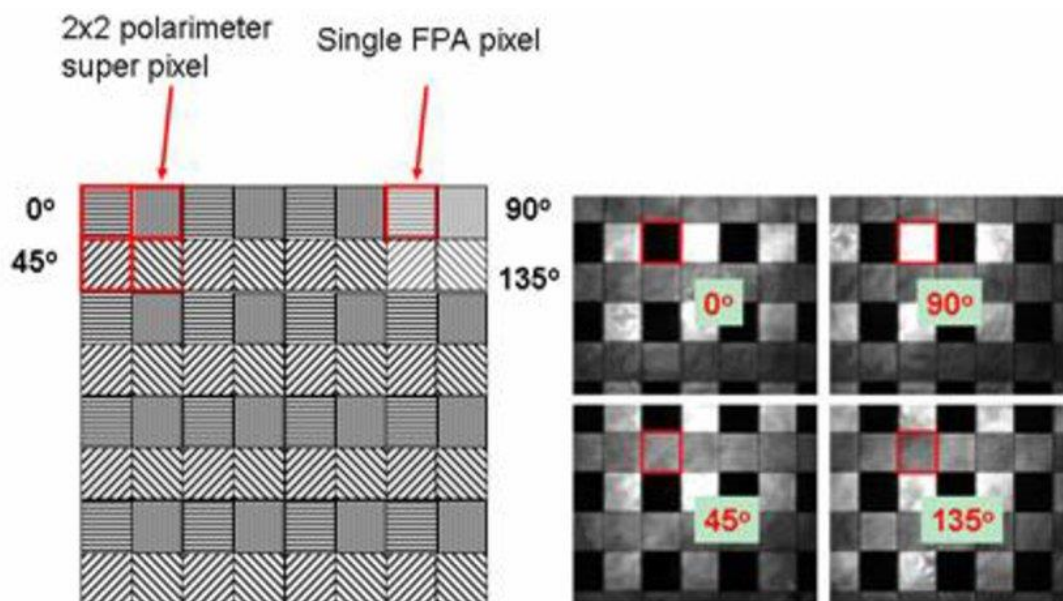


Рисунок 2.11. Поляризаційні елементи поляриметра з піксельним зображенням

На рис. 2.11 ліворуч показана схема матриці піксельних поляризаторів. Суперпіксель або, як зазначалось раніше, комірка складається з масиву 2×2 пікселів. Праворуч показано реакцію поляриметричної маски на лінійно поляризоване світло під кутом 90° . При падінні поляризованого світла з орієнтацією 90° , піксель з кутом поляризації 0° темний, 90° світлий, а поляризовані пікселі 45° та 135° сірі. Вимірний стан падаючої поляризації визначається на основі зваженої суми інтерпольованих пікселів. Важливо відзначити, що як теплові, так і поляризаційні зображення фіксуються з повною роздільною здатністю масиву – просторова роздільна здатність не втрачається [26].

Специфікації для Ruxis наведено в табл. 2.1. Зауважте, що параметри шуму передбачають використання об'єктива $f/0,85$, який є швидшим, ніж зазвичай використовують для роботи мікроболометра. Оскільки поляризатор має нижчу пропускну здатність для неполяризованого світла, втрата світла компенсується за рахунок використання швидшої лінзи [26].

Таблиця 2.1. Специфікація поляриметричного тепловізора Рухіс

| Характеристика | Значення |
|------------------------------------|--|
| Матриця | Мікроболометрична без охолодження |
| Діапазон хвиль, мкм | 7,5-13,5 |
| Крок пікселя, мкм | 17 |
| Роздільна здатність, Н×V | 640×512 |
| Частота кадрів камери, Гц | 7,5-30 |
| Рівень шуму температур, мК | < 50 |
| Рівень шуму ступеня поляризації, % | < 0.5 |
| Розмір без об'єктива, мм | 45,45×44,45×45,45 |
| Вага без об'єктива, г | 83 |
| Вхідна напруга, В | 5 |
| Потужність, Вт | 4-5,3 |
| Параметри об'єктива | 20 мм, f/0.85 25 мм, f/0.8650 мм, f/0.86 |

Розпізнавання обличь, використовуючи поляриметричні зображення, як вже зазначалось, є дуже перспективним напрямом цифрової обробки. Для таких задач необхідні спеціальні системи спостереження, які використовують відповідні поляриметричні тепловізійні камери. Тому камера Рухіс дуже гарно себе рекомендує, для використання її в таких системах, так як має мікроболометричну матрицю, яка не потребує охолодження, через що її розміри не великі. А її архітектура поляриметра робить цю камеру надійною та ефективною для отримання поляриметричних зображень. На рис. 2.12 показано порівняння зображення обличь, зроблених у видимому діапазоні, зроблених використовуючи звичайний тепловізор та камеру Рухіс (поляриметричний тепловізор).



Рисунок 2.12. Видиме (ліворуч), теплове інфрачервоне (у центрі) та ІЧ поляриметричне зображення (праворуч) обличчя

Як видно на рис. 2.12, поляриметричне зображення показує деталі навколо очей, носа та рота з чіткістю, що наближається до видимого зображення.

2.3 Висновки до розділу

В розділі 2 було розглянуто принципи побудови та роботи поляриметричних тепловізорів. Наведені 4 основні архітектури поляриметрів: поділу часу, амплітуди, апертурної діафрагми та фокальної площини. Також було показано приклади ОС поляриметричних тепловізорів для кожної розглянутої архітектури. Проведено порівняння між собою цих архітектур та наведено плюси та мінуси, щодо використання поляриметрів відповідної архітектури у системах спостереження для розпізнавання обличь. Як результат підходящою, для виконання поставлених задач, є архітектура на основі поділу фокальної площини, так як в ній немає проблем в одночасному отриманні зображень для різних кутів поляризації, дана камера є надійною та компактною завдяки своїм архітектурним особливостям. Також, було оглянуто конкретну камеру, яка побудована на основі обраної архітектури, наведені її характеристики та показаний приклад її використання для отримання поляриметричних зображень обличь. Дана камера дуже гарно підходить для виконання поставлених задач.

РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

3.1 Основи поляризації світла

Поляризація є загальновідомою властивістю світла, властивості поляризаційного зображення не залежать від інтенсивності. Інформацію такого зображення можна використовувати як додатковий спосіб для підвищення ефективності вилучення цілі, за умови, якщо існують поляризаційні відмінності між ціллю та її оточенням.

Для отримання поляризаційної інформації з випромінювання сцени необхідно маніпулювати в оптичному діапазоні, а для повного вимірювання стану поляризації зазвичай потрібна фазовий пластинка і поляризатор, причому фазова пластинка дозволяє вимірювати кругову поляризацію сцени, а поляризатор дозволяє вимірювати лінійну поляризацію [27]. Поєднуючи ці оптичні компоненти, сигнатура на приймачі випромінювання можна представити у вигляді наступної формули:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta) \cos(\varphi) + S_3 \sin(2\theta) \sin(\varphi)) \quad (3.1)$$

У формулі (3.1), θ – кут поляризації відносно осі x , φ – фазовий зсув, пов'язаний з хвильовою пластиною. S_0, S_1, S_2, S_3 – параметри Стокса, а разом вони називаються векторами Стокса. Перший з них, S_0 , відповідає інтенсивності, S_1 і S_2 забезпечують вимірювання лінійної поляризації, та останній параметр Стокса S_3 визначає ступінь кругової поляризації [28].

3.2 Поляризація в природі

Більшість природних сцен містять певний ступінь поляризації, яка спричинена взаємодією випромінювання із середовищем через розсіювання, відбиття або поверхневе випромінювання. Для видимого, ближнього інфрачервоного (NIR) та короткохвильового інфрачервоного (SWIR) діапазонів хвиль у випромінюванні сцени денного світла домінує відбиття сонячного випромінювання, тоді як вночі воно визначається сигнатурою Місяця, джерелами штучного світла та сьйвом повітря.

У більшості випадків можна припустити, що джерела випромінювання неполяризовані і що поляризація вводиться через відбивання сцени. Тому рівень поляризації визначається орієнтацією та площиною кожної поверхні в межах сцени. Для теплового випромінювання в інфрачервоному діапазоні сигнатура поляризації подібним чином визначається на поверхні об'єкта і також залежить від межі поверхні.

Також, у більшості випадків, штучні об'єкти мають гладкіші поверхні, ніж ті, що зустрічаються в природі, і згодом мають більший ступінь поляризації. Сигнатура поляризації також залежить від типу матеріалу поверхні розсіювання, що генерують різні поляризаційні характеристики.

Проходження світла через атмосферу також впливає на стан поляризації кількома способами. По-перше, розсіяне сонячне випромінювання може бути поляризованим залежно від геометрії спостереження. Така поляризація є максимальною в умовах ясного неба і зменшується з хмарним покривом, оскільки сонячне випромінювання стає більш розсіяним. Відстань від сцени до датчика також може зменшити величину поляризації через ефект розсіювання та випромінювання на шляху.

У поляризованому випромінюванні, яке спостерігається в більшості природних сцен, переважає лінійна поляризація, а рівень кругової поляризації в більшості випадків незначний [30][31]. Тому ступінь кругової поляризації можна ігнорувати

прирівнявши третій параметр Стокса до нуля $S_3 = 0$. Таке припущення значно спрощує формулу (3.1), як результат маємо [32]:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta) \cos(\varphi)) \quad (3.2)$$

Як видно з формули (3.2), головними залишаються такі параметри Стокса, як S_0 – ступінь інтенсивності, S_1 і S_2 – ступінь лінійної поляризації [33].

3.3 Вимірювання поляризації

Як вже було розглянуто, рівняння (3.1) можна спростити ігноруючи ступінь кругової поляризації, так як вона є не значною в природніх сценах. Також, для вирішення рівняння (3.2), необхідно закріпити фазовий зсув, хвильової пластини, прирівнявши його до нуля, $\varphi = 0$. Це теж дуже спростить рівняння (3.2), після чого вирішення даного рівняння стає можливим, так як функція залежить лише від зміни кута поляризації:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta)) \quad (3.3)$$

Для знаходження параметрів Стокса S_0 , S_1 , S_2 можна виміряти інтенсивність, за допомогою поляризатора, принаймні під трьома різними кутами. Тому використовуємо чотири різні кути поляризатора 0 , $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$ [31]. Використавши даний підхід, можна отримати параметри Стокса, розв'язавши рівняння (3.3) з даними кутами поляризації:

$$\begin{cases} S_0 = I_0 + \frac{I\pi}{2} \\ S_1 = I_0 - \frac{I\pi}{2} \\ S_2 = \frac{I\pi}{4} + \frac{I3\pi}{2} \end{cases} \quad (3.4)$$

Як результат, рівняння (3.4) показує, що вектор S_0 еквівалентний інтенсивності падаючого потоку, тоді як S_1 і S_2 відповідають лінійній поляризації світла. У деяких

випадках S_0 можна обчислити шляхом додавання всіх чотирьох зображень, і це зменшить вплив шуму. Однак можуть виникнути потенційні помилки реєстрації, які зведуть нанівець переваги зменшення шуму.

Інформацію про поляризацію можна визначити в локалізованих точках (або комірках) у межах зображення, і, отже, поляриметр можна використовувати для створення зображень (S_0 є зображенням інтенсивності, а S_1 і S_2 – поляризованими зображеннями). Тому в одній спектральній смузі поляриметрична камера створює набір різних зображень, які можна комбінувати різноманітними способами. Коли доступно кілька спектральних смуг, потенційний набір зображень стає набагато більшим, і необхідний розсудливий відбір даних.

Для опису ступеню поляризації сцени використовуються дві стандартні міри. Перший з них – це ступінь лінійної поляризації (з англ. Degree of Linear Polarisation, або DoLP), який визначається коренем суми квадратів параметрів лінійної поляризації S_1 і S_2 , нормалізований за інтенсивністю S_0 :

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (3.5)$$

Друга міра визначає напрям кута орієнтації лінійної поляризації та називається кутом лінійної поляризації (AoLP):

$$AoLP = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (3.6)$$

Ці дві міри DoLP (5), і AoLP (6), можуть бути сформовані як зображення.

У природних сценах рівень поляризації низький, і це може викликати помилки як у DoLP, так і в AoLP. Для останнього поділ одного малого числа на інше (з можливістю зміни знаку) може генерувати значення AoLP у великому кутовому діапазоні, і це може виглядати як шумовий шаблон. DoLP, згідно з його визначенням у рівнянні (3.5), не страждає від тієї ж проблеми, що й AoLP, і було встановлено, що таке зображення загалом є більш корисними для обробки. Однак шум на зображеннях S_1 і S_2 додає квадратуру, що призводить до зміщення шуму в зображенні DoLP для

низьких рівнів поляризації [34][35]. Тому важливо правильно підібрати нижню межу порогу, щоб зрештою обмежить чутливість для виявлення цілі.

3.4 Поляризаційні залежності

Поляризація, як правило, створюється за допомогою інтерактивних процесів, таких як розсіювання, відображення або теплове випромінювання, завдяки чому результуюча амплітуда хвилі стає переважно зміщеною в одному напрямку. Повсякденні приклади цього включають поляризацію неба при спостереженні за ясних умов і поляризацію світла, відбитого від води [28].

Як зазначалося раніше, штучні створені людиною об'єкти мають тенденцію генерувати більш високі рівні поляризації, ніж природні сцени, через відносну площину розширених поверхонь у поєднанні з властивостями цільових матеріалів (включно з фарбою та іншою обробкою поверхні) [36]. Однак сигнатура поляризації також залежить від орієнтації поверхні об'єкта відносно датчика, і це вносить потенційно невідому мінливість поляриметричної сигнатури [29].

Справжні цілі, як правило, містять кілька поверхонь у різних орієнтаціях відносно приймача спостереження та часто виготовляються з різних матеріалів із різною обробкою поверхні. Якщо цільова структура та деталі орієнтації не відомі заздалегідь, поляриметрична сигнатура буде невизначена і підлягатиме потенційним варіаціям. Крім того, видима структура цілі буде змінюватися, оскільки різні області цілі створюють різні поляриметричні ознаки. Для більшості військових застосувань інформація про структуру та орієнтацію цілі дуже обмежена або взагалі відсутня, і це призводить до неможливості визначити поляриметричні сигнатури спостережуваного об'єкта.

Поляриметрична сигнатура також має спектральну залежність як у межах спектральної смуги, так і між спектральними смугами. Перше зумовлене насамперед

варіаціями довжини хвилі властивостей матеріалу, тоді як останнє включає вплив різних фізичних явищ, які генерують випромінювані сигнатури всередині сцени.

У видимій спектральній смузі зображення формується відбиттям сонячного світла від елементів сцени. Однак у спектральному діапазоні довгохвильового інфрачервоного випромінення сигнатура зумовлена тепловим випромінюванням від елементів сцени. У цьому випадку за допомогою закону Кірхгофа можна показати, що напрямок амплітуди поляризації від даної поверхні ортогональний напрямку світла, відбитого від тієї ж поверхні. У діапазоні середньохвильового інфрачервоного випромінення, як відбите, так і випущене випромінювання вносять свій внесок у загальну поляриметричну сигнатуру, і через ортогональність поляризаційних членів вони можуть протистояти один одному за певних умов, що призводить до зниження загального рівня поляризації [36].

3.5 Обробка поляриметричних односпектральних даних

Різні архітектури для поляриметричних тепловізорів, які обговорювалися в розділі 2, явно складніші та дорожчі, ніж звичайна (не поляриметрична) камера. Важливо визнати, що цей недолік прийнятний, лише якщо приріст продуктивності є досить значним з точки зору конкретних експлуатаційних вимог.

Очевидно, що поляриметричні датчики вимагають іншої та складнішої обробки, ніж більш звичайні камери. Складність полягає як в розробці алгоритму, так і в його реалізації на апаратному рівні. Також, в межах, де сцена не містить поляризаційної інформації, поляриметричний датчик повинен мати такі ж можливості, як і звичайний датчик. Досягнення такого витонченого зближення є складним завданням.

