

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

«На правах рукопису»
УДК 621.384

До захисту допущено:

Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація
на здобуття 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: «Автоматична багатоканальна оптико-електронна система виявлення
малорозмірних безпілотних літальних апаратів
(МБЛА)»

Виконала:

Студентка VI курсу, групи ПО-11мп
Васильчук Єлизавета Олексіївна _____

Науковий керівник:

Доцент, д.т.н.,
Микитенко Володимир Іванович _____

Консультант з розробки стартап-проекту:

Професор, д.е.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.
Студентка _____

Київ – 2022 року

**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

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці**

Васильчук Єлизаветі Олексіївні

1. Тема проекту «Автоматична багатоканальна оптико-електронна система виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів (МБЛА)», науковий керівник дисертації Микитенко Володимир Іванович, доцент, д.т.н., затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. №
2. Термін подання студентом дисертації «02» грудня 2022 р.
3. Об'єкт дослідження: виявлення МБЛА оптико-електронними методами.
4. Предмет дослідження: ефективність використання оптико-електронних методів виявлення МБЛА для забезпечення заданої ймовірності.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести бібліографічний огляд і аналіз МБЛА, як об'єктів виявлення та огляд і порівняльний аналіз оптико-електронних засобів виявлення МБЛА. Провести патентно-бібліографічний пошук та огляд елементної бази оптико-електронних систем виявлення МБЛА видимого та ІЧ діапазонів. Розробка математичної моделі процесів пошуку і виявлення МБЛА оптико-електронними засобами, складення загальної структури моделі, розробка методики розрахунку

відношення сигнал/шум в тепловізійному та телевізійному каналах, дослідження моделі для забезпечення заданих ймовірностей виявлення і розроблення пропозицій щодо вибору найбільш доцільного методу виявлення для заданих умов спостереження, визначення діапазонів змін входних величин телевізійного та тепловізійного каналів – габаритних та енергетичних параметрів об'єктів спостереження, обґрунтування діапазону характеристик оптичної системи та блоку приймача випромінювання телевізійного та тепловізійного каналів, розрахунок енергетичних контрастів та відношень сигнал/шум в інформаційних каналах, розрахунок ймовірностей виявлення об'єкту системою, розроблення пропозицій щодо вибору найбільш доцільного методу виявлення для заданих умов спостереження.

6. Перелік графічного матеріалу: презентація.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 3 наукові праці, з яких: 1 стаття у фаховому виданні категорії Б та 2 тези.

8. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проєкту	Бояринова К.О., д.е.н., проф.; завідувач кафедри економічної кібернетики КІП ім. Ігоря Сікорського		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літературних і патентних джерел	10.2021 – 12.2021 рр.	
2	Вибір напрямку і обґрунтування методу проведення досліджень	12.2021 р.	
3	Розробка структури математичної моделі і опис основних її ланок	01.2022 – 02.2022 рр.	
4	Підготовка матеріалів з результатами досліджень до публікації тез доповідей та участі у конференції	03.2022 – 04.2022 рр.	
5	Дослідження математичної моделі. Розробка розрахункових методик	05.2022 – 10.2022 рр.	
6	Підготовка матеріалів з результатами досліджень до публікації статті у фаховому виданні	10.2022 р.	
7	Розробка пропозицій щодо вибору найбільш доцільного методу виявлення МБЛА. Формулювання висновків дослідження	10.2022 р.	
8	Розроблення стартап проєкту	10.2022 - 11.2022 рр.	
9	Оформлення рукопису дисертації	11.2022 р.	
10	Підготовка доповіді та презентації. Попередній захист дисертації	12.2022 р.	
11	Підготовка супроводжувальних документів. Захист дисертації	12.2022 р.	

Студент

Єлизавета ВАСИЛЬЧУК

Керівник

Володимир МИКИТЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту «Автоматична багатоканальна оптико-електронна система виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів (МБЛА)».

Обсяг роботи – 92 с., 15 ілюстрації, 26 таблиць, 57 джерел посилань.

В даний час відома велика кількість різних типів безпілотних літальних апаратів (БПЛА), здатних виконувати широкий спектр корисних функцій, а з іншого боку, здатних нести потенційну загрозу для різних галузей діяльності людини – господарської, повсякденної та військової. Труднощі їх виявлення та спостереження з використанням сучасних технічних засобів, а також порівняно не висока вартість безпілотних апаратів призводять до підвищення безкарності та масовості протиправних дій з використанням БПЛА. Відповідно з цим – завдання захисту різноманітних об'єктів від впливу БПЛА є однією з актуальних завдань сучасності.

З метою виявлення, розпізнавання та вимірювання координат безпілотних літальних апаратів використовують, насамперед, радіолокаційні, акустичні, оптичні та інфрачервоні методи та засоби.

Оптико-електронні виявники повітряних об'єктів забезпечують можливість розпізнавання цих об'єктів на тлі різних оптичних засвіток, точного виміру дальності до об'єктів та визначення кутових координат. Перспективними є пасивні проєктивні методи, що базуються на застосуванні відеокамер із фоточутливими матрицями денного, нічного та теплового бачення.

Автоматичні оптико-електронні системи виявлення малогабаритних безпілотних літальних апаратів виконують багато різних завдань. Не беручи до уваги прогрес, який був досягнутий у вирішенні цих завдань окремо, на сьогодні не існує комплексного вирішення проблеми автоматичного виявлення в оптичному діапазоні рухомих об'єктів та їх високоточного відстеження в режимі реального часу. Тому актуальною є задача

підвищення ймовірності виявлення та відстеження рухомих об'єктів повітряного середовища у видимій та інфрачервоній області частот в режимі реального часу.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, багатоканальні оптико-електронні системи, енергетичне розділення, еквівалентна шуму різниця температур, відношення сигнал/шум, телевізійний та тепловізійний канали.*

ABSTRACT

Explanatory note to the diploma project "Automatic multi-channel optical-electronic detection system of small unmanned aerial vehicles (UAVs)".

The volume of the work is 92 pages, 15 illustrations, 26 tables, 57 reference sources.

Currently, a large number of different types of unmanned aerial vehicles (UAVs) are known, capable of performing a wide range of useful functions, and on the other hand, capable of carrying a potential threat to various fields of human activity - economic, everyday and military. The difficulties of their detection and observation using modern technical means, as well as the relatively low cost of unmanned aerial vehicles, lead to an increase in impunity and the mass of illegal actions using UAVs. Accordingly, the task of protecting various objects from the influence of UAVs is one of the urgent tasks of our time.

In order to detect, recognize and measure the coordinates of unmanned aerial vehicles, primarily radar, acoustic, optical and infrared methods and tools are used.

Optical-electronic detectors of aerial objects provide the possibility of recognizing these objects against the background of various optical illuminations, accurate measurement of the distance to objects and determination of angular coordinates. Passive projective methods based on the use of video cameras with photosensitive matrices of day, night and thermal vision are promising.

Automatic optical-electronic detection systems of small unmanned aerial vehicles perform many different tasks. Without taking into account the progress that has been achieved in solving these tasks separately, today there is no comprehensive solution to the problem of automatic detection in the optical range of moving objects and their high-precision tracking in real time. Therefore, the task of increasing the probability of detection and tracking of moving objects in the air environment in the visible and infrared frequency range in real time is urgent.

Key words: *unmanned aerial vehicle, multi-channel optical-electronic systems, energy separation, noise-equivalent temperature difference, signal/noise ratio, television and thermal imaging channels.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	11
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1 Аналітичний огляд літературних джерел та патентів	16
1.1 Характеристики об'єкту спостереження	16
1.1.1 Призначення, переваги та недоліки безпілотних літальних апаратів	16
1.1.2 Класифікація БПЛА	19
1.1.3 Малогабаритні безпілотні літальні апарати	22
1.2 Методи виявлення МБЛА	24
1.3 Оптико-електронні засоби виявлення МБЛА видимого діапазону	26
1.4 Оптико-електронні засоби виявлення МБЛА ІЧ-діапазону	29
1.6 Пасивні оптико-електронні методи.....	33
1.6.1 Особливості матричних фоточутливих сенсорів.....	33
1.6.2 OEM вимірювання дальності із використанням матричних сенсорів.....	35
1.7 Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2 Огляд елементної бази оптико-електронних систем виявлення МБЛА видимого та ІЧ діапазонів	40
2.1 Тепловізійна система	40
2.2 Інфрачервона система (ІЧС).....	41
2.3 Лазерна система.....	43
2.4 Огляд багатоканальних оптико-електронних систем.....	44
2.5 Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3 Розробка математичної моделі процесів пошуку і виявлення МБЛА оптико- електронними засобами	50
3.1 Складення загальної структури моделі.....	53

3.2 Розробка методики розрахунку відношення сигнал/шум в тепловізійному та телевізійному каналах.....	58
3.3 Висновки до розділу 3	66
РОЗДІЛ 4 Розроблення стартап-проекту «Обробка зображень в автоматичних багатоканальних оптико-електронних системах виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів»	67
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту.....	67
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	69
4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту	77
4.4 Організація реалізації стартап-проекту.....	81
4.5 Висновки до розділу 4	84
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АР – акустична розвідка

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ЗРК – зенітна керована ракета

ІЧ – інфрачервоний

ІЧС – інфрачервона система

КМОП – комплементарний метал-оксид-напівпровідник

КРУ – канал радіоуправління

ЛА – літальний апарат

МБЛА – малогабаритні безпілотні літальні апарати

ОЕ – оптико-електронний

ОЕМ – оптико-електронні методи

ОЕР – оптико-електронна розвідка

ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком

ПУ – пункт управління

РЕР – радіоелектронна розвідка

РЛС – радіолокаційна станція

РРТР – радіо та радіо-технічна розвідка

ТТХ – тактико-технічні характеристики

ВСТУП

Актуальність теми

Науково-технічний прогрес за останні два десятиліття зробив кілька революцій, які призвели до великого прориву у питаннях використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). З появою середніх та малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) завдання протидії їх застосуванню суттєво актуалізувалися. Починаючи з середини 2000-х років, у засобах масової інформації стали регулярно з'являтися повідомлення про небезпечне використання МБЛА в районах аеропортів, а з середини 2010-х – про їх застосування для ведення несанкціонованого спостереження важливих об'єктів, проведення терактів та диверсій, транспортування заборонених вантажів та широкому використанні БПЛА у військовій справі.

Для організації боротьби з МБЛА насамперед необхідно забезпечити їхнє достовірне виявлення. Для цього існує досить багато різних методів: оптичні, акустичні, радіо.

В даній роботі особливу увагу приділено аналізу ефективності саме оптико-електронних методів виявлення МБЛА.

Адже, проблема спостереження МБЛА будь-якими засобами полягає в малій ефективній площі розсіювання корпусу апарата. Якщо апарат працює в пасивному режимі, то єдиним шляхом підвищення дальності його виявлення є збільшення контрасту його зображення на фоні неба. В оптико-електронних (ОЕ) спостереженнях це можливо зробити з допомогою лазерного підсвічування, спектральної селекції, поляриметричними методами аналізу випромінювання. Перший шлях супроводжується суттєвим ускладненням апаратури ОЕ спостереження, унеможливорює скритність виявлення, а також обмежується по дальності потужністю лазерної підсистеми. Методи спектрального та поляриметричного аналізу є значно перспективнішими.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження за темою дисертації виконувались частково за тематикою науково-дослідних робіт № 2412п «Розробка поляризаційних методів виявлення замаскованих об'єктів тепловізорами аерокосмічного та наземного базування», д/р № 0121U109554, №2315п «Двоканальні оптико-електронні системи виявлення та розпізнавання об'єктів», д/р № 0120U102145.

Мета дослідження: підвищення ймовірності виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів (МБЛА) оптико-електронними методами.

Завдання для досягнення поставленої мети:

1. Провести бібліографічний огляд і аналіз МБЛА, як об'єктів виявлення.
2. Огляд і порівняльний аналіз оптико-електронних засобів виявлення МБЛА.
3. Патентно-бібліографічний пошук та огляд елементної бази оптико-електронних систем виявлення МБЛА видимого та ІЧ діапазонів:
4. Розробка математичної моделі процесів пошуку і виявлення МБЛА оптико-електронними засобами.
 - 4.1 Складення загальної структури моделі.
 - 4.2 Розробка методики розрахунку відношення сигнал/шум в тепловізійному каналі.
 - 4.3 Розробка методики розрахунку відношення сигнал/шум в телевізійному каналі.
 - 4.4 Методика розрахунку ймовірності виявлення об'єкту автоматичною оптико-електронною системою.
5. Дослідження моделі для забезпечення заданих ймовірностей виявлення і розроблення пропозицій щодо вибору найбільш доцільного методу виявлення для заданих умов спостереження:
 - 5.1 Визначення діапазонів змін вхідних величин телевізійного та тепловізійного каналів – габаритних та енергетичних параметрів об'єктів спостереження.
 - 5.2 Обґрунтування діапазону характеристик оптичної системи та блоку приймача випромінювання телевізійного та тепловізійного каналів.

5.3 Розрахунок енергетичних контрастів та відношень сигнал/шум в інформаційних каналах.

5.4 Розрахунок ймовірностей виявлення об'єкту системою.

5.5 Розроблення пропозицій щодо вибору найбільш доцільного методу виявлення для заданих умов спостереження.

Об'єкт дослідження: виявлення МБЛА оптико-електронними методами.

Предмет дослідження: ефективність використання оптико-електронних методів виявлення МБЛА для забезпечення заданої ймовірності.

Методи дослідження

Оптико-електронні методи для виявлення малогабаритних безпілотних літальних апаратів.

Наукова новизна одержаних результатів

Розроблено метод визначення енергетичного розділення автоматичних оптико-електронних систем спостереження невеликої дальності дії, що складається з двох інформаційних каналів – тепловізійного та телевізійного. Обґрунтовано, що для спрощених розрахунків краще використовувати як показники якості функції еквівалентної шуму різниці температур та еквівалентної шуму різниці яскравості відповідного каналу.

Практичне значення (цінність) отриманих результатів

Отримані результати можна використовувати для проведення досліджень на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем приладобудівного факультету Київського політехнічного інституту. Також дану систему можна розміщувати на безпілотниках, на техніці наземного базування.

Апробація результатів дисертації

1. Васильчук Є. О., Микитенко В. І., Оптико-електронні системи виявлення малих об'єктів та методи обробки зображень в них. XXI Міжнародна науково-технічна

конференція "Приладобудування: стан і перспективи", 17-18.05.2022, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, с. 40 – 41.

2. Васильчук, Є. О. Оптико-електронні засоби спостереження малогабаритних літальних апаратів / Є. О. Васильчук, В. І. Микитенко // XVII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 07-08 грудня 2021 р, м. Київ, Україна: збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 38-41.

Публікації

Кравченко І.В., Микитенко В.І., Васильчук Є.О., Енергетичний розрахунок автоматичних оптико-електронних систем спостереження малорозмірних безпілотних літальних апаратів, «Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування», Вип. 64(2), с.26-36, 2022

РОЗДІЛ 1 Аналітичний огляд літературних джерел та патентів

1.1 Характеристики об'єкту спостереження

1.1.1 Призначення, переваги та недоліки безпілотних літальних апаратів

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – літальний апарат літакового або вертолітного типу без екіпажу на борту, політ якого здійснюється або по раніше закладеному маршруту на борт програмі, або шляхом віддаленого керування по каналу зв'язку.

На сучасному етапі розвитку БПЛА призначені для розв'язання широкого спектра завдань: спостереження (розвідки), завдання ударів, транспортування вантажів, цілезазначення іншим засобам ураження, ретрансляції даних тощо. При їх дистанційному управлінні оператором, або шляхом автономних дій за заздалегідь закладеною програмою.

У більшості випадків БПЛА вирішують такі основні завдання [1-3]:

1. ведення спостереження та розвідки, у тому числі і в реальному масштабі часу;
2. завдання ударів по наземних/надводних цілях, самотійно або засобами ураження, що носяться;
3. постановка радіоелектронних перешкод;
4. цілевказівки для інших засобів ураження, а також коригування їх застосування;
5. транспортування та доставка вантажів та коштів у заданий район;
6. ретрансляція даних між віддаленими абонентами мереж зв'язку;
7. відволікання уваги або використання їх як помилкових повітряних цілей.

Терористичні угруповання і особи, які ведуть протизаконну діяльність, застосовують БПЛА (переважно малі БПЛА) для вирішення наступних задач [2, 4, 5]:

1. доступу за периметр об'єктів, що охороняються, і ведення там спостереження;
2. точкове знищення окремих важливих осіб;
3. закидання саморобних засобів ураження;

4. нанесення пошкоджень будинкам, пам'ятникам культури, об'єктам інфраструктури та транспортним засобам;
5. транспортування заборонених засобів або їх закидання на територію, що охороняється;
6. запобігання повітряному руху в аеропортах.

Розглянемо основні особливості БПЛА.

Основними перевагами БПЛА, які роблять складним завдання їх виявлення та протидії, є [3]:

1. можливість віддаленого виконання завдань при безпечному видаленні оператора, і при цьому, забезпечення оператора інформацією про перебіг завдання, що виконується, практично в реальному масштабі часу;
2. застосування широкого спектру малогабаритних цільових навантажень на сучасній елементній базі (радіолокаційних станцій (РЛС), засобів радіоелектронної розвідки (РЕР), бойових частин (БЧ) із спрямованим ураженням та ін.);
3. можливість тривалого перебування над зоною бойових дій, і навіть, можливість самостійного придушення чи поразки засобів ППО;
4. низька помітність БПЛА в радіолокаційному та оптичному діапазонах за рахунок нижчих масогабаритних характеристик, порівняно з пілотованими літальними апаратами (ЛА), та широкого застосування в конструкції БПЛА пластикових та композитних матеріалів;
5. можливість здійснювати маневри з високими навантаженнями та використовувати режими польоту, що призводять до зниження ефективності існуючих та перспективних засобів ППО – можливість польоту на гранично малих висотах (до 50 м) з використанням захисних властивостей рельєфу місцевості, а також на низьких швидкостях польоту (10-30 м/с). При цьому більшість сучасних ЗРК мають обмеження на обстріл повітряних цілей за їх мінімальної висоти до 1 км та мінімальної швидкості до 100 м/с. Крім того, при прийомі відбитих сигналів РЛС

від малорозмірних, малошвидкісних БПЛА можливе їх попадання в строби захисту РЛС від пасивних перешкод та стаціонарних предметів (що робить БПЛА нерозрізненими для РЛС на тлі місцевості або у хмарі пасивних перешкод);

6. малі геометричні розміри, що зумовлюють низькі значення ймовірностей ураження знарядями зенітної артилерії, а також що призводять до неспрацьовування радіопідричників зенітних керованих ракет (ЗКР) при їх підльоті в район малорозмірної мети;
7. скритність застосування БПЛА, що забезпечується відносною безшумністю їх двигунів, а також за рахунок польоту в режимі «радіо мовчання» до виходу в зону безпосереднього бойового застосування.

Специфіка льотно-технічних характеристик БПЛА обумовлює низку додаткових, вкрай важливих, переваг їх побудови та експлуатації [3]:

1. застосування класичної аеродинамічної схеми, яка забезпечує стійкість і простоту управління;
2. можливість оснащення БПЛА електричними двигунами, які вигідно відрізняються простотою в експлуатації;
3. можливість використання нетрадиційних видів енергії для двигунів (сонячних батарей, кріогенного палива та ін.), що дозволяють застосовувати БПЛА без обмеження їхнього польоту за часом;
4. значне зниження загального рівня витрат, пов'язаних з перекиданням та тимчасовим базуванням досить компактних підрозділів БПЛА в райони бойового призначення, ремонтом та обслуговуванням БПЛА;
5. низька вартість розробки та експлуатації БПЛА, яка менша вартості сучасних пілотованих ЛА, що виконують багато виконують багато аналогічних бойових завдань.

Основними недоліками БПЛА є [3, 6]:

1. обмеження щодо застосування залежно від часу доби та погодних умов для окремих

категорій БПЛА;

2. низька інтелектуальність дій в автономному режимі;
3. низька скритність каналів радіоуправління (КРУ) та передачі даних;
4. низька живучість конструкції;
5. схильність КРУ і каналу супутникової навігації БПЛА впливу радіоелектронних перешкод;
6. порівняно невелика дальність дії дистанційного керування БПЛА з пунктів управління (ПУ) за відсутності додаткових засобів ретрансляції;
7. обмеження за масою та складом корисного навантаження.

1.1.2 Класифікація БПЛА

При розгляді завдання протидії БПЛА слід класифікувати їх за масогабаритними характеристиками та швидкістю, а також за призначенням та застосуванням.

У таблиці 1.1 представлена гармонізована класифікація БПЛА.

Також додатково до зазначених у таблиці 1.1 типів БПЛА слід враховувати їхню додаткову класифікацію.

Через велике значення саме швидкості БПЛА при його перехопленні засобами ЗРК ППО, пропонується розрізняти такі типи БПЛА в залежності від їх функціональної швидкості польоту [7]:

1. малошвидкісні БПЛА – зі швидкостями польоту до 200 км/год (з максимальною швидкістю польоту у цьому класі – 250 км/год);
2. середньшвидкісні БПЛА - зі швидкостями польоту від 150 до 400 км/год (з
3. максимальною швидкістю польоту у цьому класі – 450 км/год);
4. івидкісні БПЛА – зі швидкостями польоту від 350 до 800 км/год (з максимальною швидкістю польоту в цьому класі - 900-980 км/год).

За призначенням слід розрізняти такі БПЛА [7]:

1) БПЛА багаторазового застосування:

1. розвідувальні БПЛА;
2. розвідувально-ударні БПЛА;
3. транспортні БПЛА;
4. БПЛА – носії засобів озброєння;
5. БПЛА, що розширюють функціональні можливості носія;
6. розділяючі БПЛА;
7. БПЛА – перехоплювачі.

2) БПЛА одноразового застосування:

1. БПЛА – хибні цілі;
2. барражуючі «БПЛА-камікадзе»;
3. розвідувально-ударні «БПЛА-камікадзе»;
4. БПЛА – перехоплювачі.

Таблиця 1.1 – Гармонізована класифікація БПЛА [8]

Клас БПЛА	Категорія	Міжнародне позначення	Позначення	Назва	Вага, кг	Радіус дії, км	Практична межа, км	Тривалість польоту, год
Малі	I	η	η	Нано	до 0,025	до 1	0,1	≤1
		μ	μ	Мікро	до 5	до 10	3	1
		mini	міні	Міні	до 25	10-40	3	≤4
Легкі	II	CR	БлД	Ближньої дії клас 1	25-50	25-75	3	2-4
				Ближньої дії клас 2	50-150	50-100	3	≤6

Продовження таблиці 1.1

Середні	III	SR	МД	Малої дальності	до 200	до 150	4	6-8
		MR	СД	Середньої дальності	до 500	200	5	10-12
	IV	MRE		Середньої дальності з великою тривалістю польота	500	500	8	10-18
		LADP	БД	Маловисотний великої дальності	до 250	більше 250	до 4	1,5-2
Тяжкі	V	LALE		Маловисотний з великою тривалістю польота	до 250	більше 500	4	18
	V-VI	MALE		Середньовисотний з великою тривалістю польота	до 100	більше 1000	8	24
	VII	HALE		Висотний з великою тривалістю польота	до 2500	більше 4000	20	Більше 24
Бойові	VIII	UCAV	Б	Безпілотний ударний	більше 1000	більше 500	12	1,5-2
		DEG		Помилкова ціль	150-500	0-500	0,05-5	до 4
		TGT		Повітряна ціль	10-1000	5-200	0,05-10	Більше 0,5
Змішані	IX	OPA	ОП	Пілотований по вибору (опційно) ЛА	до 200			
		CMA	ПП	Переобладнаний пілотований ЛА				

Відповідно до кількості одночасно застосовуваних БПЛА слід розрізняти [7]:

1. БПЛА одиночного застосування;
2. БПЛА групового застосування.