Розглядається обробка односпектрального датчика, де було згенеровано чотири зображення під чотирма різними кутами поляризації (0° , 45° , 90° , 135°). Це часто

називають поляриметром часткового Стокса, оскільки вважається, що компонент кругової поляризації є незначним. Етапи обробки, необхідні для отримання поляриметричної інформації, показані на рис 3.1.

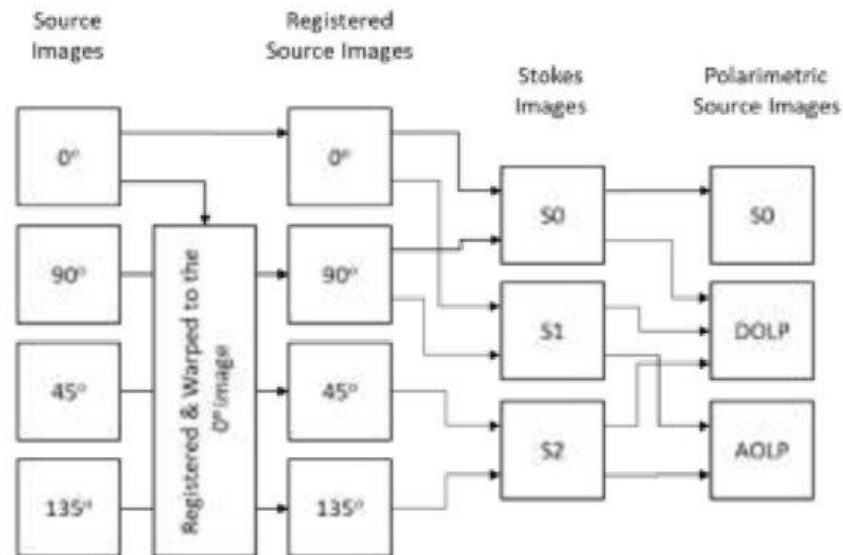


Рисунок 3.1 Етапи обробки для створення поляриметричних вихідних зображень

На рис. 3.2 можна побачити процес створення поляриметричних вихідних зображень який був проілюстрований на рис 3.1. На рис. 3.2 показано тестове зображення (а) разом із відповідними Стоксовими та поляриметричними зображеннями на малюнках (b - h). На цьому зображенні яскравіші області поляриметричних зображень у відтінках сірого відповідають областям із вищим вмістом поляризації, в цьому випадку ці області знаходяться на транспортному засобі. Для кольорового зображення області найбільшої інтенсивності кольору відповідають областям найвищої поляризації. Можна побачити, що S_1 і S_2 дуже різні – це пов'язано з геометрією огляду, де відбитий кут поляризації на верхніх поверхнях максимізується в межах системи відліку S_1 [8].

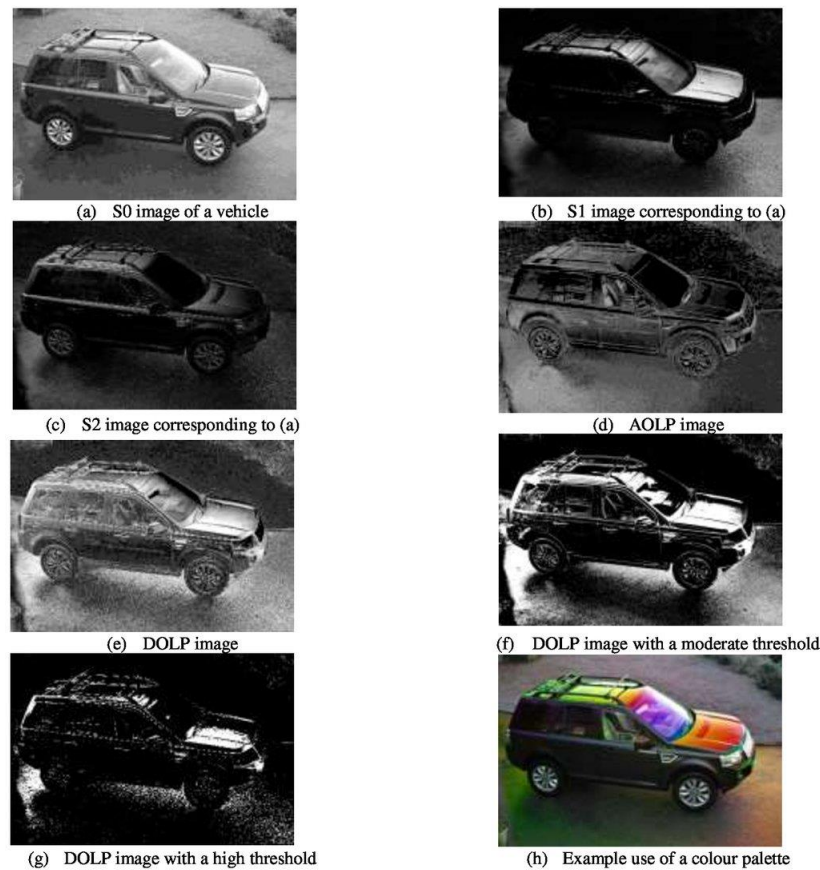


Рисунок 3.2. Стоксові та поляриметричні вихідні зображення

Можна також зазначити, що ущільнений асфальт також створює значну сигнатуру у S_1 , яку можна порівняти з незначною сигнатурою від трави та кущів на задньому плані. Зображення DoLP і AoLP поєднують інформацію з S_1 і S_2 , хоча зображення AOLP містить вищий рівень шуму в областях з низьким ступенем поляризації. Застосування простого порогового значення до зображення DOLP допомагає виділити ті області транспортного засобу, які створюють найбільшу поляриметричну сигнатуру. З цього очевидно, що поляриметрична сигнатура обмежена областями транспортного засобу і що ці області змінюються залежно від геометрії огляду [29]. Остаточне зображення (h) на рис 3.2 було отримано шляхом переведення зображень S_0 , DOLP і AOLP до RGB для формування поляриметричного кольорового зображення.

Поляриметричні зображення можуть бути згенеровані в сірому або кольоровому форматі. Це стосується як кольорових камер видимого діапазону, так і ІЧ камер. Для автоматизованих систем, відображення зображення неважливе,

оскільки колір не додає та не фільтрує інформацію про поляризацію. Однак використання кольору має значні переваги для оператора, роблячи поляриметричний вміст набагато більш очевидним, як це можна оцінити, порівнявши (e) і (h) на рис.3.2. Існує безліч різних кольірних схем, які, як правило, включають відображення параметрів кольірного простору на поляриметричних вихідних зображеннях (S_0 , DOLP, AOLP). Три приклади кольорових палітр, які широко використовуються: HSV, RGB і зображень у відтінках сірого. Оптимальна кольірна палітра, ймовірно, залежить від ряду факторів, таких як вміст сцени (слабкі кольірні палітри неефективні в складних і висококонтрастних сценах), умови освітлення дисплея та фону, а також уподобання оператора [8].

3.5.1 Накладення поляриметричних даних і покращення зображення

Замість того, щоб перетворювати поляриметричні дані в представлення кольірного простору, альтернативним і широко використовуваним підходом є накладання поляриметричної інформації на зображення S_0 . Щоб уникнути плутанини, зображення S_0 часто подається у відтінках сірого, а поляриметрична інформація – у кольорі. Як правило, встановлюється мінімальний поріг, нижче якого інформація про поляризацію ігнорується, а вище цього порогу – області поляризації вказуються за допомогою кольорового накладання. Поріг також корисний тим, що він зменшує спотворення зображення S_0 поляриметричним шумом. Приклад накладання поляриметричної інформації на зображення S_0 представлений на рис 3.3 для двох різних порогових рівнів на основі DoLP. Зауважте, що інформацію AoLP також можна використовувати для накладання та представляти її іншим кольором [8].

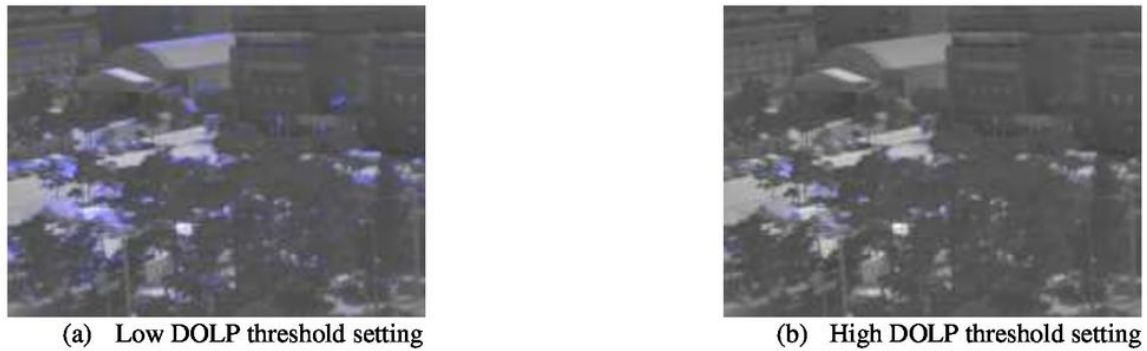


Рисунок 3.3. Зображення (ІЧ діапазон) S_0 автостоянки та будівлі з кольоровим накладанням поляризаційної інформації DoLP

Альтернативою накладанню є модифікація зображення S_0 за допомогою поляриметричних даних. Простим прикладом модифікації може бути встановлення пікселів зображення S_0 на насичення, коли вони збігаються зі значенням поляризації вище заданого порогу. У формулі (3.7) описано дану модифікацію, використовуючи зображення DoLP [8]:

$$I(x, y) = \beta \cdot S_0(x, y) \quad \text{if} \quad DoLP(x, y) < T_B \quad \text{else} \quad I(x, y) = 255 \quad (3.7)$$

де β визначає, скільки інтенсивності пікселя зображення S_0 зберігається в комбінованому зображенні, а T_B – це поріг рівня сірого. Зверніть увагу, що схема заміни також може бути встановлена залежно від просторового обсягу областей поляризації за допомогою додаткової сегментації та просторової фільтрації даних поляризації.

Модифікація зображення S_0 проілюстрована на рис. 3.4, на якому зображені автомобілі припарковані у сільській місцевості. Зображення зроблене в ІЧ діапазоні. Зображення S_0 містить чотири транспортні засоби, з яких два добре видно (але під різними кутами до камера), а два частково приховані природним оточенням. Відповідне зображення DoLP показано на малюнку (b). Зауважте, що три транспортні засоби створюють сильні поляриметричні ознаки (включаючи ті, що приховані деревами), тоді як поляриметричні ознаки одного транспортного засобу дуже слабкі та обмежені однією невеликою областю заднього лобового скла. Результати модифікації зображення показані на малюнках (c-e), де (d) є близьким до

оптимального налаштування для одного кадру зображення. На практиці оператори відображення можуть змінювати значення β . Також, на малюнку (f) показано схему заміни з $\beta = 1$, але з різними кольорами для S_0 і поляриметричних даних. Використання кольору є особливо ефективним і легким для інтерпретації [8].

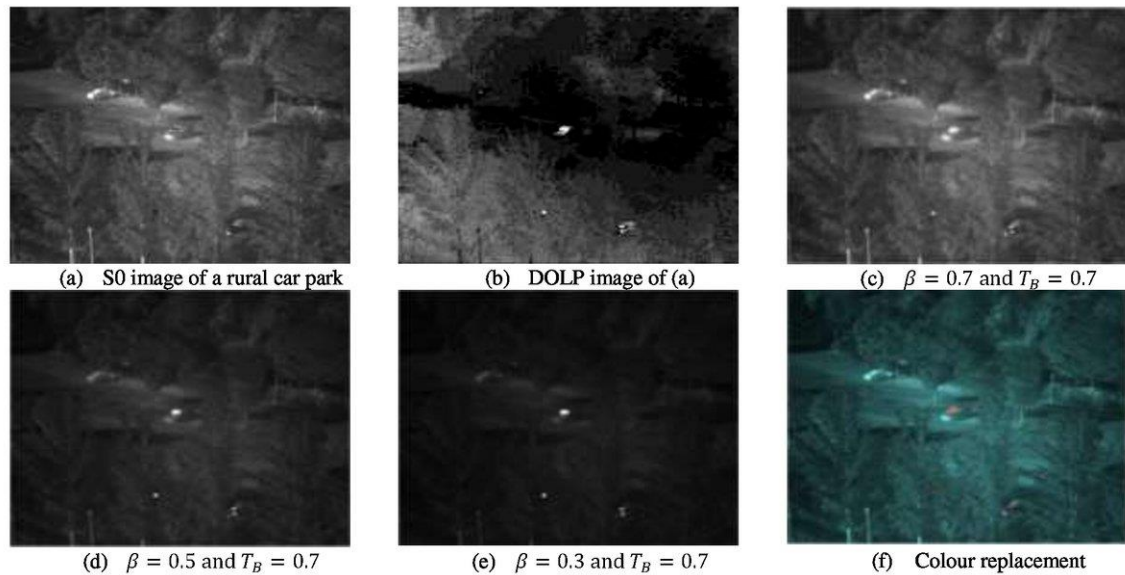


Рисунок 3.4. Модифікація зображення S_0 зображенням DoLP

Подальшим підходом до обробки поляриметричних даних є налаштування яскравості та контрастності зображення S_0 за допомогою інформації, отриманої із зображень DoLP або AoLP [37].

Один із прикладів функції посилення, заснована на функції помилок, де оброблене зображення S_0 задається по формулі:

$$S'_0 = \beta \cdot g_B \cdot S_0 + (1 - \beta) \cdot S_0 \quad (3.8)$$

де β змінюється між 0 і 1 і використовується для визначення збереження неполяризованої інформації із зображення S_0 , а коефіцієнт підсилення поляризації визначається як:

$$g_B = \text{erf}(\alpha \cdot (\text{DoLP} - T_B)) \quad (3.9)$$

де α є коефіцієнтом чутливості, а T_B — пороговим значенням рівня сірого, нижче якого підсилення дорівнює нулю.

Приклад функції підсилення показаний на рис. 3.5 для різних налаштувань α , β і T_B . Цей підхід є ефективним для виділення двох транспортних засобів, які не мають перешкод перед собою, але він менш ефективний для прихованих транспортних засобів за деревами, які мають нижчі сигнатури поляризації [8].

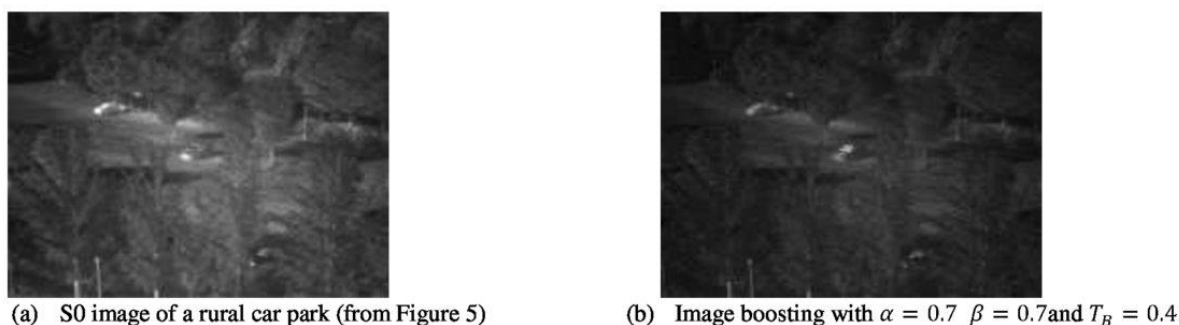


Рисунок 3.5. Підвищення контрастності зображення S_0 за допомогою поляриметричних даних

3.5.2 Методи злиття зображень

Одним із розповсюджених підходів обробки поляриметричних даних є використання методу злиття зображень, за допомогою яких S_0 і поляриметричні зображення поєднуються за допомогою набору логічних функцій. Одним із найбільш широко використовуваних методів злиття зображень для поляриметричної обробки є метод спільних компонентів, який спрямований на посилення відмінностей між поляриметричними вихідними зображеннями і усунення будь-якої спільної інформації. Спільний компонент визначається як оператор локального мінімуму між двома або більше зображеннями [38]. Приклад зображень створених методом спільних компонентів можна побачити на рис. 3.6.