Відповідно до рівня військового управління, на користь якого БПЛА вирішує завдання, слід розрізняти [7]:

1. стратегічні БПЛА;
2. оперативно-тактичні БПЛА;
3. тактичні БПЛА.

Відповідно до принципу польоту БПЛА слід розрізняти [7]:

1. БПЛА літакового типу;
2. БПЛА вертолітного типу.

1.1.3 Малогабаритні безпілотні літальні апарати

Найбільш складними щодо протидії є малі БПЛА – малогабаритні та малошвидкісні.

Проведемо аналіз малогабаритних безпілотних літальних апаратів. Дослідження питань класифікації показує, що, незважаючи на деяку очевидність ознак та класів, питання класифікації МБЛА є досить важливим. Класифікація МБЛА наведено у табл. 1.2.

Проведений аналіз класифікації МБЛА показав, що за їх основними характеристиками з урахуванням існуючих комплексів ППО та їх можливості виявлення БПЛА для подальшого їх ураження або захоплення МБЛА поділяються на дві основні групи:

1. МБЛА, маса яких досягає від кількох грам до 2 кг, що мають велику масовість виробництва (відповідно використання) та низьку вразливість до існуючих засобів боротьби з повітряними цілями [9].

2. МБЛА, маса яких знаходиться в діапазоні від 2 кг і вище, що мають велику вартість виробництва та вразливість. З урахуванням нових засобів захисту та зв'язки деякі з цих МБЛА можна віднести до першої групи [9].

Таблиця 1.2 – Класифікація МБЛА

Клас			Призначення
1	Мініатюрні БЛА	М Б Л А	Практично повна невидимість у різних спектрах хвиль та безшумність. Застосовуються для ведення розвідки в умовах, які потребують максимальної скритності (включаючи можливість проникнення в приміщення, зайняті супротивником). Це дуже актуально під час веденні бойових дій у місті та в ході антитерористичних операцій
2	Над малі (переносні) БЛА		Забезпечення розвідувальною інформацією невеликих підрозділів – до батальйону включно, груп спеціального призначення, інших підрозділів, що виконують бойові завдання автономно. Їхня належність визначає злітна маса 2-10 кг, корисне навантаження 0,5-2 кг, тривалість польоту – до однієї години
3	Малі БЛА		Ведення розвідки на користь ланки бригади, наведення (цілевказ) вогневих засобів, коригування їх вогню, патрулювання місцевості, виконання ударних завдань, боротьба з БЛА супротивника. БЛА даного класу мають масу 10-50 кг, корисне навантаження - 15-20 кг, радіус дії - до 60 км, тривалість польоту - 4-5 год. На борту БЛА цього класу можливо застосування РЛС міліметрового діапазону. Запуск БЛА вимагає наявності пускової установки

МБЛА застосовують у різних тактичних умовах. Способи їх застосування включають не тільки політ на гранично малих висотах, але й використання різноманітних перешкод, а також зниження радіопомітності, рівня інфрачервоного випромінювання і акустичного шуму. Відмінність від існуючих безпілотних та пілотованих літальних апаратів полягає в тому, що МБЛА мають велику маневреність навіть у складних умовах рельєфу місцевості. Рух у просторі МБЛА можуть здійснювати на гранично малих висотах, у широкому діапазоні швидкостей (до 400 км/год), ущелинах та ярах, у тіні від місцевих височин і за горизонтом. Тому їх виявлення РЛС військових ЗРК є скрутним або неможливим [9].

Крім МБЛА військового призначення все більшого розвитку отримують МБЛА з комерційними завданнями – «дрони» (квадрокоптери, мультикоптери) з дистанційним керуванням. Популярність і доступність «дронів» стрімко зростають [9].

1.2 Методи виявлення МБЛА

Засобами виявлення БПЛА, які використовують відповідні демаскуючі ознаки можуть бути:

1. засоби радіолокаційної розвідки (РЛР) – різні РЛЗ;
2. засоби радіо- та радіотехнічної розвідки (РРТР) – станції контролю радіовипромінювань, пеленгаторні пости;
3. засоби оптико-електронної розвідки (ОЕР) – засоби теле- та фото спостереження у видимому та інфрачервоному (ІЧ) діапазоні;
4. засоби акустичної розвідки (АР) – мікрофони та звукоуловлювачі.

Порівняння різних технологій виявлення представлено в таблиці 1.3. Особливий акцент зроблений на тип підходів, що використовуються для визначення присутності малорозмірних безпілотних літальних апаратів, також показані переваги та недоліки цих технологій.

Таблиця 1.3 – Порівняння методів виявлення МБЛА

Метод	Підхід	Переваги та недоліки
Оптичний	Одна або кілька камер для виконання ідентифікації за рухами дрону	а) Дуже точний на коротких дистанціях; б) Підходить для перевірки та класифікації; в) Чутливий до слабкого зовнішнього освітлення, змінного освітлення та затемнення; г) Важко відрізнити дрони від інших невеликих літаючих об'єктів на великій відстані.

Продовження таблиці 1.3

Звуковий	Звук, створений Літаючими безпілотниками, які використовуються для ідентифікації	а) Можливо відрізнити дрони від птахів за акустичними ознаками; б) Легко перевірити; в) Ефективний тільки на дуже коротких дистанціях.
Лазерний	Подібний до радара, але використовується зворотне розсіювання лазерного світла	а) Чутливий до поганої видимості через погоду, смог або пряме сонячне світло; б) Дуже ефективний для виявлення дронів; в) Основна класифікація можлива на основі розміру цілі, але трутнів і птахів неможливо розрізнити;
Радіолокаційний (пасивний)	Відео потік вниз по лінії зв'язку або електромагнітного розсіювання умовних радіочастотних сигналів	А) Дуже ефективний для виявлення дронів; Б) Можлива локалізація дистанційного пілота; В) Підвищена частота помилкових тривог через перешкоди; Г) Неефективний для автономних дронів.
Радіолокаційний (активний)	Зворотне розсіювання радіочастотного сигналу, що використовується для виконання доплерівського відстеження та ідентифікації на основі відгуку	А) Стійкий до погодних умов і умов освітлення; Б) Дуже ефективний для виявлення сигналу та класифікації дронів; В) Ймовірність виявлення сильно залежить від перерізу радара.

Оптико-електронні методи (ОЕМ) у режимах вимірювань характеризуються високою точністю, що зумовлює їхню успішну інтеграцію з радіоелектронними комплексами різного призначення. Розглянемо різні ОЕМ виміру дальності до об'єктів. Ці ОЕМ можна класифікувати за фізичним принципом в такий спосіб (рис. 1):

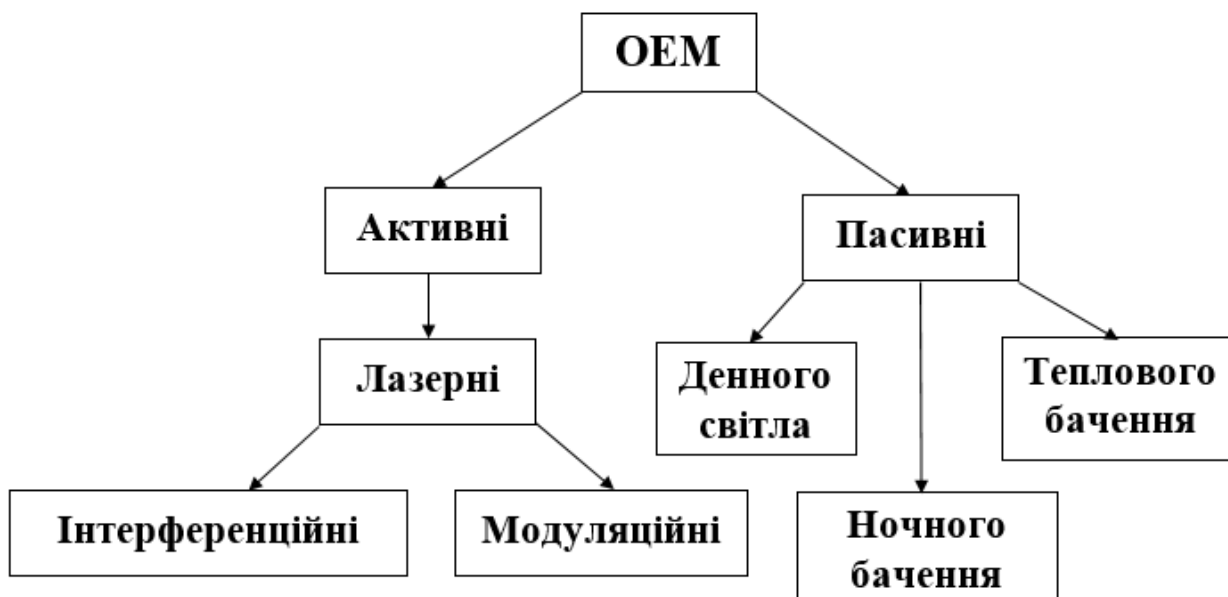


Рисунок 1 – Класифікація ОЕМ за фізичним принципом

1.3 Оптико-електронні засоби виявлення МБЛА видимого діапазону

Оптико-електронні засоби видимого діапазону є достатньо надійним засобом виявлення малорозмірних малошвидкісних БПЛА, що представляють складності для засобів РЛР. Проте, ефективність оптичного виявлення БПЛА істотно залежить від факторів навколишнього середовища, насамперед, від часу доби та погодних умов. Виявлення БПЛА ОЕ засобами допустиме за можливості побудови проекції його візуального обліку вигляду проекції на картинну площину після використання всіх можливих способів підвищення контрастності та відновлення пропущених елементів графічного образу. Збільшення дальності виявлення досягається за рахунок звуження поля зору ОЕ засобів, зменшення зони його огляду та збільшення часу пошуку. Тому ОЕ засоби у видимому діапазоні є не дуже ефективними пристроями для проведення пошуку БПЛА. Однак, при надходженні зовнішніх цілей, наприклад, від РЛС, ці засоби можуть бути ефективно використані для супроводу БПЛА. У порівнянні з пілотованим

ЛА контрастність БПЛА, щодо фону у видимому діапазоні, є невисокою через менші габарити, відсутність на БПЛА світлових маяків, зменшеного або відсутнього факела двигуна та меншої поверхні відбиття [10].

На рис. 1.1 показані рубежі виявлення БПЛА. Ці рубежі розраховані для БПЛА з різними масогабаритними параметрами для ОЕР оснащеному об'єктивом з кутом поля зору 20° і фокусною відстанню $f=230$ мм при метеорологічній дальності видимості не менше 100 км (коефіцієнт розсіювання у видимій області спектру $\gamma \leq 0,0392$).

Із зазначеними на рис. 1.1 даними узгоджується інформація про розрахункову дальність виявлення БПЛА:

- нано, мікро БПЛА: 300-500 м;
- середні БПЛА (типу "Тахіон", "Орлан"): 500-5000 м.