Як видно на цих зображеннях, зроблених в ІЧ діапазоні, відображені чіткі радіометричні ознаки природнього оточення, завдяки вмісту води на сцені. Отже, оскільки велика частина цього природнього фону була неполяризованою, поляриметричні зображення містили значний рівень шуму. Що стосується

транспортних засобів, зображення DoLP містить сильні поляриметричні ознаки лобового скла. На зображенні (c) і (d) показано два зображення які були створенні, використовуючи метод злиття спільних компонентів, для першого використовувались поляриметричні дані S_0 і DoLP, а для другого використовувались S_0 , DoLP і AoLP. Злиті зображення, створені за допомогою S_0 , DoLP і AoLP, є досить шумним, головним чином через шум у зображенні AoLP [8].

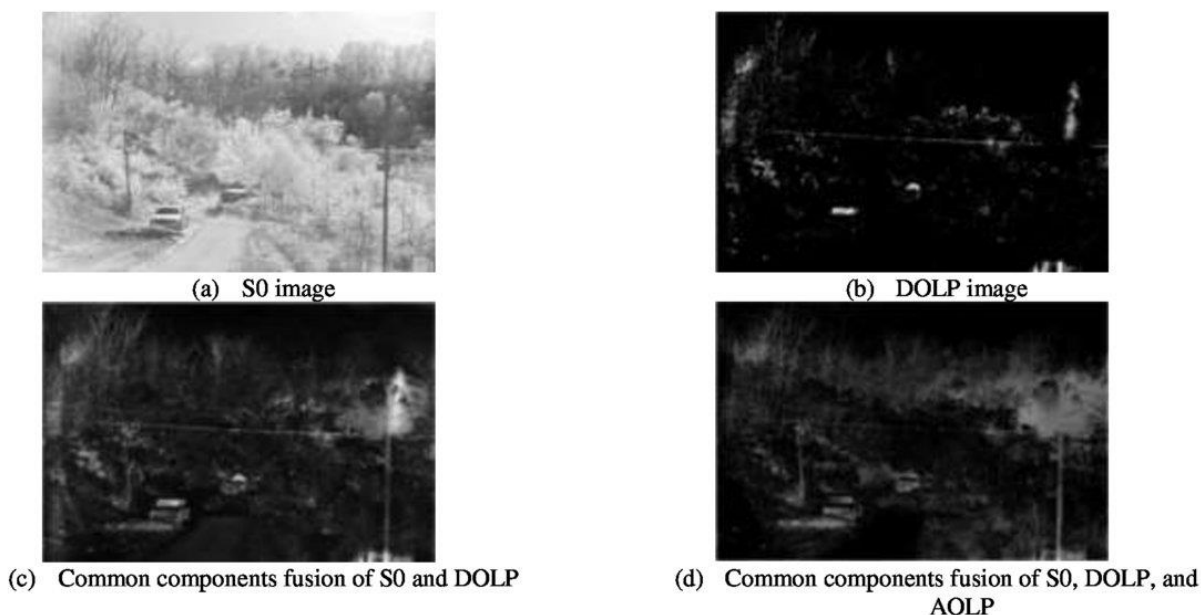


Рисунок 3.6. Зображення транспортних засобів на фоні природи

Існує низка альтернативних методів злиття зображень, включаючи піраміди багато-просторової роздільної здатності. У цьому випадку зображення S_0 , DoLP і AoLP об'єднуюватимуться за допомогою логічних правил із різною просторовою роздільною здатністю. Ці правила були розроблені, щоб максимізувати ознаки, доступні в усіх складових зображеннях (S_0 , DoLP, AoLP), одночасно зводячи до мінімуму шум, який зазвичай створюють дані AoLP.

Найстабільніший стабільним є використання піраміди Лапласа з правилом максимального значення та середньозваженим, розрахованим на користь зображення S_0 . В цьому випадку, спочатку поєднується піраміда Лапласа із зображеннями S_0 та DoLP. На зображенні AoLP усуваються шуми і потім виконується злиття AoLP із зображенням об'єднаних S_0 та DoLP.

Приклад злиття Лапласівської піраміди S_0 і зображення DoLP показано на рис. 3.7 (d). Також, на (b) і (c) проілюстровані зображення, отримані методом злиття спільних компонентів [8].

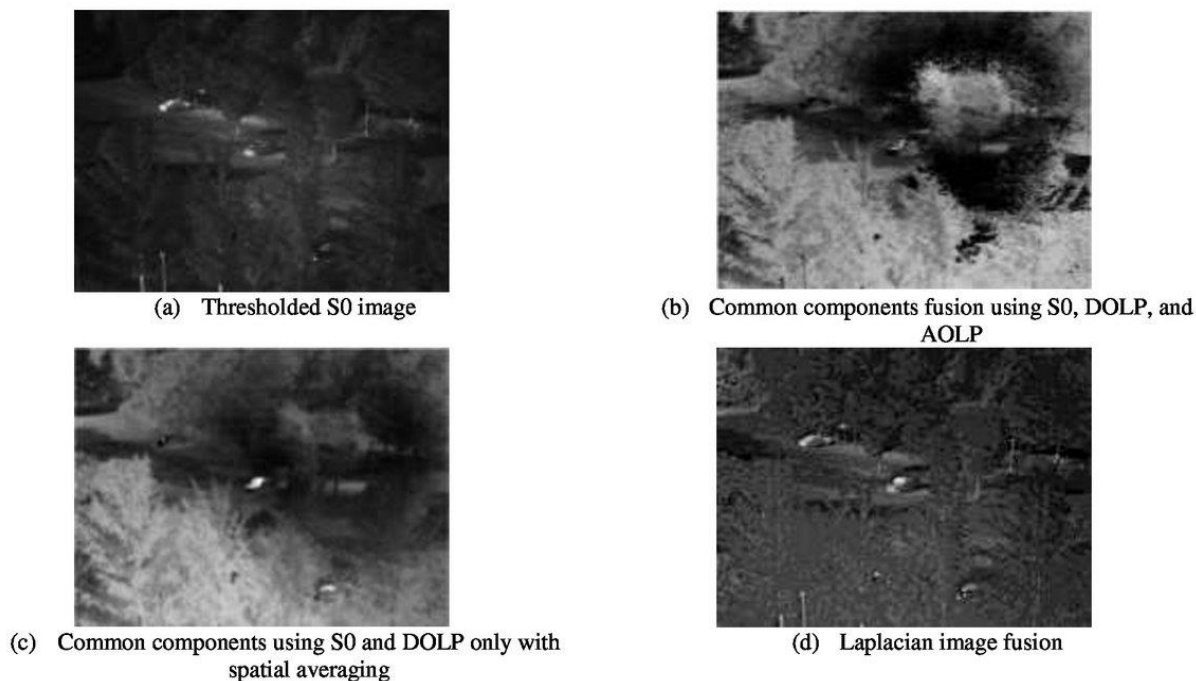


Рисунок 3.7. Зображення транспортних засобів на фоні природних шумів

3.6 Висновки до розділу

В цьому розділі було описано основи поляризації світла, та розглянуто це явище у природі. Також, було описано таке поняття, як вектор Стокса. Його використання є необхідним для обробки поляризаційної інформації. На основі розглянутої теорії було описано основні методи отримання зображень вектору Стокса. Також було визначені методи вимірювання поляризації світла, для цього використовуються такі ознаки, як ступень поляризації світла (DoLP) та кут лінійної поляризації (AoLP). На основі цих даних можна виконувати обробку поляриметричних даних. Методи обробки також були розглянуті в цьому розділі, та наведені приклади їх використання, використовуючи вже виконані дослідження, які були викладені в статті [8].

Метод накладання поляриметричних даних дає змогу підвищити якість та збільшити кількість корисної інформації. Також даний метод активно використовується для того, щоб зробити зображення більш інформативним та чистим для оператора.

Метод злиття зображень активно використовується для виділення основних об'єктів спостереження. Основною метою таких схем об'єднання зображень є об'єднання інформації про інтенсивність і поляризацію в одне зображення. Однак багато практичних сцен містять обмежену кількість поляризації, і процес злиття зображень призводить до отримання зображень з великою кількістю шумів. Щоб виправити це, необхідно ввести додаткові функції обробки, такі як порогове значення та просторове усереднення. У порівнянні з більш простими методами, злиття зображень у деяких випадках може бути гіршим для деяких даних сцени, тому використання цього методу вимагає ретельності.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧЬ

Цифрова обробка зображень зробила великий крок вперед за останні десятиліття. Раніше, ще в середині ХХ століття вся обробка зображень з камер виконувалась за допомогою аналогових методів, використовуючи відповідні оптичні прилади. Подібна методика досі важлива в оптиці – наприклад в голографії. Але завдяки різкому зростанню технологічного процесу та продуктивності комп'ютерів, методи, які базувались на аналоговій обробці, все більше і більше витіснялися обробкою зображень, використовуючи цифрові методи.

Цифрова обробка зображень зазвичай є набагато точною, гнучкою та надійною. Великим плюсом методів цифрової обробки зображення є простота реалізації, так як аналогові методи вимагали створення складних ОС, які зазвичай обмежувалися можливістю їх реалізації та ціною. У цифровій обробці зображень активно використовується спеціалізоване обладнання. Також, цифрова обробка зображень вимагає багатопроцесорні системи. Особливою мірою це стосується систем обробки відео.

Великого розвитку набули і системи розпізнавання обличь. Ці системи базуються на цифровій обробці зображення, так як без неї буде неможливо створити високоефективну модель, яка буде точно та швидко видавати бажаний результат. Чимало методів обробки зображень обличь вже набули широкого використання в системах розпізнавання обличь для систем спостереження, але коли йде мова про системи спостереження для нічного часу, то тут залишаються відкриті питання, щодо ефективних методів обробки зображень обличь.

Як вже зазначалось в попередніх розділах, для систем спостереження в нічний час необхідно використовувати відповідні тепловізійні камери. Але, через те, що зображення, створені в ІЧ діапазоні, мають обмежену інформацію про об'єкт спостереження, є необхідність у використанні саме поляриметричних тепловізійних

систем. Для прикладу ви можете побачити зображення обличь зроблених звичайним та поляриметричним тепловізором на рис. 4.1.

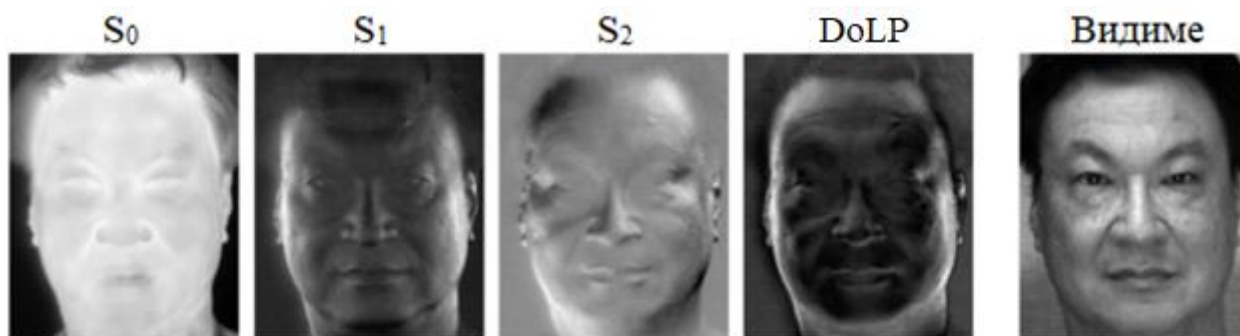


Рисунок 4.1. Приклад зображення S_0 , S_1 , S_2 , DoLP та зображення видимого діапазону

Як бачите зображення, які мають поляриметричні ознаки надає набагато більше інформації про об'єкт дослідження. З'являється можливість виділити такі деталі, як зморшки, контури обличчя, волосся. Тому величезним приростом ефективності роботи систем розпізнавання обличь в ІЧ діапазоні надають саме поляриметричні тепловізійні камери.

Як вже зазначалось у розділі 3, Для характеристики поляризаційного зображення використовують вектори Стокса S_0 , S_1 , S_2 , (формула 3.4). Параметри Стокса описують стан поляризації цілі, використовуючи інтенсивність поляризаційного світла із різними кутами поляризації I_0 , I_{45} , I_{90} , I_{135} . Так як на вхідних зображеннях немає штучного освітлення, то кругова поляризація відсутня, тому вектор S_3 не використовується. Також використовується ступінь поляризації DoLP (формула 3.5), який описує частину електромагнітної хвилі, яка є лінійно поляризованою [39].

Так як необхідно виконати розпізнавання обличь використовуючи поляриметричні зображення отримані в ІЧ діапазоні, виникає питання як само співставити зображення обличчя людини зроблене у видимому діапазоні та у ІЧ. Тому для створення моделі розпізнавання обличь в ІЧ діапазоні використовують наступний алгоритм, зображений на рис. 4.2.



Рисунок 4.2. Гетерогенне розпізнавання обличчя

На рис. 4.2 показано в загальному вигляді алгоритм гетерогенного розпізнавання обличчя. Гетерогенне розпізнавання обличчя (з англ. Heterogeneous Face Recognition або HFR) є однією з найскладніших областей досліджень біометрії та комп'ютерного зору. Головною метою є точне розпізнавання та ідентифікація обличчя зробленого у видимому діапазоні за допомогою зображень обличчя, отриманих за допомогою альтернативних методів, таких як зображення обличчя в ІЧ діапазоні. Як вже зазначалось поляризаційні зображення, на відміну від звичайних тепловізійних зображень, мають текстурні та геометричні деталі, що полегшує розробку алгоритму гетерогенного розпізнавання обличчя.

HFR ділиться на такі основні етапи:

1. Синтез зображень обличчя, використовуючи зображення зроблені у видимому та ІЧ діапазоні. Як результат отримуємо синтезовані зображення обличчя, які будуть мати між собою спільні ознаки, що значно спростить розпізнавання;
2. Виконання попередньої обробки, щоб підготувати зображення для моделі розпізнавання обличчя;
3. Виконання навчання моделі та в подальшому використання цієї моделі для розпізнавання обличчя, використовуючи синтезовані зображення.

4.1 Синтез зображень обличь

Як вже зазначалось раніше, для виконання гетерогенного розпізнавання обличь, використовують два типи зображень. В нашому випадку використовуються зображення обличь зроблених у видимому діапазоні та поляриметричні зображення зроблені у ІЧ діапазоні. Це виконується для того, щоб отримати синтезовані зображення зі спільними між собою ознаками. В подальшому, ці синтезовані зображення буду використовуватися моделлю для виконання розпізнавання. Існує низка методів синтезу зображень обличь для рішення вище зазначеної задачі. Коротко про найбільш цікаві методи описано далі.

Метод перетворення поляриметричного у видиме зображення обличчя використовуючи синтезу з керуванням самоувагою. В цьому методі, замість того, щоб синтезувати зображення із термічного для отримання зображення найбільш схоже на видиме, намагаються синтезувати зображення із видимого зі спільними ознаками з термічним зображенням. Ідея базується на тому факті, що теплові зображення також містять певну дискримінаційну інформацію про людину, яка є корисною для виконання розпізнавання. Попередньо навчена згорткова нейронна мережа витягує глибинні характеристики як з оригінальних, так і з синтезованих зображень. Потім ці функції об'єднуються для створення шаблону, який використовується для розпізнавання. Запропонована модель синтезу базується на генеруючій суперницькій мережі власної уваги (з англ. self-attention generative adversarial network), яка, по суті, забезпечує ефективний синтез зображень, керований увагою [9].

Метод синтезу видимого зображення обличчя з теплового використовуючи кількох областей обличчя. Це метод синтезу для підвищення дискримінаційної якості синтезованих видимих зображень обличчя шляхом використання як глобальних (наприклад, усе обличчя), так і локальних регіонів (наприклад, очей, носа та рота). Тут кожна область забезпечує незалежне представлення для відповідної області та додаткові терміни регуляризації, які впливають на загальну якість синтезованих

зображень. Проводиться аналіз наслідків використання кількох областей для синтезу видимого зображення обличчя з термічного обличчя. Використовуючи синтезовані зображення, повідомляються результати виявлення орієнтирів обличчя, які зазвичай використовуються для реєстрації зображень, що є важливою частиною процесу розпізнавання обличчя [10].

Метод синтезу зображень обличчя видимого діапазону з зображень теплового використовуючи генеративні змагальні мережі. Цей метод використовує генеративну змагальну мережу на основі багатопотокової техніки об'єднання на рівні ознак для синтезу високоякісних видимих зображень із поляриметричних теплових зображень. Запропонована мережа складається з генеруючої підмережі, побудованої за допомогою мережі кодер-декодер на основі щільних залишкових блоків, і підмережі багатомасштабного дискримінатора. Генеруюча мережа навчена шляхом оптимізації змагальної втрати на додаток до втрати сприйняття та втрати ідентичності, щоб забезпечити фотореалістичне створення видимих зображень із збереженням дискримінаційних характеристик [11].

Метод глибинного перцептивного співставлення для крос-модального розпізнавання обличчя. Цей підхід фіксує дуже нелінійний зв'язок між двома модальностями за допомогою глибинної нейронної мережі. Модель намагається навчитися нелінійному відображенню від видимого до теплового спектру, зберігаючи ідентифікаційну інформацію [12].

Метод навчання спільного представлення. Спочатку витягуються риси Габора в деяких локалізованих точках обличчя, а потім використовуються обмежена машина Больцмана, щоб знайти спільне представлення локально, для усунення неоднорідності навколо кожної точки обличчя. Спільні представлення з'єднуються разом і обробляються за допомогою методу головних компонентів [13].

Регуляризований дискримінаційний метод спектральної регресії. Дискримінаційна спектральна регресія відображає неоднорідні зображення обличчя в загальний дискримінаційний простір, у якому можна досягти надійної класифікації.

У запропонованому методі задача навчання простір трансформується в задачу найменших квадратів. Різні відображення мають відображати різні класи зображення з одного класу близько одне до одного, тоді як зображення з різних класів мають бути розділені якомога далі. Щоб реалізувати це, вводяться два нових терміни регуляризації, які відображають зв'язки категорій між даними, у підхід найменших квадратів [14].

В даній магістерській роботі розглядається гетерогенне розпізнавання обличчя, використовуючи словникове навчання ознак, завдяки якому синтезують зображення із видимого та поляриметричного тепловізійного.

4.1.1 Словникове навчання ознак

Словникове навчання ознак – це метод навчання ознак, який спрямований на знаходження розрідженого представлення вхідних даних (також відомого як розріджене навчання) у вигляді лінійної комбінації основних елементів, а також самих базових елементів. Основна мета словникового навчання, це синтезувати зображення обличчя для інфрачервоного спектру та видимого, на основі навченого словника. Синтезовані зображення будуть мати схожі ознаки обличчя і тим самим їх порівняння буде набагато точнішим [39].

Словникове навчання ознак оперує не всім зображенням, а патчами. Патч – це вектор рамки пікселів розмірністю $\sqrt{d} \times \sqrt{d}$ (рис. 4.3), розмірність вектору патчу \mathbf{x} складає R^d . Саме зображення представлене матрицею \mathbf{X} патчів розмірністю $R^{d \times n}$:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n] \in R^{d \times n} \quad (4.1)$$

Також, для виконання словникового навчання ознак необхідно мати сам словник \mathbf{D} , який складається з набору пікселів, який був навчений і підібраний таким чином, що при множенні словника на розріджену матрицю отримували відновлене синтезоване зображення \mathbf{Y} . Розмірність словника \mathbf{D} дорівнює $R^{d \times k}$. Тобто, словник

складається із векторів з такою самою довжиною, як довжина патчу d , і кількість таких векторів дорівнює k . В тому випадку коли $k > n$ словник називається переповненим, тобто кількість векторів словника більша за кількість патчів зображення. Коли $k = n$, словник називається повним і коли $k < n$ – неповним. Використання переповнених словників дає можливість більш якісно виконати словникове навчання ознак. Також можна використовувати повні словники, але використання неповних буде недостатнім.

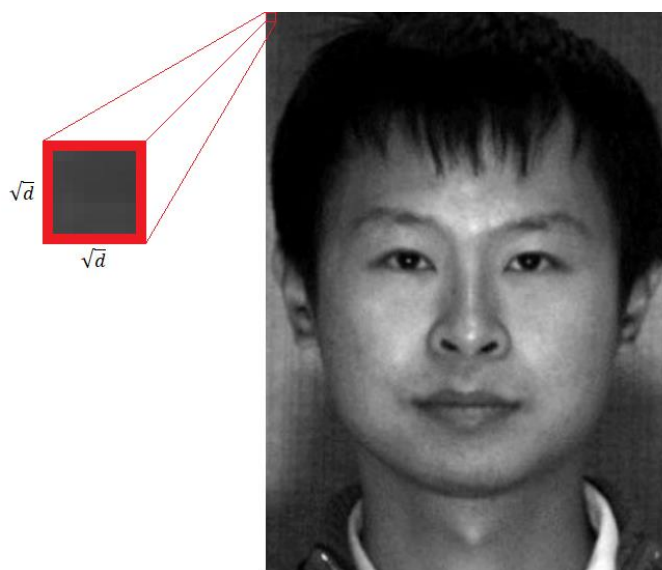


Рисунок 4.3. Розмір патчу зображення

Самі словники представляють собою просто набір пікселів, перш за все його можна створити використовуючи вхідне зображення, або використовувати вже навчений готовий словник, який був створений на основі певного датасету. Приклад початкового створеного словника із вхідного зображення (лівий рисунок), та вже навченого словника після виконання словникового навчання ознак (правий рисунок) можна побачити на рис. 4.4 [40].

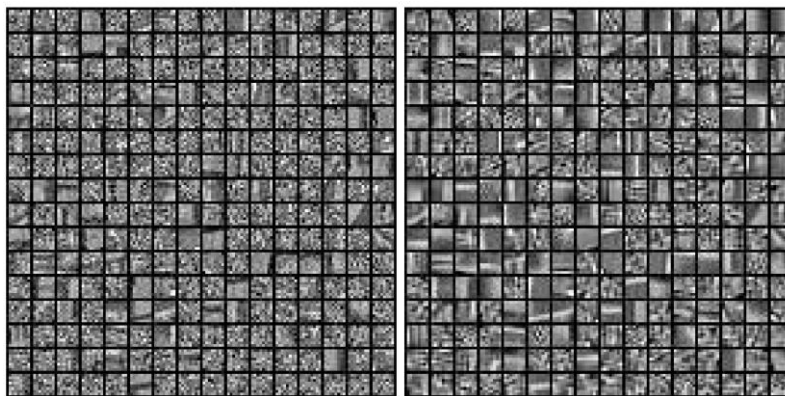


Рисунок 4.4. Приклад початкового та навченого словника

Ще одним елементом словникового навчання ознак є розріджена функція (з англ. Sparse Function) – це матриця \mathbf{A} розмірністю $R^{k \times n}$, яка складається з векторів, які мають дуже малу кількість не нульових елементів, через це цю функцію називають розрідженою, а словникове навчання ознак ще називають розрідженим навчанням (з англ. Sparse Learning). Як вже описувалось раніше, при множенні словника \mathbf{D} на матрицю \mathbf{A} отримуємо синтезоване зображення \mathbf{Y} у вигляді матриці патчів, які потім переводимо в зображення.

Рисунок 4.5. Отримання матриці патчів \mathbf{Y} з множення \mathbf{D} на \mathbf{A}

Але для того, щоб отримати бажаний результат необхідно правильно підібрати розріджену функцію \mathbf{A} та навчити словник \mathbf{D} . Для цього, визначаються відповідні проблематики, рішення яких приводить до задовільного результату та рішення завдання.

В нашому випадку, головним завданням словникового навчання ознак є синтез зображення обличчя використовуючи зображення обличчя зроблене у видимому діапазоні і синтез зображення використовуючи поляриметричне тепловізійне

зображення обличчя. В свою чергу синтезовані зображення повинні мати якомога більше спільних ознак, для забезпечення точного розпізнавання обличчя [39].

З цього випливає, що ми будемо оперувати двома зображеннями одночасно, тому необхідно ввести всі необхідні змінні для видимого та тепловізійного зображення відповідно.

Вхідне зображення буде представлене у вигляді матриці патчів, відповідно до формули 4.1:

$$\begin{cases} \mathbf{X}^v = [\mathbf{x}_1^v, \mathbf{x}_2^v, \dots, \mathbf{x}_n^v] \in R^{d \times n} \\ \mathbf{X}^t = [\mathbf{x}_1^t, \mathbf{x}_2^t, \dots, \mathbf{x}_n^t] \in R^{d \times n} \end{cases} \quad (4.2)$$

Де, \mathbf{x}_1^v – це патч видимого зображення довжиною d , а \mathbf{x}_1^t - патч поляризаційного тепловізійного зображення, також довжиною d .

Для кожного типу зображення буде відповідна матриця словнику та розрідженої функції: $\mathbf{D}^v, \mathbf{D}^t \in R^{d \times k}$, та $\mathbf{A}^v, \mathbf{A}^t \in R^{d \times k}$. Для отримання синтезованих зображень, використовуючи словникове навчання ознак, необхідно буде вирішити наступну задачу мінімізації:

$$\min_{\mathbf{D}^v, \mathbf{D}^t, \mathbf{A}^v, \mathbf{A}^t} E_v(\mathbf{X}^v, \mathbf{D}^v, \mathbf{A}^v) + E_t(\mathbf{X}^t, \mathbf{D}^t, \mathbf{A}^t) + E_c(\mathbf{A}^v, \mathbf{A}^t) \quad (4.3)$$

Де, E_v та E_t – це енергетичні складові для вивчення словника, пов'язані з помилкою реконструкції даних. E_c – це спільна енергетична складова, пов'язана між розрідженими функціями видимого та теплового зображень. Сама реконструкція даних представляє собою створення синтезованого зображення для кожного з типів зображення окремо, яка веде за собою створення спарс функції та навчання словника. E_v та E_t можна представити у вигляді таких задач мінімізації:

$$E_v = \text{Arg min}_{\mathbf{D}^v, \mathbf{A}^v} \|\mathbf{X}^v - \mathbf{D}^v \mathbf{A}^v\|_F^2 + \lambda_v \|\mathbf{A}^v\|_1 \quad (4.4)$$

$$E_t = \text{Arg min}_{\mathbf{D}^t, \mathbf{A}^t} \|\mathbf{X}^t - \mathbf{D}^t \mathbf{A}^t\|_F^2 + \lambda_t \|\mathbf{A}^t\|_1 \quad (4.5)$$

Де, λ – це штрафний параметр, а $\|\mathbf{M}\|_F^2$ – це квадрат норми Фробеніуса, що представляє собою суму квадратів елементів матриці \mathbf{M} [40]:

$$\|\mathbf{M}\|_F^2 = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^n |m_{ij}|^2 \quad (4.6)$$

Дивлячись на рівняння 4.4 та 4.5, можна зрозуміти, що задача стоїть в тому, щоб знайти такі значення для \mathbf{A} та навчити словник \mathbf{D} таким чином, щоб квадратична помилка між вхідним зображенням \mathbf{X} та синтезованим $\mathbf{Y} = \mathbf{D}^t \mathbf{A}^t$ була якомога найменшою.

Спільну енергетичну складову E_c можна представити в наступному вигляді:

$$E_c = \|\mathbf{A}^v - \mathbf{A}^t\|_F^2 \quad (4.7)$$

Підставивши рівняння 4.6, 4.4 та 4.5 у рівняння 4.3 можна зрозуміти основну задачу мінімізації словникового навчання ознак для створення синтезованих зображень. Для того щоб отримати зображення з видимого та теплового з якомога більшою кількістю спільних ознак необхідно навчити словники $\mathbf{D}^v, \mathbf{D}^t$ та підібрати розріджені функції $\mathbf{A}^v, \mathbf{A}^t$ таким чином, щоб зображення не втратило своїх початкових особливостей і різниця між вхідним і синтезованим була якомога найменшою і розрідженні функції для двох модальностей повинні мати мінімальну помилку, щоб досягти спільного синтезу.

Словники використовуються для пошуку прихованих властивостей та співставлень і, як тільки словники \mathbf{D}^v та \mathbf{D}^t були навчені, можна виконувати синтез зображень зі спільними ознаками \mathbf{Y}^{sv} та \mathbf{Y}^{st} .

Перш за все застосуємо навчену модель для синтезу всього набору зображень видимого спектру для формування нової галереї видимих обличь \mathbf{Y}^{sv} . Для отримання цих зображень використаємо вже навчений словник та знайдемо розріджену функцію \mathbf{A}^{sv} , вирішивши таку задачу мінімізації для кожного зображення датасету:

$$\text{Arg min}_{\mathbf{A}^{sv}} \|\mathbf{X}^v - \mathbf{D}^v \mathbf{A}^{sv}\|_2^2 + \lambda_v \|\mathbf{A}^{sv}\|_1 \quad (4.8)$$

Знайшовши \mathbf{A}^{sv} , можна виконати синтез з видимого зображення обличчя, згідно цієї формули:

$$\mathbf{Y}^{sv} = \mathbf{D}^v \mathbf{A}^{sv} \quad (4.9)$$

За таким же принципом виконується синтез з поляриметричних зображень ІЧ діапазону:

$$\text{Arg min}_{\mathbf{A}^{st}} \|\mathbf{X}^t - \mathbf{D}^t \mathbf{A}^{st}\|_2^2 + \lambda_v \|\mathbf{A}^{st}\|_1 \quad (4.10)$$

$$\mathbf{Y}^{st} = \mathbf{D}^t \mathbf{A}^{st} \quad (4.11)$$

Як результат ми отримали два синтезованих зображення видимого та ІЧ діапазону, які будуть мати спільні ознаки і використовуватись для створення моделі розпізнавання обличчя. Тобто, перш за все, на основі навчених словників \mathbf{D}^v та \mathbf{D}^t створюється датасет, потім ці зображення проходять попередню обробку та виконується створення моделі розпізнавання обличчя.

Як тільки все буде готово, розпізнавання обличчя із зображення поляризаційного тепловізора \mathbf{X}^{it} , яке приходить на вхід створеної системи, буде виконуватись, використовуючи навчений словник \mathbf{D}^t , по принципу описаному вище у формулах (4.10) та (4.11).

Залишається відкритим питання, як вирішити задачу мінімізації (4.3), для того, щоб знайти $\mathbf{D}^v, \mathbf{D}^t, \mathbf{A}^v, \mathbf{A}^t$. Для цього, в даній роботі пропонується використання алгоритму під назвою K-SVD.

K-SVD – це метод представлення сигналу, який із набору сигналів може отримати словник, здатний синтезувати кожен сигнал за допомогою розрідженої комбінації атомів (спарс-функції). Загальний алгоритм роботи K-SVD наведений на рис 4.6.