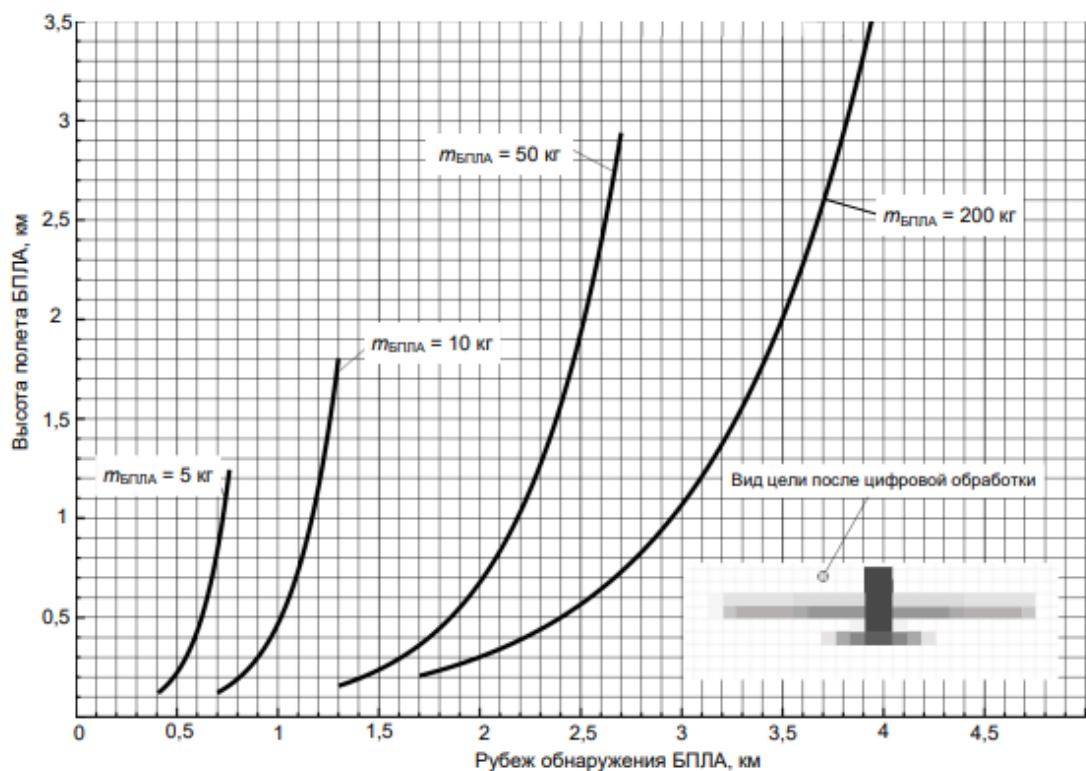


Рисунок 1.1 – Рубежі виявлення БПЛА ОЕ засобами [10]

За даними полігонних випробувань середня дальність візуального виявлення БПЛА наявними ОЕ засобами складає:

- під час спостереження польоту БПЛА у фронт: 100-400 м;
- під час спостереження з бічних ракурсів: 150-700 м.

Досвід полігонних випробувань показав, за фактичних висот польоту малих БПЛА 300-1000 м навіть при застосуванні яскравого забарвлення їх візуальне виявлення дуже ускладнено [11, 12].

Застосування оптичного збільшення в ОЕ засобах, що нині використовуються у вітчизняних ЗРК і ЗАК як дублер-прицілів, систем виявлення та супроводу повітряних цілей, дозволяють збільшити дальність виявлення БПЛА у 4,5-14 разів, зокрема [11]:

- зі збільшенням 4,5-крат – до 2,2 км;
- зі збільшенням 14-крат – до 6,7 км.

Однак очевидно, що при оптичному збільшенні знижуватиметься ймовірність виявлення БПЛА через звуження області оглядового простору [11].

При розгляді зазначених значень необхідно врахувати, що ці дальності отримані для ідеальних погодних умов та відсутності різних випадкових перешкод чи шумів, які виникають у ОЕС [11]. Зменшення дальності виявлення в конкретних умовах щодо дальності в ідеальних умовах приблизно можна оцінити по зміні сили оптичного випромінювання (потужність випромінювання на одиницю тілесного кута) для приймача ОЕ засобу. Димка, вологість, опади призводять до суттєвого зниження прозорості атмосфери в областях спектру в яких працюють ОЕ приймачі та робить їх застосування неефективним [7].

Аналізуючи тактико-технічні характеристики (ТТХ) ОЕ засобів додатково необхідно відзначити наступне. У ОЕ засобах із дискретним скануванням, час огляду робочої області (зони, сектора) простору, зазвичай, вимірюється одиницями секунд. Так, ОЕ засіб на зенітному ракетно-артилерійському комплексі (ЗРАК) «Палаш/Пальма», при миттєвому полі зору ТВ-системи $2^{\circ} \times 3^{\circ}$, забезпечує виявлення повітряних цілей на

дальності 6-10 км, потрібний час автоматичного пошуку в кутовому полі – секторі $60^\circ \times 16^\circ$ становить близько 3 с. При азимутальному куті огляду 180° , час одноразового перегляду простору буде наближатися до 10 с, а при азимутальному куті 360° , необхідному, наприклад, для відбиття групової атаки з різних напрямків, час огляду стає неприпустимо великим. Існуючі тенденції розвитку ОЕ засобів передбачають перехід до багатоканального виявлення БПЛА, проте на існуючих комплексах протидії БПЛА такі засоби не набули широкого поширення [13].

1.4 Оптико-електронні засоби виявлення МБЛА ІЧ-діапазону

Крім ОЕ засобів, що працюють у видимому діапазоні, виявлення БПЛА можливе ОЕ засобами, що працюють в ІЧ-діапазоні. ОЕ засоби ІЧ-діапазону особливо ефективні в нічний час. Тепло від БПЛА виділяється, в основному, силовою установкою і, щонайменше, електронними компонентами, а також точками гальмування на несучих краях крил, пропелерів і гвинтів. Розробники БПЛА намагаються знизити випромінювання в ІЧ-діапазоні в напрямку розміщених на землі приймачів і пере напрямити це випромінювання вгору. Крім того, у конструкції БПЛА можуть використовуватись матеріали з високою теплопровідністю, такі як срібло та алюміній. У кожному конкретному випадку можливість БПЛА бути виявленим у ІЧ-діапазоні визначається його тепло-випромінювальною здатністю, контрастом і площею випромінювання [14].

Необхідно відзначити, що ефективність ОЕ засобів ІЧ-діапазону істотно залежить від погодних умов. В умовах серпанку, вологості, опадів помітність БПЛА в ІЧ-діапазоні суттєво знижується, особливо для довжин хвиль $\lambda = 0,76 \dots 5$ мкм. Це тому, що крім польоту БПЛА з повітряно-реактивним двигуном (ВРД) на форсованих режимах та БПЛА з ракетним двигуном твердого палива (РДТТ), основним джерелом ІЧ-

випромінювання є елементи корпусу БПЛА, які прикривають відсіки з силовою установкою та деталі вихлопної системи. Ці ділянки конструкції БПЛА, проте, відрізняються невисокими значеннями теплових потоків $q \leq 25 \dots 50$ Вт/см², і, відповідно, низька сила їх випромінювання з урахуванням зниження прозорості атмосфери не дозволяє використовувати ОЕ засоби ІЧ-діапазону для підвищення ймовірності виявлення БПЛА. При цьому БПЛА з електродвигунами принципово відрізняються гранично низькими рівнями ІЧ-помітності [7].

Додатково слід зазначити, що для зниження помітності БПЛА можуть вибиратися профілі та напрямки їх польоту, що знижують ефективність ОЕ засобів видимого та ІЧ-діапазону, наприклад, захід на ціль з боку сонця або іншого потужного джерела видимого світла та ІЧ-випромінювання.

1.5 Активні оптико-електронні методи

Активні ОЕМ представляються, переважно, великою групою лазерних методів. Активні світло променеві методи поступаються лазерним за всіма показниками і не використовуються. Лазерні ОЕМ оперують з лазерним променем або з променем, що направляється на об'єкт, скануючим простір за певним законом [15-17]. Відбитий об'єктом сигнал, що приймається, дозволяє виявити об'єкт і за своїм запізненням визначити дальність до нього.

Інтерференційні методи вимірювання дальності D базуються на підрахунку числа цілих фазових циклів N і дробової частини циклу Δ в сигналі, що приймається [18, 19]:

$$D = \lambda(N + \Delta)/2 \quad (1.1)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання.

Вимірювання проводять дискретно спеціальними лічильниками фазових циклів [20, 21]. Системи, що реалізують інтерференційні методи, мають високу точність, необхідність створення опорного оптичного каналу, їх максимальна дальність дії становить лише кілька десятків метрів. Для збільшення застосовують багаточастотні лазери [22].

Модуляційні OEM застосовують імпульсну, частотну або фазову модуляцію лазерного випромінювання.

В імпульсних далекомірах випромінювання є уривчастим, застосовують твердотілі рубінові та неодимові лазери. Дальність визначається шляхом вимірювання часу t , витраченого випромінюванням імпульсом на проходження подвійної відстані:

$$D = ct/2n \approx cm/2nf_{ku} \quad (1.2)$$

де c – швидкість світла;

n - показник заломлення середовища;

m і f_{ku} – число калібрувальних тимчасових імпульсів, зареєстрованих у мірному інтервалі t , та їх частота проходження.

Для підвищення точності та дальності вимірювань використовують некогерентне накопичення прийнятих сигналів [23, 24]. Максимальна дальність дії імпульсних лазерних далекомірів може становити, за умов ясного неба, 20 – 30 км за абсолютної похибки $\pm 0,5$ м.

Частотна модуляція лазерного випромінювання [25] реалізується шляхом зміни параметрів оптичного резонатора лазера за симетричним пилкоподібним законом, при цьому формується безперервний лазерний промінь постійної інтенсивності, але з частотою, що змінюється за таким же законом [26]. Відбитий об'єктом сигнал детектується, посилюється, піддається частотному аналізу на кожному напівперіоді

модулюючого сигналу з періодом T_m і порівнюється в частотному плані з поточним сигналом, що модулює [27, 28]. Поява різницевої частоти f_p обумовлено наявністю цілі на певній дальності, і сигнал надходить від неї з певним значенням частоти, подолавши подвійну дальність. Наявність декількох різницевих частот вказує на наявність кількох об'єктів на відповідних дальностях:

$$D = cT_m f_p / 4n(f_{max} - f_{min}) \quad (1.3)$$

де f_{max} та f_{min} відповідно максимальна та мінімальна частоти модулюючого сигналу.

Спільна сумарно-різницева обробка різницевих сигналів за напівперіодами дозволяє окремо оцінити дальності до цілей та їх радіальні швидкості. Однозначний вимір дальності та швидкості можливий в інтервалі:

$$\Delta D = cT_m / 8 \quad (1.4)$$

У фазових лазерних далекомірах використовується метод порівняння фаз прийнятого та випромінюваного світлових потоків:

$$D = c\varphi / 4\pi f_m \quad (1.5)$$

де φ різниця фаз;

f_m – частота модуляції.

Різниця фаз повинна бути меншою за 180° для усунення неоднозначності оцінки дальності, що забезпечується належним вибором частоти модуляції. Зазвичай використовують кілька модулюючих частот [22, 29]. Однозначна оцінка дальності може

бути отримана підрахунком повних циклів N зміни фази модулюючого сигналу і дробової частини циклу на інтервалі запізнення відбитого сигналу:

$$D = c(N + \Delta)/2nf_m \quad (1.6)$$

Кількість циклів визначають, в основному, методом кратних частот, коли при порівнянні фаз використовується не одне модулююче коливання, а кілька з кратними спадними частотами [30, 31].

Частотний і фазовий методи лазерного вимірювання дальності мають високу точність, абсолютна похибка вимірювання не гірша за $\pm 10^{-2}$ м. Дальність дії зазвичай не перевищує 1 км.

Розглянуті активні методи мають високу точність, але вимагають значних енергетичних витрат і забезпечують скритність роботи.

1.6 Пасивні оптико-електронні методи

1.6.1 Особливості матричних фоточутливих сенсорів

Особливий інтерес представляють методи, що не вимагають участі зорового апарату людини у знятті вимірювальних відліків та забезпечують повну автоматизацію прийняття рішення [32]. Цьому сприяє прогрес у технологіях створення фоточутливих сенсорів як матриць, чутливих в області денного світла 0,4 – 0,7 мкм [33 – 35], нічного бачення 0,7 – 1,4 мкм – це діапазон ближнього інфрачервоного (ІЧ) світла [36 – 38] та теплового бачення 1 - 20 мкм [39, 40].

Об'єктивом проектується зображення об'єкта на фоточутливу матрицю, що відображає його конфігурацію і є додатково точним двовимірним цифровим пристроєм

для визначення лінійних розмірів об'єкту. Найбільше застосування знаходять ПЗЗ (прилади із зарядовим зв'язком) та мікроболометричні матриці; КМОП-матриці (комплементарний метал-оксид-напівпровідник) володіють високим рівнем шуму, тому в оптичних виявниках об'єктів та вимірниках їх координат вони не використовуються.

У діапазоні білого світла ефективно працюють кремнієві ПЗЗ-матриці, максимум їх спектральної характеристики перебуває у області 1,1 мкм. Тому вони знаходять застосування як в оптичних вимірювальних системах денного світла, так і системах нічного бачення у ближньому ІЧ діапазоні [37, 38]. Системи дуже чутливі і в системах денного світла перед ПЗЗ матрицею встановлюється оптичний фільтр, що відсікає випромінювання з довжинами хвиль понад 0,7 мкм.