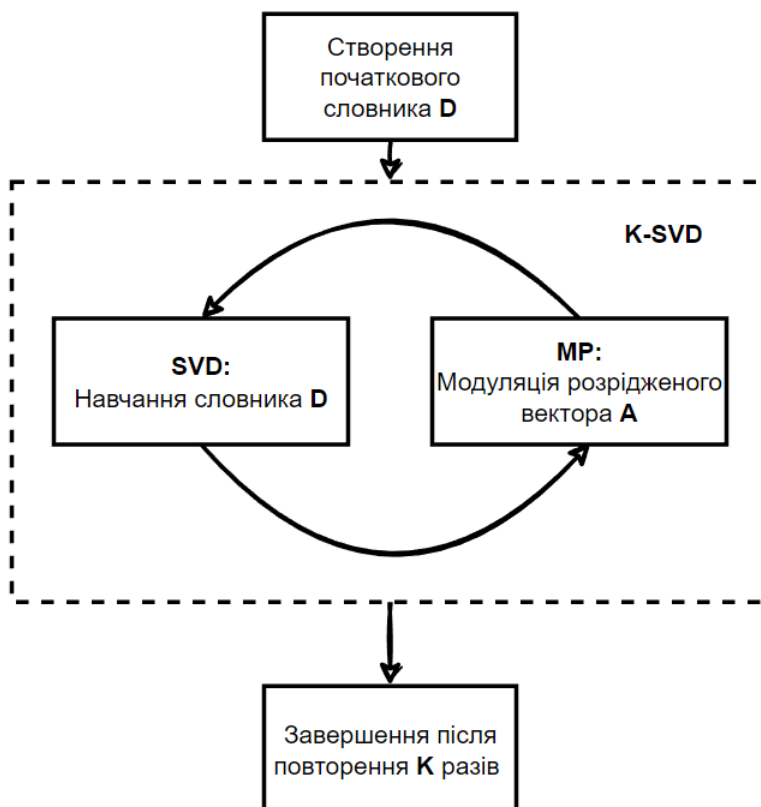


Рисунок 4.6. Загальний вигляд K-SVD алгоритму

Перш за все перед запуском K-SVD алгоритму, необхідно створити початковий словник \mathbf{D} . Для цього можуть підійти вже готові словники, або можна випадково повибирати патчи з вхідного зображення, та перемішати їх значення і тим самим створити початковий словник будь якої розмірності.

Наступним етапом є виконання модуляції розрідженої функції \mathbf{A} за принципом пошук відповідності (з англ. Matching Pursuit або MP). Головною задачею цього етапу є знайти такий набір не нульових елементів вектор \mathbf{A} , щоб помилка (4.12) була якомога найменшою.

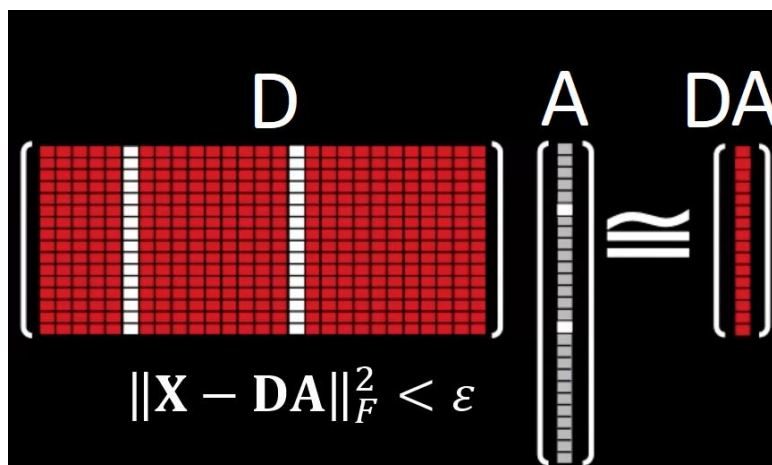


Рисунок 4.7. Пошук відповідності (з англ. Matching Pursuit або MP)

Для цього, ми фіксуємо наш початковий словник \mathbf{D} та перебираємо всі атоми словника \mathbf{D} та \mathbf{A} по черзі. Обираємо такі атоми, при якому буде мінімальна помилка між отриманим вектором та вхідним зображенням \mathbf{X} , представлений набором патчей. Але, необхідно зазначити, що є певна допустима кількість ненульових елементів вектору \mathbf{A} , так як він повинен бути розрідженим. Після того, як обрали найбільш оптимальні атоми, необхідно підібрати значення обраних атомів a_i , за тієї ж умови (4.12).

$$\|\mathbf{X} - \mathbf{DA}\|_F^2 < \varepsilon \quad (4.12)$$

В нашому випадку, для синтезу зображене із спільними знаками з видимого та теплового зображень, формулу (4.12) представимо наступним чином:

$$\|\mathbf{X}^v - \mathbf{D}^v \mathbf{A}^v\|_F^2 + \|\mathbf{X}^t - \mathbf{D}^t \mathbf{A}^t\|_F^2 + \|\mathbf{A}^v - \mathbf{A}^t\|_F^2 < \varepsilon \quad (4.13)$$

Перебирання атомів матриць $\mathbf{D}^v, \mathbf{D}^t, \mathbf{A}^v, \mathbf{A}^t$ виконується одночасно, та обираються найбільш оптимальні.

Після виконання MP методу, необхідно виконати оновлення словника. Для цього використовується метод сингулярного розкладання матриці (з англ. Singular Value Decomposition або SVD). Тепер необхідно зафіксувати спарс функцію \mathbf{A} , після чого вхідними даними для оновлення \mathbf{D} є спарс функція \mathbf{A} , яку оновили на першому кроці K-SVD алгоритму, та синтезоване зображення \mathbf{Y} , яке отримали помноживши поточний словник \mathbf{D} на \mathbf{A} .

Для оновлення словника необхідно по черзі перебирати атоми словника \mathbf{D} і проводити над ними наступні дії. Нехай поточний атом позначається \mathbf{d}_i , необхідно знайти всі сигнали (патчи) зображення \mathbf{Y} , які були створенні використовуючи атом \mathbf{d}_i . Позначимо набір цих сигналів як \mathbf{Y}^{d_i} , а його елемент як $\mathbf{y}_j^{d_i}$ – патч. Так як функція \mathbf{A} є розрідженою, то вона має малу кількість ненульових елементів, тому сигнал $\mathbf{y}_j^{d_i}$ можна отримати не тільки з атома \mathbf{d}_i , а і з ще декількох атомів словника (рис. 4.8).

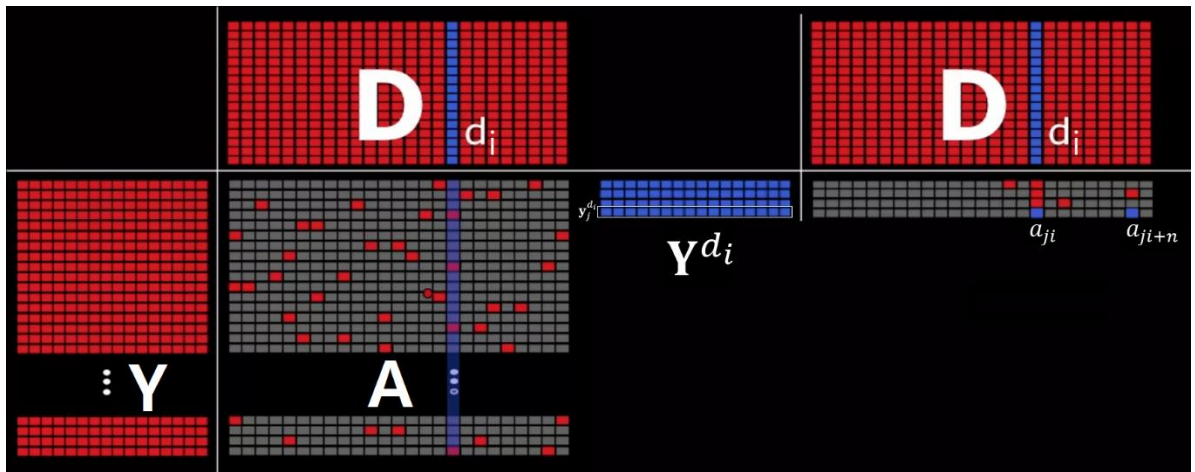


Рисунок 4.8. Оновлення словника \mathbf{D}

Тобто сигнал $\mathbf{y}_j^{d_i}$ використовує не тільки атом \mathbf{d}_i , а і наприклад атом \mathbf{d}_{i+n} . Тому необхідно від сигналу $\mathbf{y}_j^{d_i}$ відняти добуток інших атомів словника на розріджену функцію \mathbf{A} , і тим самим отримаємо помилку $e_j^{d_i}$ [40]:

$$e_j^{d_i} = \mathbf{y}_j^{d_i} - \sum_{n=0}^k \mathbf{d}_{i+n} \mathbf{a}_{ji+n} \quad (4.14)$$

Зробивши це все для кожного сигналу \mathbf{Y}^{d_i} , ми отримаємо помилку \mathbf{E}^{d_i} для кожного сигналу, який використовує поточний атом \mathbf{d}_i . Після чого можна оптимізувати атом \mathbf{d}_i вирішивши задачу 4.15. Цей процес виконується для кожного атому словника \mathbf{D} .

$$\min_{\mathbf{d}_i} \|\mathbf{a}_i \mathbf{d}_i - \mathbf{E}^{d_i}\|_F^2 \quad (4.15)$$

Задачу 4.15 можна вирішити використовуючи сингулярне розкладання матриці:

$$\mathbf{E}^{d_i} = \mathbf{U}\Delta\mathbf{V}^T \quad (4.16)$$

Де, \mathbf{d}_i – це перший стовбець унітарної матриці \mathbf{U} , \mathbf{a}_i – перший стовбець унітарної матриці \mathbf{V} , Δ – діагональна матриця з ненульовими елементами на діагоналі.

Позначимо \mathbf{E}^{d_i} як \mathbf{X} , і представимо рівняння 4.16 у такому вигляді:

$$\begin{cases} \mathbf{X}\mathbf{X}^T = \mathbf{U}\Delta\Delta^T\mathbf{U}^T \\ \mathbf{X}^T\mathbf{X} = \mathbf{V}\Delta^T\Delta\mathbf{V}^T \end{cases} \quad (4.17)$$

У результаті $\Delta(1, 1)$ є квадратом найбільшого власного значення симетричної позитивно визначеної матриці $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$, а перший стовбець \mathbf{U} є відповідним власним вектором. Те саме спостереження справедливе для \mathbf{V} . Отже, ми можемо знайти ці власні вектори та $\Delta(1, 1)$ завдяки степеневому методу, застосованому до матриць $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ та $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ [40].

Для цього, оголосим наступні змінні: $\Delta(1, 1)$ позначимо як s – це найбільше сингулярне значення \mathbf{X} , s_{old} – це змінна в яку буде записуватись старе значення s , \mathbf{u} – це \mathbf{d}_i (перший стовбець матриці \mathbf{U}), \mathbf{v} – це \mathbf{a}_i , перший стовбець матриці \mathbf{V} . Проведемо оптимізацію \mathbf{v} :

$$\mathbf{u} \leftarrow \mathbf{X}\mathbf{v}, \mathbf{u} \leftarrow \frac{\mathbf{u}}{\|\mathbf{u}\|}, \mathbf{v} \leftarrow \mathbf{X}^T\mathbf{u}, s_{old} \leftarrow s, s \leftarrow \|\mathbf{v}\|, \mathbf{v} \leftarrow \frac{\mathbf{v}}{s} \quad (4.18)$$

Вирази 4.18 повторюються по колу до тих пір поки не пройде максимум ітерацій, або не буде задовільна помилка:

$$\left| \frac{s - s_{old}}{s} \right| < \varepsilon \quad (4.19)$$

Після проведення цих всіх дій над кожним атомом словника \mathbf{D} , ми отримаємо оновлений словник. Потім процес повторюється, і знову запускається модуляція розрідженого вектора \mathbf{A} , і так по колу доки не отримаємо задовільного результату, або доки не пройде максимальна кількість ітерацій.

Для нашого випадку, який ми розглядаємо в даній роботі, словники \mathbf{D}^v та \mathbf{D}^t оновлюються окремо один від одного. Спільним в них є тільки модуляція матриці \mathbf{A} .

Сам K-SVD алгоритм буде проводитись доки умова 4.3 не буде мінімальною, або доки не закінчить визначена кількість ітерацій.

Після навчання словника, відновлення нових зображень які надходять в систему, відбувається лише виконуючи модуляції розрідженої функції \mathbf{A} за принципом пошук відповідності (з англ. Matching Pursuit або MP). Тобто знаходимо \mathbf{A}^t використовуючи словник \mathbf{D}^t та множимо їх один на одного і отримаємо синтезоване зображення.

Як результат використання словникового навчання ознак з K-SVD алгоритмом, на зображеннях видимого та ІЧ спектру, для синтезу зображень зі спільними ознаками отримаємо наступні результати:

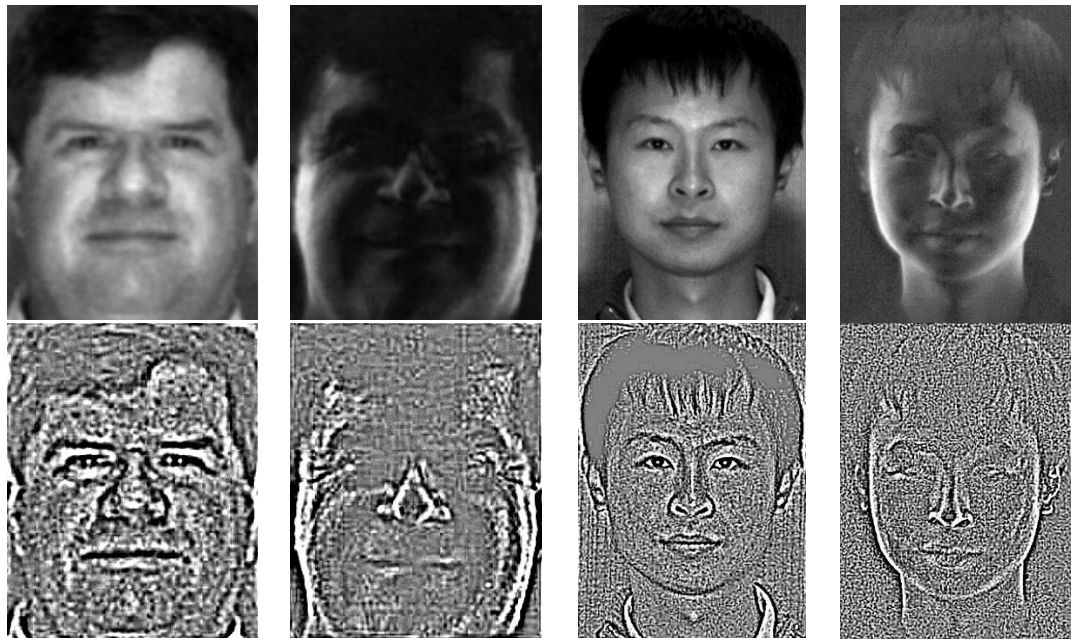


Рисунок 4.9. Результат синтезу видимого та теплового поляриметричного зображення використовуючи словникове навчання ознак

На рис. 4.9 видно синтезовані зображення як видимого, так і теплового зображення. Відразу видно, що синтезовані зображення здатні отримувати набагато більше інформації і особливостей, а спільних ознак між видимим та тепловим спектром видно саме на синтезованих, що значно оптимізує та збільшить якість моделі розпізнавання обличь. Саме навчання словника займає не багато часу, в

залежності від кількості зображень датасету, але після навчання, його робота дуже швидка, що гарно оптимізує системи гетерогенного розпізнавання обличь.

4.2 Попередня цифрова обробка синтезованих зображень

Після того, як отримали синтезовані зображення з видимого та теплового спектрів, їх можна використовувати для створення моделі розпізнавання обличь. Але, для збільшення її точності необхідно провести попередню цифрову обробку.