У системах нічного бачення ближнього ІЧ діапазону застосовують кремнієві ПЗС-матриці з ІЧ-підсвічуванням об'єкта, що робить систему вже активною, або кремнієвою. ПЗЗ-матриці з електронними помножувачами. При кратності множення вихідного сигналу система виявляє повітряний об'єкт при його освітленості природним світлом нічного зоряного неба $5 \cdot 10^{-4}$ лк [40]. Розширення ПЗЗ матриць вже перевищує величину, що визначається стандартом 4К, що поряд з високою якістю зображення та точністю вимірювання лінійних розмірів об'єктів викликає також необхідність передачі та обробки високошвидкісних інформаційних потоків.

Мікроболометричні матриці включають до свого складу активні елементи, опір яких змінюється під впливом тепла слабкого оптичного випромінювання [41, 42]. Особливий інтерес представляють матриці діапазону 7 - 14 мкм, що збігається з вікном прозорості в нижній атмосфері та з максимумом випромінювальної здатності повітряних об'єктів у діапазоні температур від -50°C до $+500^{\circ}\text{C}$. Температурна чутливість матриць нижче 10 мК, а кількість елементів розширення досягла 1024 x 768. Ці матриці можуть забезпечити роботу оптико-електронних систем у всіх діапазонах денного та нічного освітлення і навіть в умовах туману, серпанку, а також при постановці штучних перешкод – засвіток, задимлення [43].

Розглянуті фоточутливі сенсори, що виявляють повітряні об'єкти, як вдень, так і вночі мають матричну структуру і можуть бути інтегровані в єдину оптико-електронну систему виявлення та вимірювання дальності.

1.6.2 OEM вимірювання дальності із використанням матричних сенсорів

ОЕМ з матричними сенсорами поділяються на однокамерні та стереоскопічні.

Однокамерні OEM. Метод вимірювання дальності до об'єктів за їхніми зображеннями, розглянутий у роботі [44], передбачає отримання оптичного зображення повітряного об'єкта з однієї точки вимірювань, його перетворення на цифрове, розпізнавання об'єкта по оцифрованому зображенню та визначення дальності до об'єкта, що рухається, за формулою:

$$D = FL/l \quad (1.7)$$

де F – фокусна відстань оптичної системи,

L – фактичний лінійний розмір розпізнаного об'єкта по базі даних,

l – відповідний лінійний розмір зображення повітряного об'єкта, що рухається, на фоточутливій матриці з урахуванням проекційних спотворень.

Цей метод має низьку точність, тому що використовується фактичний лінійний розмір об'єкта, що визначається за розпізнаванням, а об'єкт може бути не розпізнаний, розпізнаний помилково або розпізнаний правильно, але з іншою модифікацією. До того ж, облік проекційних спотворень відповідного лінійного розміру зображення потребує знання багатьох параметрів польоту об'єкта (азимут, висота і кути тангажу, крену, нишпорення), що робить завдання важко здійснюваним і вирішуваним з великим наближенням.

Спосіб вимірювання дальності до об'єкта за його зображеннями з двох точок [45] однієї камерою з фокусною відстанню об'єктива F включає вимірювання розмірів A_1 зображення об'єкта та координат його центру X_1, Y_1 в 1-й точці, переміщення засобу спостереження під кутом до оптичної осі на певну відстань S , вимірювання розмірів зображення об'єкта A_2 та координат центру зображення об'єкта X_2, Y_2 у другій точці, у процесі переміщення орієнтацію камери не змінюють, а після переміщення вимірюють зсув зображення B за виразом:

$$B = [(Y_1 - Y_2)^2 + (X_1 - X_2)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1.8)$$

Потім порівнюють зсув зображення B та зміни розмірів зображення об'єкта $\Delta A = A_2 - A_1$, і у разі, якщо відсутні умови для вимірювання кута між напрямком переміщення камери та оптичною віссю, дальність D визначають за виразом:

$$D = S / (1 - K \cos \alpha + K^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

де $K = A_2 / A_1$;

α – кут візування об'єкта ($\alpha = \arctg(B/F)$);

S – величина переміщення камери.

Стереоскопічні OEM. Ці методи пов'язані з побудовою складніших оптико-електронних систем, що забезпечують більш високу точність вимірювання дальності при менших часових витратах.

Метод базується на використанні двох цифрових камер, що рознесені у просторі по горизонталі на відому відстань. Дальність до об'єкта обчислюється шляхом визначення зсуву між зображеннями положення максимального значення двовимірної нормованої кореляційної функції в субпіксельному діапазоні. При цьому ліва і права камери встановлені на внутрішніх рамах своїх карданових підвісів, кожен з яких містить

зовнішню та внутрішню рами, на осях яких встановлені датчики кута повороту рам підвісу. Крім того, ліва та права камери, а також датчики кута повороту рам підвісу виконані з можливістю передачі в обчислювальний блок відео та даних про поточну просторову орієнтацію камер. Дальність до виділеної області об'єкта визначають з виразу, що враховує відхилення від горизонтальної лінії розташування двох цифрових фотокамер:

$$D = \frac{fB}{\Delta l_{\Gamma}} \cos(\arctan \frac{\Delta l_{\Gamma}}{\Delta l_{\text{В}}}) \quad (1.10)$$

де B – відстань між точками зйомки у просторі,

f – фокусна відстань фотокамер,

Δl_{Γ} – зсув між зображеннями об'єкта по горизонтальній осі,

$\Delta l_{\text{В}}$ – зсув між зображення об'єкта по вертикальній осі.

Обчислювальний блок містить обробну систему, що є віддаленим комп'ютером, таким як ноутбук або персональний комп'ютер (робоча станція), і інтерфейс користувача, що забезпечує вибір користувачем зображень та введення команд обробки. Технічний результат полягає в можливості зміни параметрів робочої зони та у зменшенні сумарного часу на попереднє налаштування далекоміра та процес вимірювань. Проте взаємна двовимірна кореляційна обробка областей зображень, які займає об'єкт, вимагає значних масивів даних і стає неможливою для малих віддалених об'єктів. До того ж вимога присутності оператора також не є позитивним фактором методу.

У системах оптичного та інфрачервоного діапазонів сигнали відбиття та випромінювання від об'єктів проходять через оптичні лінзи, перетворюються на рівні амплітуди та відбиваються на матрицях двох камер, взаємно віддалених у просторі та утворюючих стереопари кадрів зображень об'єкта. Отримані зображення об'єктів в k -х

матрицях ($k=1, 2$) сегментуються виділенням однорідних по амплітуді під областей за допомогою відомих операцій сегментації, кожен сегмент є вектором параметрів, що включає координати центру сегмента, середню амплітуду та геометричні характеристики.

Розглянутий метод дозволяє обробляти зображення множини повітряних об'єктів, одержуваних двома неідентичними відеокамерами, рознесеними на певну відстань один від одного і без жорсткого зв'язку між ними, але потрібно попереднє визначення внутрішньої та зовнішньої матриць параметрів камер з високою точністю, оскільки вони неодноразово беруть участь у обчислювальній процедурі. Для цього методу потрібно проводити багато обчислювань. Цей метод є також дуже обчислювальним, двічі використовується критеріальний підхід до визначення проміжних величин – при виборі сполучених точок та оцінок дальностей до об'єкта. Не показано, як це впливає на точність визначення дальності та на оперативність роботи систем.

1.7 Висновки до розділу 1

ОЕМ вимірювання дальності до повітряних цілей є дуже ефективними, забезпечуючи вимірювання максимальної дальності від 100 – 200 м до 20 – 30 км із абсолютною похибкою вимірів від $\pm 10^{-2}$ м до 0,5 м відповідно.

Найбільші значення максимальної дальності забезпечуються імпульсними лазерними далекомірами, а в області середніх і малих дальностей широко використовуються частотні та фазові методи лазерної далекометрії. Для виконання конкретних завдань лазерні далекоміри добре інтегруються з радіоелектронними комплексами виявлення та розпізнавання повітряних цілей.

Обмежуючими факторами використання лазерних методів є наявність низької хмарності, туману та опадів, а також низький ступінь скритності роботи вимірювальних систем.

Пасивна область оптичних безокулярних далекомірів розвивається на основі використання матриць денного, нічного та теплового бачення. При цьому використовуються витончені алгоритми обробки цифрових зображень, що потребує збільшення часу для ухвалення рішень.

Перевагою матричних OEM є можливість одночасного використання всіх трьох датчиків денного, нічного та теплового бачення, що дозволить проводити надійне виявлення, розпізнавання та вимірювання координат малих повітряних об'єктів.

РОЗДІЛ 2 Огляд елементної бази оптико-електронних систем виявлення МБЛА видимого та ІЧ діапазонів

2.1 Тепловізійна система

На рис. 2 зображена функціональна схема узагальненої тепловізійної системи.

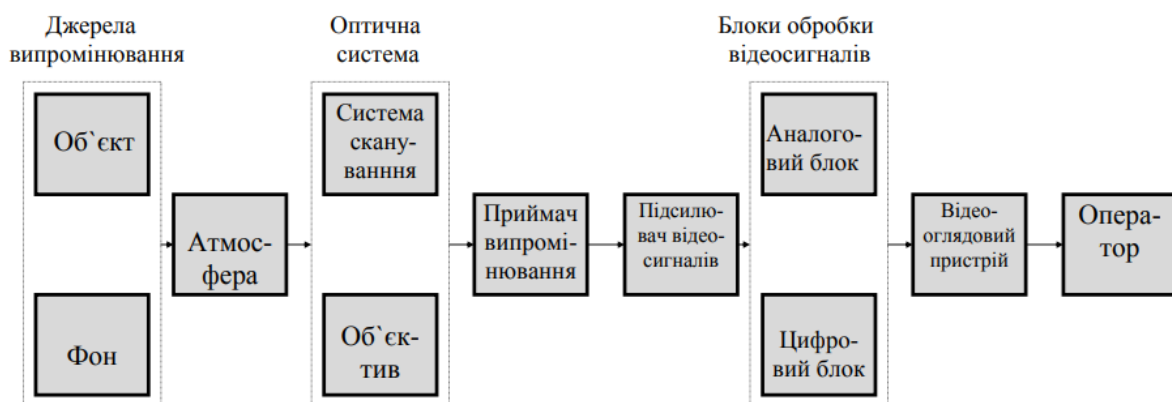


Рисунок 2 – Функціональна схема узагальненої тепловізійної системи [46]

Інфрачервоне випромінювання від нагрітих об'єктів спостереження та фонів проходить через атмосферу і потрапляє в оптичну систему 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 [46].

2.2 Інфрачервона система (ІЧС)

На узагальненій структурній схемі ІЧС (інфрачервона система) [47] (рис. 2.1) показані основні ланки типової ІЧС, що беруть участь у перетворенні оптичного сигналу, що характеризує простір об'єктів у невидимій області спектру, у видиме зображення, яке сприймає спостерігач. До складу ІЧС можуть входити й інші ланки, наприклад, система стабілізації оптичної осі або лінії візування. Важливо зазначити, що створення досить якісної системи можливе лише при врахуванні параметрів та характеристик усіх ланок ІЧС, включаючи параметри та характеристики об'єктів спостереження, перешкод, фонів, середовища розповсюдження оптичних сигналів, основи або платформи, на якій встановлюється ІЧС, а також людини-спостерігача.

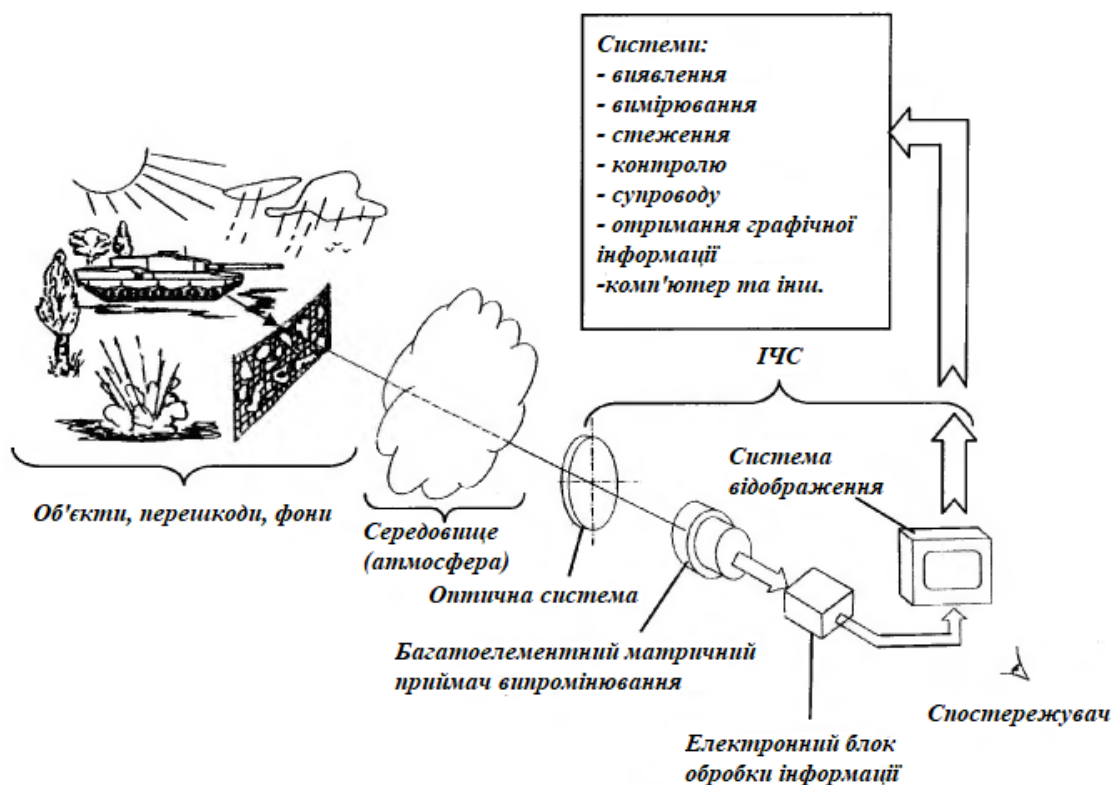


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема ІЧС [47]

Одними з найпоширеніших і давно відомих ІЧС [48, 49] є прилади нічного бачення. У них об'єкти в площині фотокатода електронно-оптичного перетворювача (ЕОП) будує зображення, яке потім, наприклад, за допомогою фокусувально-відхиляючої системи, переноситься на екран-анод. Збільшення кінетичної енергії фотоелектронів, що відбувається при такому перенесенні, викликає світіння люмінесцентного екрана у видимій області спектру. Очевидне зображення через окуляр спостерігається людиною-оператором.

При малих рівнях освітленості простору об'єктів до складу ІЧС з багатoelementним матричним приймачем випромінювання між об'єктивом і твердотілим приймачем або телевізійною трубкою, що передає, іноді включають підсилювачі яскравості зображення. Такий підсилювач працює як ЕОП, в якому кінетична енергія фотоелектронів збільшується за допомогою електронної системи перенесення зображення з фотокатода на анод.

Як електронний тракт обробки інформації можна використовувати різні пристрої, у тому числі комп'ютер. Вихідним пристроєм може бути дисплей, що відображає інформацію в реальному масштабі часу, а також принтер або пристрій запису та зберігання інформації, наприклад фотоплівка, магнітна стрічка, CD-диск, що забезпечують отримання або тиражування зображень у вигляді «твердих» копій. Іноді ці пристрої працюють паралельно. Двоступінчаста схема перетворення зображення, що застосовується в багатьох ІЧС, багато в чому пояснюється бажанням перетворити аналоговий оптичний сигнал (зображення) в більш зручну цифрову форму, для чого і використовується багатoelementний твердотільний приймач випромінювання або передаюча електронна трубка в поєднанні з електронними зв'язками, що перетворюють аналоговий сигнал.

Для забезпечення необхідної якості зображення аналоговий сигнал, що знімається з приймача, попередньо посилюється, потім квантується, тобто перетворюється на цифрову форму. Використовуючи добре освоєні та дуже ефективні методи обробки

цифрових зображень, можна відфільтрувати сигнал від перешкод, а потім цифрову форму зображення реконструювати у зручну для представлення на екрані монітори та сприйняття його людиною-спостерігачем аналогову форму.

2.3 Лазерна система

Розглянемо узагальнену структурну схему лазерної системи, тобто систему активного типу (рис. 2.2) [50].

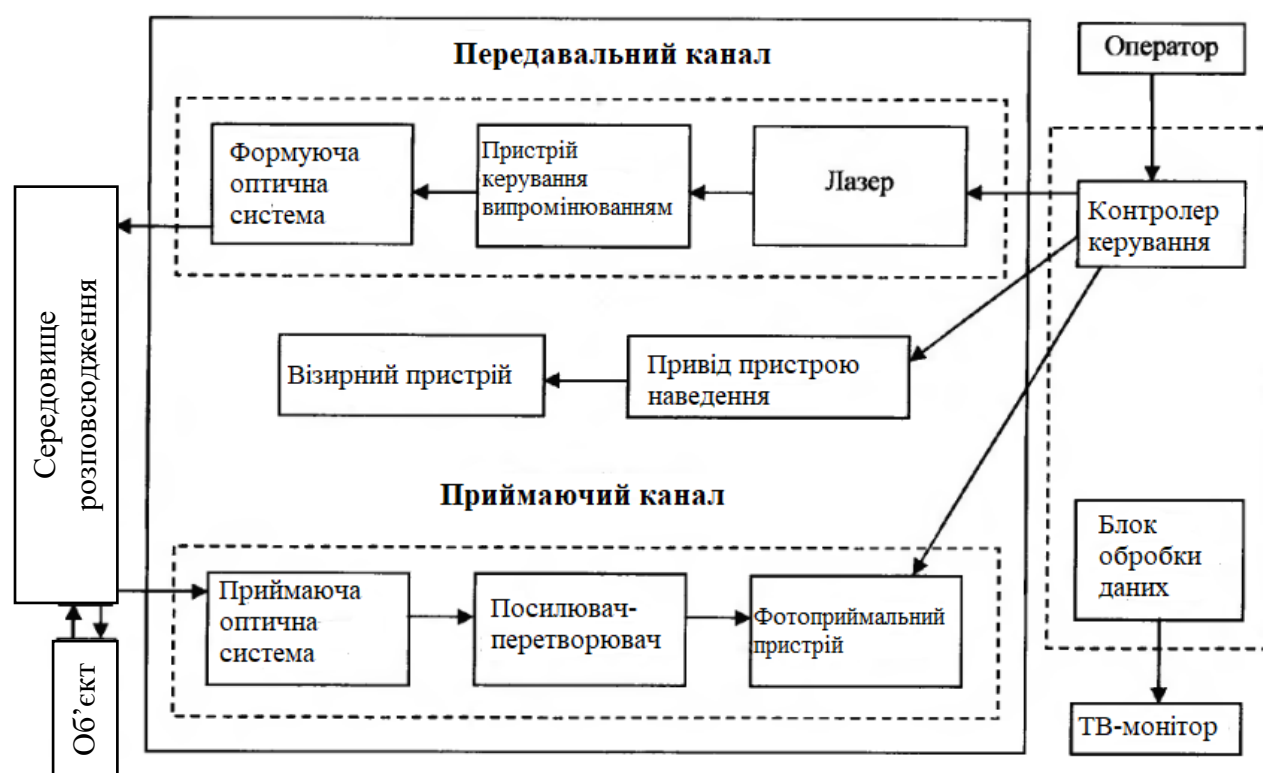


Рисунок 2.2 – Узагальнена структурна схема лазерної системи [50]

Крім вказаних ланок ІЧС активного типу можуть мати скануючі пристрої (як в передавальному, так і в приймачому каналах), які забезпечуються узгоджену роботу (синхронізацію) передавального та приймального каналів, наприклад синхронне з

переміщенням лазерного зондувального пучка зміни кутової діаграми приймального каналу. Під час сканування збільшується поле огляду системи та покращується її завадозахищеність. Блок обробки даних здійснює цифрову обробку та формування аналогового сигналу на телевізійному моніторі. Контролер управління формує синхронізуючі та керуючі сигнали, індикацію режимів роботи ІЧС, виконання команд оператора.

У системі передбачено можливість попереднього наведення (вручну або автоматично) на об'єкт за допомогою візирного пристрою та приводу рухомої основи або платформи. Таку систему можна комплексувати з системами цілевказування, пеленгаторами, локаторами як оптико-електронними, так і радіоелектронними або акустичними [50].

2.4 Огляд багатоканальних оптико-електронних систем

В оптико-електронних системах часто використовується комбінація тепловізійного та видимого каналів. Ці канали, по багатьом параметрам, є взаємодоповнюючими при об'єднанні в потрібній системі і дозволяють підвищити її ефективність і розширити межі застосування (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняння особливостей тепловізійного та видимого каналів

Критерії оцінки	Тепловізор	Відеокамера
Кращий час доби	ніч	день
Тип реєструючого випромінювання	власне	відбите
Робоча довжина хвилі	7-14 мкм	0,4-0,9 мкм
Спосіб виявлення замаскованих цілей	висока	низька
Спосіб ідентифікації цілей	низька	висока
Несприйнятливість до атмосферних перешкод	висока	низька

Прикладом подібних двохканальних систем з тепловізійним та видимим каналом є прилади «ТН-4604МП» та «Скат-2» (рис. 2.3)



Рисунок 2.3 – Двохканальні тепловізори: а) «ТН-4604МП», б) «Скат-2»

Тепловізійний канал забезпечує виявлення тепловипромінюючих цілей на великій дистанції незалежно від атмосферних перешкод і освітлення, а видимий канал дозволяє з більшою вірогідністю правильно ідентифікувати цілі.

Для тепловізора і відеокамери, об'єднаних фізично в одному приладі, як для подібних детекторів підходить варіант інтеграції даних на рівні особливостей. Відповідно до цієї схеми на тепловізійному зображенні виділяються дані, характерні для цілі, яку ми шукаємо, зазвичай це області підвищеної температури, і інтегруються в зображення, одержуване з відеокамери. Підсумковий сигнал містить зображення фону, отримане з відеокамери та накладене на нього зображення цілі, отримане з тепловізора (рис. 2.4)



Рисунок 2.4 – Накладення тепловізійного зображення на видиме

Тепловізор, маючи хороші показники дальності/ймовірності виявлення цілей, набагато гірше справляється із завданням ідентифікації, ніж відеоканал. Завдання ідентифікації вимагає значно вищого розширення, ніж виявлення, отже потрібно звужувати поле зору видимого каналу для забезпечення вищого розширення тієї ж дистанції, на якій тепловізор забезпечує виявлення цілі. На практиці для цього видимий канал, що входить у систему спостереження, оснащують трансфокатором. Це дозволяє як встановлювати однакове з тепловізором поле зору для візуальної прив'язки об'єкта, що виявляється, так і збільшувати видиме зображення об'єкта для його ідентифікації.

Приклад такої системи – стаціонарна система спостереження «Спектр-2» (рис. 2.5), що складається з тепловізора з фіксованим полем зору $9^\circ \times 6,6^\circ$ та відеокамери з змінним полем зору від 45° до $2,0^\circ$ по горизонталі. Зображення з обох каналів виводяться паралельно на два дисплеї, дозволяючи одночасно виявляти цілі в широкому полі зору тепловізора і отримувати більш детальні зображення для ідентифікації за допомогою відеокамери з більшим коефіцієнтом збільшення.