Перш за все виконуємо різницю гауссіанів (з англ. difference of Gaussians або DoG). Різниця гауссіанів (РГ, англ. difference of Gaussians, DoG) полягає в тому що ми віднімаємо більш розмите зображення від менш розмитого тим самим виконуючи фільтрацію зображення. Розмиття виконуються Гаусовим ядром G , так як через таке розмиття зменшується лише високочастотна просторова інформація, тому можна враховувати різницю гауссіанів як просторовий смуговий фільтр [15].

$$I_{DoG}(x, y) = [G(x, y, \sigma_0) - G(x, y, \sigma_1)] \cdot I(x, y) \quad (4.20)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.21)$$

Наступним необхідно зробити контури зображення обличчя більш чіткими. Для виконання цієї задачі використовується сигмоїда гіперболічного тангенсу [15]:

$$T(I_{DoG}(x, y)) = th\left(\frac{I_{DoG}(x, y)}{\sigma_{DoG}}\right) \quad (4.22)$$

Де, σ_{DoG} – це стандартне відхиленням відфільтрованого зображення I_{DoG} .

Одним із головних етапів попередньої обробки зображення обличчя є виділення ознак із зображення. Для цього використовується дескриптор ознак гістограми напрямлених градієнтів (англ. histogram of oriented gradients або HOG), який полягає в тому, що зовнішній вигляд і форму локального об'єкта в межах зображення можна описати розподілом градієнтів інтенсивності або напрямків країв [16].

Для того, щоб виконати НОГ виділення необхідно змінити розміри зображення таким чином, щоб кількість пікселів по ширині та висоті була кратна 16. Це робиться для того, щоб розділити зображення на квадрати розміром 16x16, які в свою чергу будуть ділитись на квадрати 8x8.

Як тільки зображення буде мати відповідні розміри, необхідно взяти похідну по x та y кожного блоку розміром 8x8. Для цього виконаємо наступні дії:

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (4.23)$$

Похідну по x та y можна репрезентувати наступним чином:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} \frac{\partial f}{\partial x} \quad \begin{array}{|c|} \hline -1 \\ \hline 0 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \frac{\partial f}{\partial y}$$

Рисунок 4.10. Похідна зображення по x та y

Для знаходження напрямлених градієнтів необхідно розрахувати кут напрямку градієнту за формулою Після чого ми будемо мати напрям градієнту для кожного пікселя зображення.

$$\theta = \arctan\left(\frac{\partial f / \partial y}{\partial f / \partial x}\right) \quad (4.24)$$

На рис. 4.11 можна побачити результати виконаної попередньої цифрової обробки, яка складається з вище описаних кроків. Як видно, завдяки DoG обробці ми змогли підкреслити краї обличчя, а використовуючи НОГ обробку, змогли залишити інформацію тільки про направлення градієнтів, що добре відзначиться на точності роботи моделі по розпізнаванню обличь.

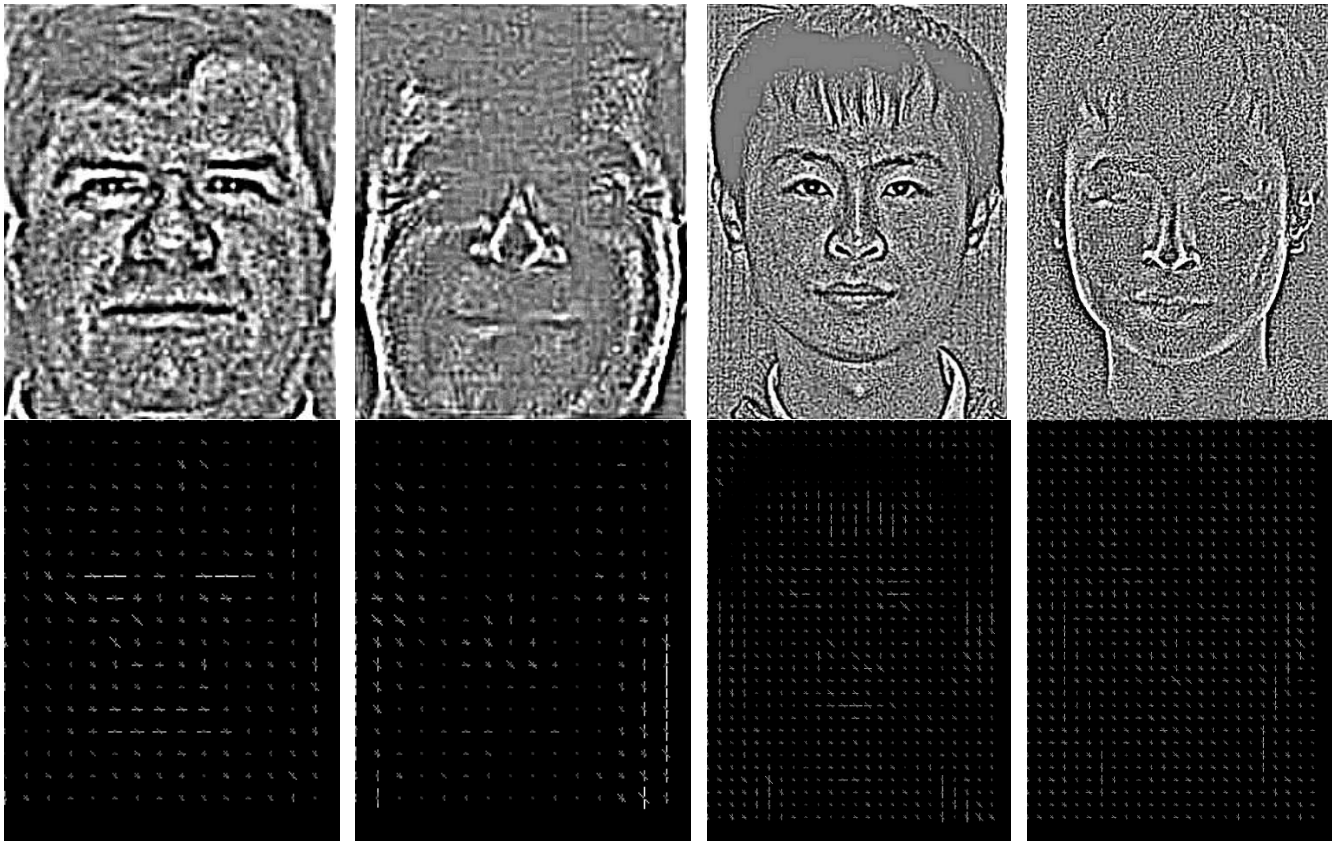


Рисунок 4.11. Результати попередньої цифрової обробки

4.3 Фінальний алгоритм обробки зображень

Ми розглянули основні етапи обробки зображень для гетерогенного розпізнавання обличь. Наступним етапом після обробки зображень є створення моделі, яка буде виконувати розпізнавання.

Перш за все модель повинна навчитися, для цього необхідно провести вище описані етапи та створити датасет. В нього будуть входити зображення обличь людей, які були синтезовані вище описаним методом. В даній роботі не буде розглядатися саме створення моделі, але в загальному, після того як модель буде навчена, детектування обличчя виходить тим, що модель знаходить найбільш схоже синтезоване видиме зображення з синтезованим зображенням з поляриметричного тепловізора і як результат буде видавати справжнє обличчя людини.

В загальному алгоритм роботи гетерогенного розпізнавання обличчя на основі словникового навчання ознак буде виглядати наступним чином:



Рисунок 4.12. Загальний алгоритм роботи гетерогенного розпізнавання обличчя на основі словникового навчання ознак

4.3 Висновки до розділу

В цьому розділі було описано та проаналізовано основну роботу магістерської дисертації. Було розглянуто гетерогенне розпізнавання обличчя на основі словникового навчання ознак.

Перш за все було описано словникове навчання ознак, його робота та методи вирішення задач мінімізації. Як результат, було проілюстровано синтезовані зображення зроблені на основі видимого та тепловізійного поляризованого зображення. Даний метод є доволі швидким та якісним, на наведених прикладах було гарно видно спільні ознаки між синтезованими видимими та тепловізійними зображеннями.

Другим етапом роботи було проаналізувати та знайти оптимальні способи виконання попередньої цифрової обробки зображення для моделі розпізнавання обличь. Запропоновані методи, такі як різниця гауссіанів та гістограми напрямлених градієнтів в комбінації один з одним виконали доволі гарну роботу. Тому підготовка даних для моделі була виконана успішно.

Як результат, був запропонований алгоритм системи гетерогенного розпізнавання обличь, який складався з розробленої обробки зображень обличь та моделі. Було описано, як алгоритм навчання, так і алгоритм використання моделі – тобто розпізнавання обличчя.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «СИСТЕМА НІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ З ФУНКЦІЄЮ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧЬ»

5.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в розділах вище теоретичну частину, стосовно систем спостереження, архітектурні особливості поляриметричних тепловізорів та алгоритм обробки поляризованого зображення обличчя для виконання розпізнавання, виникає ідея у створенні системи нічного спостереження з функцією розпізнавання обличь. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту.

Головна ідея стартап проекту, створити систему нічного відеоспостереження, яка буде видавати гарну якість зображення, мати доступну ціну та не значні габаритні розміри. Також основною особливістю даної системи буде розпізнавання обличь людей, які потрапляють на камеру, для визначення несанкціонованого доступу, та для контролю території або виробництва.

В таблиці 5.1 наведено загальне представлення змісту ідеї стартап проекту.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап проекту

| <i>Зміст ідеї</i> | <i>Напрямки застосування</i> | <i>Вигоди для користувача</i> |
|--|---|--|
| Система нічного відеоспостереження з функцією розпізнавання обличь | 1. Охорона об'єктів від несанкціонованого проникнення | <ul style="list-style-type: none"> - Гарна якість зображення для нічної зйомки; - Швидкі та оптимізовані алгоритми обробки зображення; - Можливість розпізнавання обличь людей які знаходяться в загальній базі даних; - Оптимальна ціна системи |
| | 2. Моніторинг | |
| | 3. Військова справа | |
| | 4. Контроль персоналу | |

Отже, в даному стартапі запропонована система нічного відеоспостереження, яка має можливість розпізнавати обличчя людей які потрапляють в кадр, тим самим

даючи змогу контролю безпеки, та проведення охорони від несанкціонованого доступу до об'єктів спостереження. Данна система забезпечує гарну якість зображення, невеликі габаритні розміри та оптимальну ціну.

На наступному етапі необхідно створити інформаційну карту стартап проекту. Її можна побачити в табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Інформаційна карта стартап-проекту

| | |
|---|---|
| <i>Назва проекту</i> | Система нічного спостереження з функцією розпізнавання обличь |
| <i>Автори проекту</i> | Танчук Владислав |
| <i>Коротка анотація</i> | Система нічного спостереження заснована на використанні поляриметричного тепловізора |
| <i>Термін реалізації</i> | 8 місяців |
| <i>Необхідні ресурси</i> | Офіс, програмне забезпечення, поляриметричні тепловізори |
| <i>Опис проблеми яку вирішує проект</i> | Більшість подібних систем мають не дуже гарну якість зображення також не мають функції розпізнавання обличь |
| <i>Цілі та завдання проекту</i> | Створити продукт, досягти гарної якості зображення та ефективної роботи алгоритму розпізнавання обличь |

В таблиці 5.3. наведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів.

Таблиця 5.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № n/n | Техніко- економічні характерис- тики ідеї | Товари конкурентів | | | | W | N | S |
|----------|--|------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---|---|---|
| | | <i>Мій стартап</i> | <i>Hikvision (КНР)</i> | <i>ANKER (ЕС)</i> | <i>UniFi (ЕС)</i> | | | |
| 1 | Якість зображення нічної зйомки | Висока | Низька | Середня | Низька | | | + |
| 2 | Денна зйомка | Низька | Середня | Висока | Середня | + | | |
| 3 | Швидкість розпізнавання обличь | Висока | Середня | Висока | Низька | | | + |
| 4 | Простота виробництва | Висока | Середня | Низька | Середня | | | + |
| 5 | Ціна | Висока | Низька | Висока | Низька | | + | |

Згідно до таблиці 5.3, запропонований продукт має кращу якість зображення нічної зйомки, так як використовуються поляриметричні тепловізори, які

забезпечують гарну якість при малому освітленні, тим часом потенційні конкуренти використовують або звичайні камери з виконання цифрової обробки для нічного бачення, або звичайні тепловізійні камери в комбінації зі звичайними, що робить їх дорожчими. Але запропонований проект має низьку якість зображення в денний час, через використання тепловізора, який працює в ІЧ діапазоні. Також в даному стартапі запропоновані швидкі та оптимальні алгоритми обробки зображення та розпізнавання обличь, ніж у конкурентів. Це все робить його конкуренто спроможним для інших виробників.

На наступному етапі проводиться аудит технології, мови програмування, за допомогою чого можна реалізувати ідею стартап проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.3 [41].

Таблиця 5.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

| <i>№ n/n</i> | <i>Ідея проекту</i> | <i>Технології її реалізації</i> | <i>Наявність технологій</i> | <i>Доступність технологій</i> |
|------------------|--|--|-----------------------------|-------------------------------|
| 1. | Підвищення якості нічної зйомки | Використання явища поляризації | Наявна | Доступна |
| | | Цифрова обробка зображень | Наявна | Доступна |
| 2. | Зменшення габаритних розмірів | Використання архітектури поляриметричних тепловізорів на основі поділу фокальної площини | Наявна | Доступна |
| | | Використання мікроболометричних матриць | Наявна | Доступна |
| 3. | Реалізація швидкого алгоритму розпізнавання обличь | Словникове навчання ознак | Наявна | Доступна |
| | | Мова програмування C++ | Наявна | Доступна |

Проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що задля реалізації поставлених ідей, необхідно використовувати сучасні методи цифрової обробки, мову програмування C++, сучасні архітектури поляриметричних тепловізорів. Всі зазначені технології наявні та доступні для використання, що значно спрощує виробництво та досягнення ідей стартапу.

5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартапу

В цьому розділі визначаються ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє гарно спланувати головні напрямки розвитку проекту враховуючи стан ринку та потреби клієнтів. Також необхідно врахувати основні пропозиції конкурентів для того щоб бути конкурентоспроможним на ринку.

Для початку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміку розвитку ринку. Це все виведено у табл. 5.5.

Таблиця 5.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| № | Показники стану ринку | Характеристика |
|---|---|--|
| 1 | Кількість головних конкурентів, од | 3 |
| 2 | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од | 150000 |
| 3 | Якісна оцінка динаміки ринку | зростає |
| 4 | Наявність обмежень для входу | висока ціна та поріг входження |
| 5 | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | Стандарт якості безпеки та якості відеоспостереження |
| 6 | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), % | 80% |

Як висновок, ринок в даній галузі стрімко розвивається, як в Україні так і у світі. Така динаміка ринку є головною перевагою показників стану ризику. Поріг входження на ринок в даній галузі є доволі високий, про що свідчить невелика кількість конкурентів. Проект є доволі рентабельним, так як середня норма рентабельності складає 80%.

Наступним етапом є визначення потенційної групи клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтовного переліку вимог до товару для кожної групи. Ці данні занесені до табл. 5.6.

Таблиця 5.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| <i>№ n/n</i> | <i>Потреба, що формує ринок</i> | <i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i> | <i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i> | <i>Вимоги споживачів до товару</i> |
|------------------|---|---|--|--|
| 1 | Відеоспостереження в нічний час та ідентифікація особи по обличчю | Військова промисловість Адміністративні організації Цивільне використання Малий та середній бізнес | Використання системи у нетрадиційних умовах; Сильний рівень захисту даних | Висока якість зображення; Висока швидкість обробки даних та розпізнавання обличчя; Відеоспостереження 24/7; Висока надійність та простота в обслуговуванні; Стабільна робота; Постійна підтримка; Інтеграція у вже існуючу систему захисту |

Тепер, після визначення потенційних груп клієнтів, необхідно провести аналіз ринкового середовища. Для цього складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають. Данні наведені в табл. 5.7 та 5.8 [41].