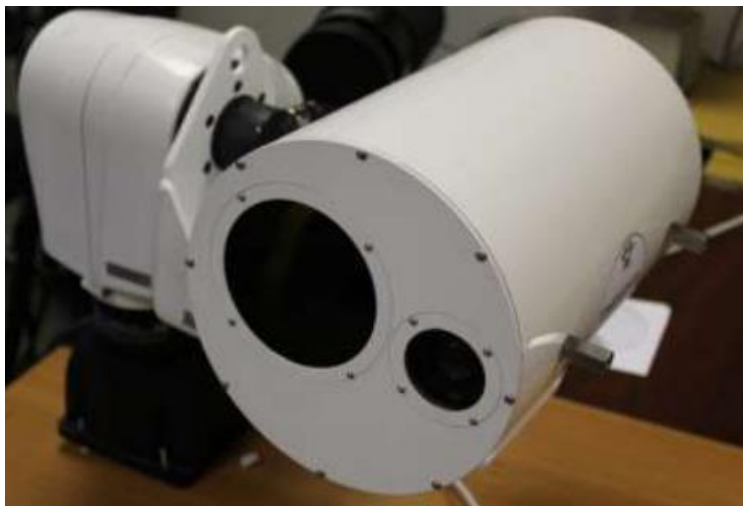


Рисунок 2.5 – Стаціонарна двохканальна система спостереження «Спектр-2»

Інший варіант поєднання інформаційних каналів реалізований у портативних комбінованих приладах спостереження "Спрут-1" та "Спрут-2" (рис. 2.6). У приладах цієї серії тепловізійний канал використовується спільно з лазерним локаційним каналом, що дозволяє виявляти оптичні та оптико-електронні засоби, що ведуть зустрічне спостереження на дистанції до 1 км.



а.



б.

Рисунок 2.6 – Комбіновані прилади спостереження «Спрут-1» (а) та «Спрут-2» (б)

У стаціонарній системі спостереження «Спектр-4» поєднано 4 інформаційні канали: тепловізійний, видимий, лазерний локаційний та короткохвильовий інфрачервоний (SWIR). Це дозволяє проводити всебічне обстеження місцевості та отримувати максимум даних про контрольовану область і виявлених об'єктах (рис. 2.7).



Рисунок 2.8 – Система спостереження «Спектр-4»

2.5 Висновки до розділу 2

Основою всіх оптико-електронних систем є ті чи інші типи камер, які насамперед відрізняються робочими спектральними діапазонами. На них лягає завдання виявлення та ідентифікації об'єкта. Для вирішення задачі цілевказівки в систему вводяться вимірювальні та навігаційні компоненти, що дозволяють визначити власне положення спостерігача та положення виявленого об'єкта щодо спостерігача. У разі розподіленої конфігурації засобів спостереження та/або рознесення у просторі комплексу спостереження та засобів реагування потрібне забезпечення оперативної та точної передачі інформації, зазвичай бездротовими каналами зв'язку. Відеокамери, що працюють у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні застосовуються у світлий час доби, у темний час доби вимагають додаткового підсвічування. Ціль виявляється на зображенні за рахунок кольорового або контрасту яскравості щодо фону. Ідентифікація цілі здійснюється за рахунок виділення характерних особливостей форми

проекції елементів об'єкта в площині, перпендикулярної до осі спостереження. Необхідною умовою ідентифікації є контраст характерних елементів — зовнішній (стосовно фону) для крайових елементів та/або внутрішній (по відношенню до інших елементів об'єкта) для елементів, що знаходяться всередині видимої проекції об'єкту.

Тепловізори, як цілодобовий всепогодний засіб спостереження та виявлення, на сьогоднішній день широко поширені і як окремі наглядові прилади так і у складі комплексів спостереження та виявлення завдяки основним перевагам, серед яких низький вплив на якість зображення різних атмосферних перешкод, можливість роботи в повній темряві, складність теплового маскування людей та техніки.

РОЗДІЛ 3 Розробка математичної моделі процесів пошуку і виявлення МБЛА оптико-електронними засобами

Автоматична оптико-електронна система в процесі виявлення та супроводу цілі вирішує наступні завдання:

- покращення якості зображення (зменшення видимих шумів на зображенні, покращення контрастності зображення, підвищення чіткості);
- адаптація камери до поганих умов роботи (слабке освітлення, туман та інші атмосферні впливи);
- виявлення всіх рухомих об'єктів у відеопотоці;
- пошук рухомого об'єкта за апіорною інформацією про його тип, форму, швидкість і характер руху;
- вимірювання геометричних параметрів об'єктів спостереження;
- автоматична ідентифікація типу об'єкта в порівнянні з еталоном за формою, кольором, текстурою поверхні, швидкістю руху;
- формування спеціальних точок супроводжувачого об'єкта – найбільш інформативні або вразливі точки, центр маси тощо;
- точна опора об'єкта на обрані точки його поверхні;
- прогнозування траєкторій супроводжуваних об'єктів.

Незважаючи на прогрес, досягнутий у розв'язанні цих завдань окремо, на сьогоднішній день не існує комплексного вирішення проблеми автоматичного виявлення в оптичному діапазоні рухомих об'єктів та їх високоточного відстеження в режимі реального часу. Тому актуальною є задача розробки технології виявлення та відстеження рухомих об'єктів повітряного середовища у видимій та інфрачервоній області частот в режимі реального часу.

ОЕС – це комплекс програмно-технічних модулів:

- оптико-електронний модуль;

- опорно-поворотний пристрій;
- модуль цифрової обробки зображень;
- програмне забезпечення для виявлення та точного відстеження повітряних об'єктів у режимі реального часу.

Оптико-електронний модуль містить цифрові камери системи стеження у видимому діапазоні довжин хвиль та в інфрачервоному діапазоні. Кожна цифрова камера являє собою оптичний модуль з об'єктивом, світлочутливим датчиком, блоком керування експозицією та діафрагмою, а також інтерфейсом керування.

Структурна схема ОЕС наведена на рис. 3.

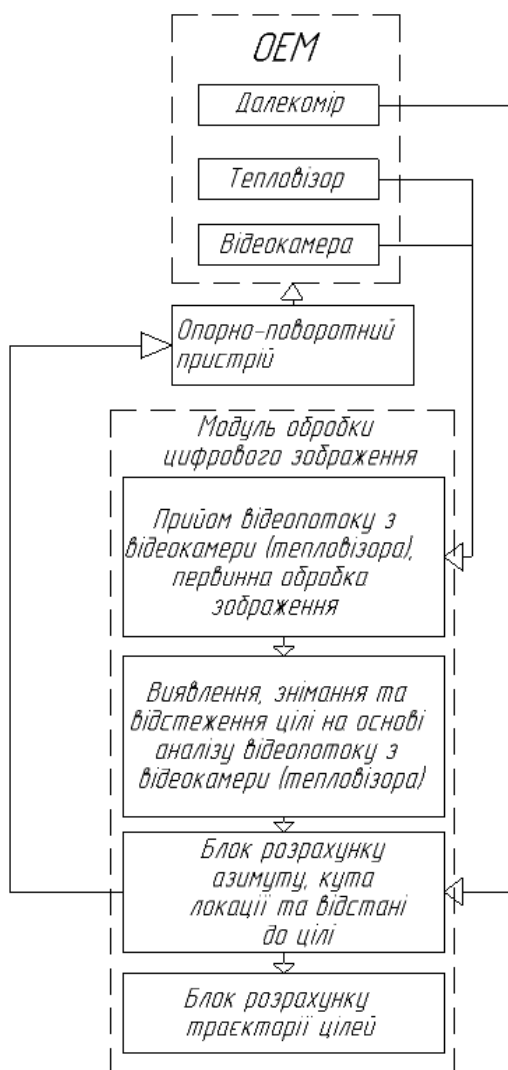


Рисунок 3 – Структурна схема оптико-електронної системи

Робота ОЕС можлива при отриманні попереднього цілевказання із зовнішніх засобів або в автономному режимі. Націлювання автоматично захоплює ціль для автоматичного відстеження. Ціль підтримується у видимому діапазоні довжин хвиль або в інфрачервоному діапазоні, що забезпечує цілодобове використання ОЕС. Візуальний супровід записується на цифровий накопичувач інформації.

Блок-схема алгоритму функціонування ОЕС наведена на рис. 3.1.

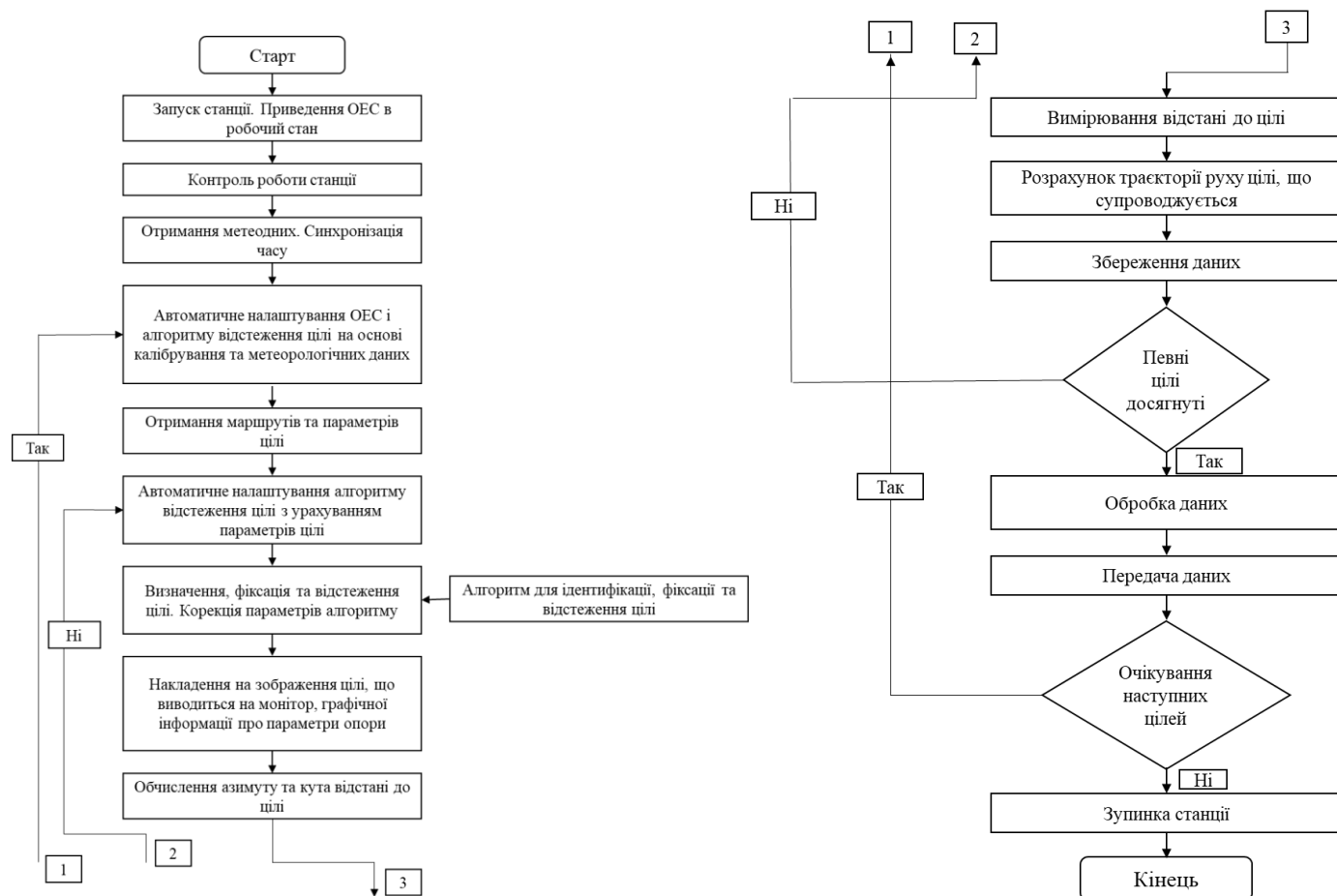


Рисунок 3.1 – Блок-схема функціонування оптико-електронної системи

3.1 Складення загальної структури моделі

Малорозмірні БПЛА літають на висотах (1-1,5) км, що при нахилі візирної осі ОЕСС 45° - 60° формує довжину похилої траси спостереження (2-3) км. При використанні короткофокусного об'єктиву 50 мм просторове розділення на найбільшій відстані спостереження складе 120 мм для пікселя МПВ розміром 2 мкм, 300 мм для пікселя розміром 5 мкм, 720 мм для пікселя розміром 12 мкм. Вказані розміри пікселів є стандартними для телевізійних та тепловізійних МПВ і навіть за малої фокусної відстані об'єктиву дають достатнє для виявлення типових об'єктів просторове розділення. Тому немає сенсу використовувати складні для розрахунків показники, що описують одночасно просторові та енергетичні параметри, такі, наприклад, як мінімальну роздільну різницю температур і доцільно в основу розрахункового методу покласти суто енергетичний показник якості [51].