Таблиця 5.7. Фактори загроз

| <i>№ n/n</i> | <i>Фактор</i> | <i>Зміст загрози</i> | <i>Можлива реакція компанії</i> |
|------------------|----------------------------|---|--|
| 1. | Конкуренція | На ринку вже існують гравці, які вже доволі відомі | Виконати акцент на маркетингу. Знайти точки додаткової цінності для користувача |
| 2. | Ціна збуту | Ціни менші при такій же якості продукту, або ж через меншу якість | Сфокусуватися на якості продукту та продумати маркетингову стратегію. Збільшити підтримку продукту та надати гарантії |
| 3. | Зміна вимог користувача | Необхідність в новому функціоналі | Оновлення функціоналу та його розширення згідно нових вимог ринку |
| 4. | Нестача технічних ресурсів | Залежність від систем інших виробників. Зменшення їх попиту веде до зростання цін та дефіциту | Перехід згодом на власне виробництво систем, разом із ростом та розвитком компанії, популярності та попитом на продукт |
| 5. | Патентні позови | Патенти позови від конкурентів | Моніторинг ринку, та постійна модернізація відповідно до нових вимог |

Проаналізувавши табл. 5.7 можна дійти висновку, що основні потреби ринку до даного продукту є підтримка продукту та постійний його розвиток. Для їх забезпечення необхідно проводити постійні оновлення та розширення функціональності та проводити постійний моніторинг ринку [41].

Таблиця 5.8. Фактори можливостей

| <i>№ n/n</i> | <i>Фактор</i> | <i>Зміст можливості</i> | <i>Можлива реакція компанії</i> |
|------------------|-------------------------------|--|--|
| 1. | Розвиток та збільшення попиту | Збільшення попиту, дає можливість виходити на новий рівень продажів та збільшує кількість прибутку | Зробити акцент на маркетинг, для стрімкого росту імені. Використання прибутку для створення власного виробництва |
| 2. | Співпраця з конкурентами | Зменшення кількості конкурентів на ринку, збільшення впливу на ринок. Доступ до нових технологій та патентів. Розширення ринку | Збільшення виготовлення та створення нових систем разом з партнерами |
| 3. | Освоєння нових технологій | Розвиток системи, можливий розвиток в ще одному напрямі для розширення можливостей на ринку | Акцентувати увагу на набуття нових патентів та набуття знань для реалізації власного незалежного виробництва |
| 4. | Розширення бізнесу | Вихід на міжнародний рівень та ринок. Збільшення прибутку та розміру компанії | Акцентувати увагу на міжнародному ринку та намагатися бути якомога конкурентоспроможними |
| 5. | Якість та гарантії | Надавати послуги з високою якістю та з активною підтримкою покупців | Перейматись за кожного клієнта та надавати довгострокові гарантії та підтримку |

Попит на системи відеоспостереження різко зростає на ринку, завдяки чому збільшується і сам ринок. При збільшенні попиту на наш товар, з'являється можливість збільшення виробництва і розвиток у напрямку незалежності та власного виробництва. Щоб досягнути поставлені задачі необхідно розвивати маркетинг продукту та знаходити нові технології за для збільшення конкурентоспроможності.

Далі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку. Результати аналізу занесені до табл. 5.9.

Таблиця 5.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| <i>Особливості конкурентного середовища</i> | <i>В чому проявляється дана характеристика</i> | <i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i> |
|---|---|---|
| Тип конкуренції: монополістична | Представлено декілька фірм конкурентів | Виконання підтримки якості продукту та постійного розвитку |
| За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний | Існують проекти, що розроблені та можуть бути доступні у всьому світі | Розширити цільову аудиторію, вихід на міжнародний рівень |
| За галузевою ознакою: міжгалузева | Продукт використовується в різних галузях | Розвивати маркетинг для залучення нових клієнтів |
| Конкуренція за видами товарів: товарно-видова | На ринку товари тільки одного типу | Виконувати адаптацію до умов ринку. Клієнто-орієнтовна стратегія розвитку |
| 5. За характером конкурентних переваг: нецінова | Різні компанії пропонують різну якість | Розробляти більш якісніші алгоритми і моделі; Виконувати розробку нових технологій, які принципово відрізняються від своїх попередників та представляють модернізований варіант старої системи |
| 6. За інтенсивністю: марочна | Вже наявні компанії на ринку із сильним брендом | Приділяти увагу якості продукту а не бренду Компанії. Розкрутка імені та розвиток маркетингу |

Як висновок: на ринку присутні декілька фірм конкурентів, які мають значний контроль над ринком. Для цього необхідно проводити підтримку якості продукту та розвивати маркетинг для набуття імені і розвитку. Так як продукт використовується в різних галузях – це збільшує можливості по продажу товару. Також є можливість вийти на міжнародний рівень, але тим самим зросте конкуренція.

Після аналізу конкуренції необхідно провести більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі, за моделлю 5 сил М. Портера, додаток. Результати занесені у табл. 5.10.

Таблиця 5.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| | <i>Прямі конкуренти в галузі</i> | <i>Потенційні конкуренти</i> | <i>Постачальники</i> | <i>Клієнти</i> | <i>Товари-замінники</i> |
|-------------------------|---|---|---|---|---|
| <i>Складові аналізу</i> | Hikvision, ANKER, UniFi | Якість, ціна, складність технології, капіталовкладення | Є залежність від постачальників. | Контроль якості, порівняння цін | Ім'я бренду, менша ціна, більші масштаби |
| <i>Висновки:</i> | Конкуренція є не дуже інтенсивною, а також підігрітий ринок | Можливості входження на ринок є; На ринку наявні потенційні конкуренти. Строки виходу на ринок від 3 до 8 місяців | Постачальники можуть змінювати ціни на комплектуючі. Також можливий дефіцит | Клієнти не диктують умови роботи на ринку | Товари-замінники на ринку присутні, але ціна приблизно однакова та прямо пропорційна якості |

Згідно до результатів аналізу у табл. 5.10 можна дійти висновку, що конкуренція є незначною, як з боку прямих конкурентів в галузі так і з боку товаро-замінників. Головною задачею є концентрація на якості продукту. Але є залежність від постачальників, тому необхідно з часом вийти на самостійне виготовлення.

На основі аналізу конкуренції наведеному в табл. 5.10, а також з урахуванням характеристик ідеї проекту табл. 5.3, вимог споживачів до товару в табл. 5.6 та факторів маркетингового середовища в табл. 5.7-5.8, визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлений в табл. 5.11 [41].

Таблиця 5.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| <i>№ n/n</i> | <i>Фактор конкурентоспроможності</i> | <i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i> |
|--------------|--------------------------------------|--|
| 1 | Якість | Чим більша якість зображення, та алгоритму розпізнавання обличчя тим вищий попит на товар |
| 2 | Швидкий та точний алгоритм | Чим швидше працює обробка зображень та розпізнавання обличчя тим більш привабливим є продукт для користувача |
| 3 | Простота | Простота в експлуатації та розробці надає можливість швидкого встановлення та гнучкого користування, що значно підвищує конкурентоспроможність |
| 4 | Обслуговування | Активна підтримка продукту та постійний його розвиток роблять продукт привабливим для клієнтів різних галузей |
| 5 | Адаптивність | Можливість інтеграції системи у вже існуючі системи безпеки робить продукт гнучким та збільшує попит |

З цього випливає, що для підтримки гарної якості продукту необхідно постійно покращувати архітектуру продукту та покращувати алгоритми обробки зображення та системи розпізнавання обличчя. Постійна підтримка користувачів, адаптивність продукту та простота значно підвищує продукт на фоні інших.

За визначеними факторами конкурентоспроможності в табл. 5.11, необхідно провести аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту. Результати занесені до табл. 5.12.

Таблиця 5.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

| № n/n | Фактор конкурентоспроможності | Бали 1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів | | | | | | |
|----------|-------------------------------|--------------|-----------------------------|----|----|---|----|----|----|
| | | | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1 | Якість | 20 | | | | | | | + |
| 2 | Швидкий та точний алгоритм | 20 | | | | | | + | |
| 3 | Простота | 15 | | | + | | | | |
| 4 | Обслуговування | 14 | | | | + | | | |
| 5. | Адаптивність | 10 | | | | | + | | |

За табл. 5.12 можна дійти висновків, що запропонований стартап продукт має достатньо великий рейтинг відносно конкурентів. Головними особливостями, чим може виділитись даний продукт є: якість, швидкий та точний алгоритм, та адаптивність. Головним напрямом на майбутнє є покращення обслуговування, збільшення простоти продукту як у виробництві, так і в експлуатації.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу. Складаються матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities). Дані заносяться у табл. 5.13 на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін з табл. 5.13 [41].

Таблиця 5.13. SWOT- аналіз стартап-проекту

| | |
|--|--|
| <i>Сильні сторони:</i> | <i>Слабкі сторони:</i> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Якість 2. Стабільна робота 3. Адаптивність | <ol style="list-style-type: none"> 1. Обслуговування 2. Складність виготовлення та експлуатації 3. Відсутність репутації на ринку 4. Високий поріг входження |
| <i>Можливості:</i> | <i>Загрози:</i> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Збільшення продаж; 2. Отримання державних замовлень; 3. Вихід на міжнародний ринок; 4. Зменшення податкового тиску, 5. Отримання тендерів на послуги. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Конкуренція 2. Залежність від постачальника 3. Стандартизація 4. Вартість розробки |

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки та перелік заходів для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Результати наведені в табл. 5.14 [41].

Таблиця 5.14. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

| <i>№ n/n</i> | <i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i> | <i>Ймовірність отримання ресурсів</i> | <i>Строки реалізації</i> |
|------------------|--|---|--------------------------|
| 1 | Вихід на ринок з нижчою якістю | 70% | 3 місяців |
| 2 | Вихід на ринок кооперативно з конкурентами | 90% | 6 місяців |
| 3 | Представлення користувачам продукту із значною складністю в експлуатації але з активною підтримкою | 50% | 8 місяців |

Відповідно до проведеного аналізу, умови виходу на ринок доволі сприятливі, використання запропонованих стратегій має достатню імовірність отримання ресурсів, та строки реалізації не дуже значні. Є можливість вийти на ринок, як самостійно так і разом з конкурентом. Однак випуск недоробленого продукту є небажаним, але запропоновані методи є доволі сприятливими та реальними. Як результат строки виходу на ринок коливаються від 3 до 8 місяців.

5.3 Розроблення ринкової та маркетингової програми стратегії проекту

Першим кроком для розроблення ринкової стратегії є визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів. Дану інформацію занесено в табл. 5.15 [41].

Таблиця 5.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів

| <i>№ n/n</i> | <i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i> | <i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i> | <i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i> | <i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i> | <i>Простота входу у сегмент</i> |
|-----------------------------------|---|--|--|---|-------------------------------------|
| 1 | Промислові компанії | Висока | Середній | Висока | Середня |
| 2 | Державні організації | Висока | Високий | Середня | Висока |
| 3 | Військові організації | Висока | Високий | Висока | Низька |
| 4 | Цивільні | Середня | Низький | Середня | Висока |
| Які цільові групи обрано: 1, 2, 3 | | | | | |

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали промислові компанії, державні та військові організації. Такий вибір пов'язаний з напрямом продукту та його прямим використанням. Продукт підлягає використанню його в військовій сфері, державних організаціях які підлягають постійній охороні. Група цивільних не розглядається, так як попит дуже не значний.

Наступним етапом є формування базової стратегії розвитку, для роботи в обраному сегменті. Стратегія наведена у табл. 5.16.

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії розвитку

| <i>№ n/n</i> | <i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i> | <i>Стратегія охоплення ринку</i> | <i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i> | <i>Базова стратегія розвитку</i> |
|------------------|---|---|---|--|
| 1 | 1, 2 та 3 | Диференційованого маркетингу (Визначити потреби кожної з цільових груп, | Оперативне реагування на зміни в ринковому попиті, орієнтованість на | Диференціації |

| | | | | |
|--|--|---|---|--|
| | | розробити стратегії приваблення споживачів та маркетингові комунікації) | кінцевого споживача, висока якість продукту | |
|--|--|---|---|--|

Обрана стратегія диференціації гано підходить для розвитку проекту в обраних галузях на ринку. Так як основним завданням є створення якісного продукту який повинен бути відомим серед груп потенційних клієнтів, для чого буде вводиться стратегія маркетингу. Також за для можливість отримання державних замовлень необхідно гарно себе зарекомендувати та показати.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.17).

Таблиця 5.17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| <i>№ n/n</i> | <i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i> | <i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i> | <i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i> | <i>Стратегія конкурентної поведінки</i> |
|------------------|---|---|--|---|
| 1 | Ні | Так | Ні | Виклику лідера |

Як висновок, стартап не є «першопрохідцем», так як на ринку вже існують конкуренти які мають зазначений функціонал, як в нашому проекті. Але головною метою є представлення більш якісного продукту за розумну ціну, за для пошуку та перехоплення споживачів у конкурентів. Але, тим самим, продукт буде унікальним завдяки сучасним методам обробки зображення та розпізнавання обличь.

Наступним етапом є, на основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 5.6), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 5.16) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.17) розробити стратегію позиціонування (табл. 5.18). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку або проект [41].

Таблиця 5.18. Визначення стратегії позиціонування

| <i>№ n/n</i> | <i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i> | <i>Базова стратегія розвитку</i> | <i>Ключові конкурентоспроможні і позиції власного стартап-проекту</i> | <i>Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i> |
|------------------|--|--|--|---|
| 1 | Якість; Точність і швидкість виконання алгоритму; Адаптивність; Простота; | Стратегія оптимальних витрат | Висока якість продукту. Активна підтримка та гарантії; Простота в експлуатації | Якість зображення; Швидкість роботи та точність; Надійність; Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка. |

Результатом виконання підрозділу має стати узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап компанії на ринку.

Першим кроком у розробці маркетингової програми стартап проекту є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.19 ми підсумували результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| <i>№ n/n</i> | <i>Потреба</i> | <i>Вигода, яку пропонує товар</i> | <i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i> |
|------------------|--|--|---|
| 1 | Мала за розмірами камера, з гарною якістю зображення, яка дозволяє вести відеоспостереження вночі в гарній якості. | Використання поляриметричних тепловізійних камер побудованих на основі архітектури поділу площини та мікроболометричної матриці надає гарне зображення. Розміри камери малі та сама камера універсальна. | Надійність, якість зображення, ефективність роботи, універсальність та простота |
| 2 | Швидкий та надійний алгоритм розпізнавання обличчя | Розпізнавання обличчя на основі словникового навчання ознак | Точність, швидкість роботи, ефективність |

На основі описаних потреб та пропозицій можна дійти висновку, що продукт гарно підходить для створення маркетингової програми. Він має чимало переваг порівняно з конкурентами, надійну та якісну систему.

Тепер можна перейти до розробки тривіальної маркетингової моделі товару. Для цього уточнюється ідея продукту та послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання. Данні занесені до табл. 5.20 [41].

Таблиця 5.20. Опис трьох рівнів моделі товару

| <i>Рівні товару</i> | <i>Сутність та складові</i> | | |
|--|--|------|----------------|
| I. Товар за задумом | <ul style="list-style-type: none"> Система відеоспостереження у нічний час з функцією розпізнавання обличчя. Система використовує поляриметричну тепловізійну камеру з мікроболометричною матрицею. Такі камери мають малі габаритні розміри. Сам поляриметр побудований на основі архітектури поділу площини – дана архітектура є надійною та забезпечує якісне поляриметричне зображення. Сама система розпізнавання обличчя побудована на основі словникового навчання ознак, що дозволяє швидко виконувати розпізнавання особи без використання великих ресурсів. | | |
| II. Товар у реальному виконанні | Властивості/характеристики | М/Нм | Вр/Тх /Тл/Е/Ор |
| | 1. Малогабаритність | М | Тл |
| | 2. Швидкість роботи | Нм | Тх |
| | 3. Надійність | Нм | Вр |
| | 4. Точність | Нм | Тх |
| | 5. Вартість | М | Е |
| | Якість: відповідає нормам ДСТУ EN IEC 62676-5:2019 | | |
| | Пакування: Набір камер, та ПЗ встановлене на носій або через цифрову версію | | |
| Марка: | | | |
| III. Товар із підкріпленням | До продажу забезпечення системи відеоспостереження, безкоштовна установка всього обладнання та ПЗ | | |
| | Після продажу гарантія 5 років, технічна підтримка та консультація | | |
| Захист товару проводиться шляхом патентування приладу. Використовуються ліцензії для захисту програмного та апаратного забезпечення. | | | |

З табл. 5.20 видно, що комплектація та сервіс продукту є дуже високим. Для забезпечення захисту цифрових даних, програмного коду та архітектури продукти

використовуються патенти та системи захисту ПЗ. Також використовуються ліцензії які забороняють копіювання програмного коду. Гарантія на 5 років і технічна підтримка ідуть на зустріч користувачам, що робить даний продукт більш імовірним для покупки серед замовників.

Наступним кроком розробки маркетингової моделі є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар, яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів. Аналіз проводиться експертним методом і результати заносяться в табл. 5.21 [41].

Таблиця 5.21. Визначення меж встановлення ціни

| <i>№ n/n</i> | <i>Рівень цін на товари-замінники</i> | <i>Рівень цін на товари-аналоги</i> | <i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i> | <i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i> |
|------------------|---|---|---|--|
| 1 | 7000 – 20000 грн | 20000 – 100000 грн | 100000 грн і вище | 50000 – 75000 грн |

Для даного типу товару було обрано категорію трішки вище середнього, так як такі системи зазвичай використовуються в різних установах та організаціях, звичайні люди такі системи встановлюють нечасто. Також для забезпечення замовника всім необхідним, перш за все треба закупити тепловізійні камери, бо на початку свого виготовлення ми не маємо, тому необхідно відбивати витрати на камери.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення. Дані заносяться до табл. 5.22.

Таблиця 5.22. Формування системи збуту

| <i>№ n/n</i> | <i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i> | <i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i> | <i>Глибина каналу збуту</i> | <i>Оптимальна система збуту</i> |
|------------------|--|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Продаж | Доставка товару, встановлення та налаштування. Підтримка в процесі експлуатації | Нульового рівня | Безпосередній (прямий) |

Доставка товару, повне встановлення та налаштування – це гарний тон для високоякісних систем. Тому дані функції збуту є найбільш ефективними. Основний канал збуту це продаж, нічого іншого не передбачається. Через не дуже великий попит на такі системи, немає сенсу використовувати підрядника, тому було обрано безпосередню систему збуту нульового рівня.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів. Результати наведені у табл. 5.23 [41].

Таблиця 5.23. Концепція маркетингових комунікацій

| <i>№ n/n</i> | <i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i> | <i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i> | <i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i> | <i>Завдання рекламного повідомлення</i> | <i>Концепція рекламного звернення</i> |
|------------------|---|---|---|---|--|
| 1 | Необхідність в системі відеоспостереження для охорони та контролю, спонукає до придбання таких систем | Веб-сайти, інтернет магазини, месенджери, реклама, email | Якість, точність, ефективність роботи, надійність, підтримка в процесі експлуатації | Довести потенційним клієнтам якість та точність продукту за розумні гроші | Показ можливостей, прилад використання, спонсори та компанії які співпрацюють з нами |

Як результат ми отримуємо маркетингову комунікацію яка проходить через рекламу. За основу взято донести якість та надійність нашого товару, використовуючи приклади використання, або показуючи компанії які співпрацюють з нами. Також необхідна реклама веб сайту порталу, розсилки в email та створення технічної підтримки у месенджерах для Q&A чату.

5.5 Висновки до розділу

В даному розділі було проведено розробку стартап проекту системи нічного відеоспостереження з функцією розпізнавання обличь. Було проведено повний аналіз ринку, результати якого показали, що ринок активно розвивається як в Україні так і за кордоном. Поріг входження на ринок є доволі високий, тому було проаналізовано всі плюси та мінуси нашого продукту та проведено порівняння з потенційними конкурентами. Результати показали можливість вийти на ринок протягом 3-8 місяців. Для створення конкуренції було обрано стратегію розвитку яка сконцентрована на якість, надійність та точність товару. Також акцент буде робитись на маркетинг, ціль якого буде донести потенційним клієнтам всю надійність та можливості продукту.

В свою чергу було проведено аналіз цільової групи, і обрано розвиток в напрямку ринку промислових компаній, державних та військових організацій, тому що там найбільший потенціал для розвитку та прибуток. А для того, щоб привабити клієнтів було розроблено маркетингову компанію, обрано основні її напрями та цілі.

Як результат, аналіз показав потенційно можливим вихід на ринок та спішний розвиток, але залишаються проблеми стосовно високого порогу входження, а саме необхідність у чималому стартовому капіталі. Але було проведено аналіз альтернативного ринкового впровадження стартап проекту, де є можливість вийти на ринок разом з конкурентами.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській дисертації було проведено дослідження гетерогенного розпізнавання обличь для тепловізійних поляриметричних зображень, запропонований алгоритм розпізнавання обличь та реалізовано частину, яка відповідає за цифрову обробку зображень видимого та ІЧ діапазонів. Для цього в роботі було проведено наступні етапи:

1. Загальний аналіз теми та огляд вже наявних алгоритмів.

Було проведено загальний огляд теми, наведені основні етапи дослідження та методи їх реалізації. Перш за все оглянули загальну структуру систем спостереження. Та дійшли висновку що використання поляриметричних тепловізорів дає можливість значно покращити розпізнавання обличь в ІЧ діапазоні. Також було оглянуто плюси та мінуси явища поляризації та наведені існуючі методи гетерогенного розпізнавання обличь. На основі оглянутого матеріалу було поставлена загальна мета та завдання роботи і план її реалізації.

2. Огляд принципів побудови поляриметричних тепловізійних камер

Так як завдання стоїть дослідити систему розпізнавання обличь в ІЧ діапазоні, використовуючи явище поляризації, була необхідність розглянути загальні принципи побудови поляриметричних тепловізорів. Це було проведено для того, щоб зрозуміти загальний принцип їх роботи, на основі цієї інформації можна досягти розуміння, як саме обробляти поляриметричні дані про об'єкт. Також була необхідність обрати найбільш оптимальний поляриметричний тепловізор, який давав би змогу вирішити поставлені задачі. Тому, було розглянуто архітектури поляриметрів, на основі яких проектують тепловізори. Як результат, ми обрали найбільш оптимальну архітектуру побудови поляриметричних тепловізорів на основі поділу фокальної площини, а з цим і камеру Рухіс, яка гарно підходить для виконання поставлених задач.

3. Фізико-математична модель поляриметричного тепловізора

На цьому етапі було більш детально оглянуто сам принцип роботи поляриметра, та явища поляризації в цілому. А саме, як обробляти поляриметричні дані про об'єкт які приходять нам від поляриметричного тепловізора. Які є методи обробки цих даних та їх покращення. Використовуючи оглянуті методи, у нас є змога обробити та підготувати дані для подальшого їх використання у системі розпізнавання обличь.

4. Виконання цифрової обробки зображення для системи розпізнавання обличь

На цьому етапі виконувалась основна задача дипломного проекту. А саме, створення системи гетерогенного розпізнавання обличь. Головним завданням магістерської дисертації є створення системи, яка буде виконувати цифрову обробку зображень обличь зроблених у видимому та ІЧ діапазонах, для того щоб отримати синтезовані зображення зі схожими між собою параметрами, використовуючи які можна ефективно виконувати розпізнавання. Для цього було використано словникове навчання ознак. Описано алгоритм рішення задач мінімізації, які постають у процесі використання розрідженого навчання. Також було виконано попередню цифрову обробку синтезованих зображень, з ціллю покращити зображення для системи розпізнавання обличь. Як результат, було розроблено алгоритм системи гетерогенного розпізнавання обличь, та наведено приклади роботи цифрової обробки описаної системи.

5. Розробка стартап-проекту

Було розроблено стартап-проект за темою магістерської дисертації. Проаналізовано можливості виходу на ринок даного продукту. Також, було розглянуто стратегії та методики розробки стартапу та розроблено маркетингову стратегію. За результатами, отриманими на цьому етапі, дійшли до висновку, що шанси вийти на ринок є та описані основні умови виходу.

В загальному поставлені задачі було виконано та підкріплено матеріалом. Наступним етапом буде розробка моделі, яка буде виконувати саме розпізнавання після того як над зображеннями було виконано цифрову обробку розроблену в цій

роботі. Також, можливо, буде виконуватись поліпшення розробленої системи та оптимізація. Тобто головним завданням наступних робіт по даній темі, буде закінчення розробки системи розпізнавання обличь.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

- [1] Monahan, Torin, and David Murakami Wood, eds. *Surveillance Studies: A Reader*. Oxford University Press, 2018.
- [2] Crocco, Marco, et al. "Audio surveillance: A systematic review." *ACM Computing Surveys (CSUR)* 48.4 (2016): 1-46.
- [3] Колобродов, В. Г., and Н. Шустер. "Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підручник для вузів." К.: Тираж (1999).
- [4] Dong, Chunhua, et al. "Cross polarimetric thermal-to-visible heterogeneous face recognition by coupled dictionary learning." *Infrared Technology and Applications XLVI*. Vol. 11407. SPIE, 2020.
- [5] Прохоров, А. М. "Советский энциклопедический словарь/Гл. ред. АМ Прохоров.—4-е изд." М.: Сов. Энциклопедия.—1632 с (1989).
- [6] Колобродов, Валентин Георгійович. "Хвильова оптика. Частина 2. Дифракція і поляризація світла." (2018).
- [7] Zhao, Yongqiang, et al. "Multi-band polarization imaging." *Multi-Band Polarization Imaging and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016. 47-71.
- [8] Hickman, Duncan L., et al. "Polarimetric imaging: system architectures and trade-offs." *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XV*. Vol. 10795. SPIE, 2018.
- [9] Di, Xing, et al. "Polarimetric thermal to visible face verification via self-attention guided synthesis." *2019 International Conference on Biometrics (ICB)*. IEEE, 2019.
- [10] Riggan, Benjamin S., Nathaniel J. Short, and Shuowen Hu. "Thermal to visible synthesis of face images using multiple regions." *2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE, 2018.
- [11] Zhang, He, et al. "Synthesis of high-quality visible faces from polarimetric thermal faces using generative adversarial networks." *International Journal of Computer Vision* 127.6 (2019): 845-862.
- [12] Sarfraz, M. Saquib, and Rainer Stiefelhagen. "Deep perceptual mapping for cross-modal face recognition." *International Journal of Computer Vision* 122.3 (2017): 426-438.

- [13] Yi, Dong, Zhen Lei, and Stan Z. Li. "Shared representation learning for heterogeneous face recognition." 2015 11th IEEE international conference and workshops on automatic face and gesture recognition (FG). Vol. 1. IEEE, 2015.
- [14] Huang, Xiangsheng, et al. "Regularized discriminative spectral regression method for heterogeneous face matching." *IEEE Transactions on Image Processing* 22.1 (2012): 353-362.
- [15] Dong, Chunhua, et al. "Cross polarimetric thermal-to-visible heterogeneous face recognition by coupled dictionary learning." *Infrared Technology and Applications XLVI*. Vol. 11407. SPIE, 2020.
- [16] Brown, Dane. "Investigating Combinations of Feature Extraction and Classification for Improved Image-Based Multimodal Biometric Systems at the Feature Level", 2018.
- [17] Von Gioi, Rafael Grompone, et al. "LSD: A line segment detector." *Image Processing On Line* 2 (2012): 35-55.
- [18] Tyo, J. Scott, et al. "Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications." *Applied optics* 45.22 (2006): 5453-5469.
- [19] El Ketara, Mohamed, M. Vedel, and S. Breugnot. "Acquisition method improvement for Bossa Nova Technologies' full Stokes, passive polarization imaging camera SALSAs." *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XII*. Vol. 9853. SPIE, 2016.
- [20] Cremer, Frank, Wim De Jong, and Klammer Schutte. "Infrared polarization measurements and modelling applied to surface laid anti-personnel landmines." *Optical Engineering* 41.5 (2002): 1021-1032.
- [21] Kudenov, Michael W., J. Larry Pezzaniti, and Grant R. Gerhart. "Microbolometer-infrared imaging Stokes polarimeter." *Optical Engineering* 48.6 (2009): 063201.
- [22] Pezzaniti, J. Larry, and David B. Chenault. "A division of aperture MWIR imaging polarimeter." *Polarization Science and Remote Sensing II*. Vol. 5888. Spie, 2005.
- [23] Malone, Neil R., et al. "Detection comparisons between LWIR and MWIR polarimetric sensors." *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII*. Vol. 6972. SPIE, 2008.
- [24] Felton, M., et al. "Measured comparison of the crossover periods for mid-and long-wave IR (MWIR and LWIR) polarimetric and conventional thermal imagery." *Optics express* 18.15 (2010): 15704-15713.
- [25] Felton, M., et al. "Comparison of the inversion periods for MidIR and LWIR polarimetric and conventional thermal imagery." *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing IX*. Vol. 7672. SPIE, 2010.

- [26] Chenault, David B., J. Larry Pezzaniti, and Justin P. Vaden. "Pyxis handheld polarimetric imager." *Infrared Technology and Applications XLII*. Vol. 9819. SPIE, 2016.
- [27] Chipman, R. A. "Polarimetry. *Handbook of Optics*, vol. 2, 2nd edn, Chap. 22." (1995).
- [28] Thompson, Brian J., Dennis Goldstein, and Dennis H. Goldstein. "Polarized Light, revised and expanded." (2003).
- [29] Hickman, Duncan L., et al. "The utility of polarimetry within passive military imaging systems." *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV*. Vol. 10433. SPIE, 2017.
- [30] Cronin, Thomas W., and Justin Marshall. "Patterns and properties of polarized light in air and water." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366.1565 (2011): 619-626.
- [31] Berthier, Serge, Magali Thomé, and Priscilla Simonis. "Circular polarization in nature: factual, theoretical and experimental summary." *Materials Today: Proceedings* 1 (2014): 145-154.
- [32] Lavigne, Daniel A., et al. "Target discrimination of man-made objects using passive polarimetric signatures acquired in the visible and infrared spectral bands." *Polarization Science and Remote Sensing V*. Vol. 8160. SPIE, 2011.
- [33] Aron, Y., and Y. Gronau. "Polarization in the MWIR: a method to improve target acquisition." *Infrared Technology and Applications XXXI*. Vol. 5783. SPIE, 2005.
- [34] Gamiz, Victor L., and John F. Belsher. "Performance limitations of a four-channel polarimeter in the presence of detection noise." *Optical Engineering* 41.5 (2002): 973-980.
- [35] Simmons, J. F. L., and B. G. Stewart. "Point and interval estimation of the true unbiased degree of linear polarization in the presence of low signal-to-noise ratios." *Astronomy and Astrophysics* 142 (1985): 100-106.
- [36] Ben-Dor, Baruch, Uri P. Oppenheim, and Leslie Salem Balfour. "Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared." *8th Meeting on Optical Engineering in Israel: Optical Engineering and Remote Sensing*. Vol. 1971. SPIE, 1993.
- [37] Zhao, Yong-qiang, et al. "Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion." *Computer Vision and Image Understanding* 113.8 (2009): 855-866.
- [38] Lavigne, Daniel A., and Mélanie Breton. "A new fusion algorithm for shadow penetration using visible and midwave infrared polarimetric images." *2010 13th International Conference on Information Fusion*. IEEE, 2010.

- [39] Танчук В.С. Неоднорідне розпізнавання обличчя поляризаційним тепловізором, використовуючи словникове навчання ознак, 2022-4с
- [40] Lebrun, Marc, and Arthur Leclaire. "An implementation and detailed analysis of the K-SVD image denoising algorithm." *Image Processing On Line* 2 (2012): 96-133.
- [41] Гавриш, Олег Анатолійович, et al. "Розроблення стартап-проекту." (2016).