Обмеження розгляду тільки ОЕСС, які працюють в автоматичному режимі, дозволяє вилучити з розгляду аспект зорового сприйняття зображення оператором. Зазвичай для ОЕСС інфрачервоного діапазону спектру енергетичне розділення оцінюється для всього інформаційного комплексу, який включає також спостерігача. При цьому використовують поняття мінімальної виявлювальної різниці температур [51]. В це поняття входить функція еквівалентної шуму різниці температур (англ. Noise Equivalent Temperature Difference, NETD). Функція NETD найбільш повно характеризує енергетичну роздільну здатність тепловізійного каналу ОЕСС і містить основні параметри, що описують приймач випромінювання, оптичну систему і фоноцільову обстановку в частині проходження випромінювання через атмосферу. Отже буде виправданим покласти NETD в основу розрахункового методу [51].

Функція NETD може бути модифікована також для телевізійного каналу ОЕСС. Фактично основною відмінністю формування сигналу в тепловізійному та телевізійному каналах є те, що в першому випадку об'єкт на фоні описується різницею поверхневих

щільностей випромінювання, а другому – різницею яскравості. Це означає, що в інфрачервоному діапазоні параметрами площинного об'єкта на фоні є власна температура і коефіцієнти випромінювання, а в видимому – освітленість і коефіцієнти відбиття. Отже, якщо замінити різницю температур різницею яскравості, то можна отримати еквівалентну шуму різницю яскравості (англ. Noise Equivalent Luminance Difference, NELD). Відповідно енергетичне розділення тепловізійного каналу визначається розділенням по температурі, а телевізійного каналу – по яскравості [57].

Обидва показники NETD та NELD визначаються за умови, що відношення сигнал/шум в даному каналі дорівнює одиниці. Якщо об'єкт і фон є ламбертівськими випромінювачами, то маємо [51]:

$$NETD_s = \frac{4k_o^2}{D_{th}^* \tau_A \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (3.1)$$

де D_{th}^* – питома виявлювальна здатність МПВ;

$k_o = f_o'^2 / D_p$ – діафрагмове число б'єктива;

f_o' і D_p – задня фокусна відстань і діаметр входної зіниці об'єктива відповідно;

τ_A – коефіцієнт пропускання атмосфери;

τ_o – коефіцієнт пропускання оптичної системи ОЕСС;

$M_{\lambda}(\lambda, T)$ – функція Планка;

$\lambda_1 - \lambda_2$ – робочий спектральний діапазон;

Δf – ефективна шумова смуга електронного тракту МПВ;

A_D – площа пікселя.

Ефективна шумова смуга Δf обраховується відповідно до часу розкладу одного елементу розгортки зображення:

$$\Delta f = p \cdot q \cdot f_c / 2\eta_{sc}, \quad (3.2)$$

де p, q – кількість пікселів в МПВ;

f_c – частота кадрової розгортки;

η_{sc} – коефіцієнт ефективності сканування.

Коефіцієнт пропускання атмосфери в межах робочого спектрального діапазону визначається законом Бугера-Ламберта:

$$\tau_A(R) = \exp(-\kappa_A R), \quad (3.3)$$

де $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення за сприятливих умов пропускання атмосфери;

$\kappa_A = 0,1 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення за поганих умов пропускання атмосфери [51].

Розберемо формулу 3.1. Вона дозволяє визначити основні параметри об'єктиву, МПВ, електронного блоку ОЕСС. Але, по-перше, в формулі не враховані спектральні залежності величин D_{th}^*, τ_A, τ_0 і використано їх інтегральні в діапазоні $(\lambda_1 - \lambda_2)$ значення. По-друге, коефіцієнт пропускання атмосфери звичайно залежить від відстані R до об'єкта спостереження. Ці спрощення значно зменшують обсяг розрахунків і фактично не впливають на якість виконання поставленого завдання – розроблення методу енергетичного розрахунку ОЕСС у мінімальній для реалізації поточної задачі спостереження конфігурації [57]. Але за необхідності можна врахувати вказані спектральні залежності. Також видно, що 3.1 не враховує характеристик безпосередньо об'єкту і фону, тобто є характеристикою тільки комплексу «атмосфера – ОЕСС». Частково середню температуру фоноцільової обстановки можна врахувати через коефіцієнт, що показує відмінність реального тест-об'єкту від того, що використовувався при визначенні характеристик МПВ:

$$\beta = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T_{tp})}{\partial T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda},$$

де T_{tp} – температура тест-об’єкта при вимірюванні чутливості МПВ;

T_b – температура фону, на якому знаходиться об’єкт спостереження.

Але на практиці коефіцієнт β незначно відрізняється від одиниці. Для більш повного аналізу всього інформаційного комплексу дистанційного спостереження необхідно використовувати інші характеристики, наприклад, мінімальну виявлювальну різницю температур [51].

Деякі виробники інфрачервоних МПВ в специфікації на прилад вказують не D_{th}^* , а виміряну для цього приймача еквівалентну шуму різницю температур $NETD_D$:

$$NETD_D = \frac{4}{D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (3.4)$$

Якщо відома ця величина, то формула 3.1 набуде компактнішого вигляду:

$$NETD_S = NETD_D \frac{k_o^2}{\tau_A \tau_o}. \quad (3.5)$$

Еквівалентну шуму різницю яскравості визначимо використовуючи відому формулу для обчислення освітленості в фокальній площині об’єктива при спостереженні площинного об’єкту на рівномірному фоні:

$$\Delta E = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o} \right)^2 \tau_A \tau_o E_o \Delta \rho, \quad (3.6)$$

де E_o – інтегральна освітленість площини спостереження;

$\Delta\rho = \rho_t - \rho_b$ – різниця коефіцієнтів відбивання об'єкту і фону [51].

В найпростішому випадку ламбертівської моделі відбиття елементами фоноцільової обстановки яскравість поверхні L пов'язана з її освітленістю E як

$$L = \rho \frac{E}{\pi}, \quad (3.7)$$

де ρ – коефіцієнт відбиття.

Тоді різниця у яскравості об'єкту і фону дорівнює

$$\Delta L = \Delta\rho \frac{E_o}{\pi}. \quad (3.8)$$

Позначивши порогову освітленість МПВ як E_n отримаємо відношення сигнал/шум:

$$SNR = \frac{\Delta E}{E_n}. \quad (3.9)$$

Тоді з врахуванням 2.6 для $SNR = 1$ маємо:

$$NELD = \Delta L = \frac{4k_o^2}{\pi\tau_A\tau_o} E_n. \quad (3.10)$$

3.2 Розробка методики розрахунку відношення сигнал/шум в тепловізійному та телевізійному каналах

На рисунку 3 зображена схема розрахункової моделі.

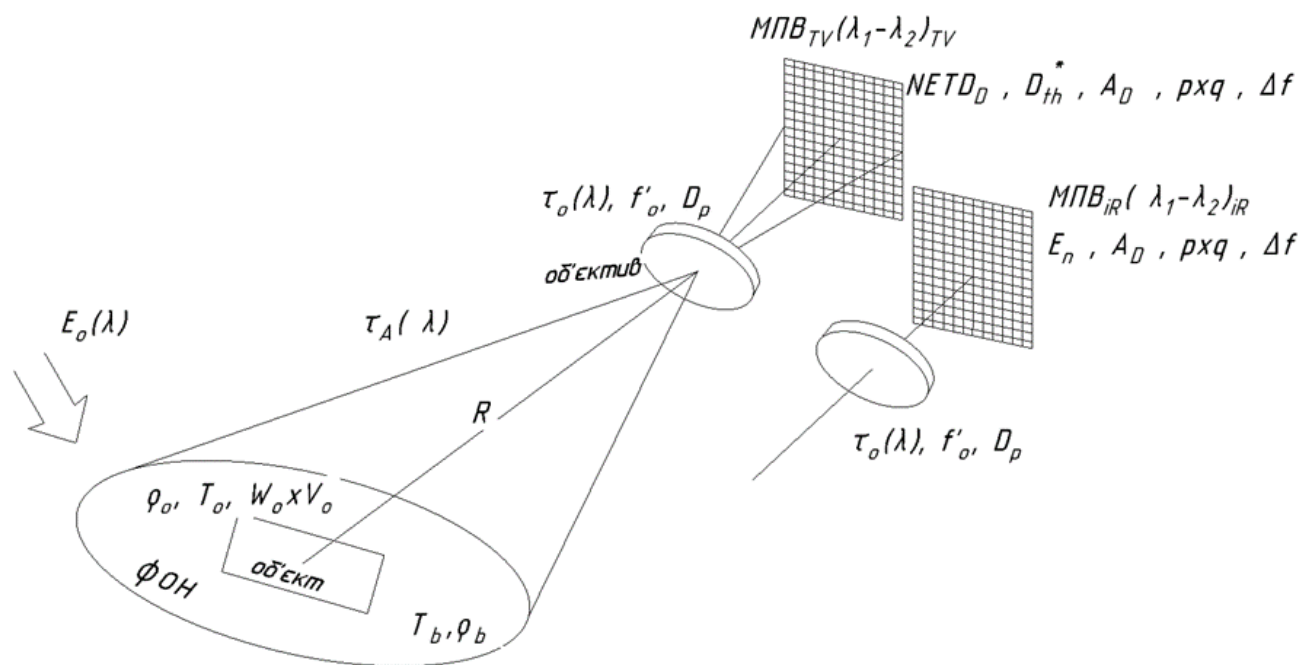


Рисунок 3 – Схема двоканальних дистанційних спостережень

Формула 3.1 дозволяє досліджувати вплив різних характеристик оптичної системи та МПВ на величину NETD або NELD. Втім на практиці номенклатура доступних МПВ інфрачервоного діапазону є досить обмеженою. Для видимого діапазону спектру кількість типів МПВ також є меншою, ніж можливих варіантів об'єктів, які до того ж можна розрахувати і виготовити на замовлення. Тому доцільно як приклад дослідити можливі варіанти габаритних параметрів об'єктів при заданому типі МПВ. Розрахуємо еквівалентні температури та яскравості для різних значень фокусних відстаней об'єктивів f'_o і діаметрів входної зіниці D_p при незмінних інших заданих параметрах. Діапазон зміни f'_o і D_p виберемо виходячи з наявної практики застосування

на невеликих БПЛА [51].

Тепловізійний канал ($\Delta\lambda = (8 - 14)$) мкм має такі вихідні параметри:

- об'єktiv:
 - фокусна відстань $f'_o = (30 - 120)$ мм;
 - діаметр входної зіниці $D_p = (30 - 60)$ мм;
 - інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,8$;
- МПВ – мікроболометрична матриця VOx Uncooled Infrared Detector [57]:
 - формат матриці $p \times q = 640 \times 512$;
 - період матричної структури $V_D \times W_D = 12 \times 12$ мкм²;
 - робочий спектральний діапазон $\lambda_1 - \lambda_2 = (8 - 14)$ мкм;
 - еквівалентна шуму різниця температур $NETD_D = 40$ мК.

Телевізійний канал ($\Delta\lambda = (0,4 - 0,8)$) мкм має такі вихідні параметри:

- об'єktiv:
 - фокусна відстань $f'_o = (50 - 150)$ мм;
 - діаметр входної зіниці $D_p = (20 - 50)$ мм;
 - інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,9$;
- МПВ - ПЗЗ матриця KAF-0402 [53], яка має такі параметри:
 - формат матриці $p \times q = 784 \times 520$;
 - розмір пікселя $V_D \times W_D = 9 \times 9$ мкм²;
 - еквівалентна шуму різниця освітленості $E_n = 10^{-3}$ лк.

Вважатимемо, що умови спостереження є сприятливими для обох спектральних діапазонів – коефіцієнт ослаблення атмосфери $k_A = 0,2$ км⁻¹. Розрахунки виконаємо для чотирьох відстаней спостереження – 0,5 км, 1,0 км, 2,0 км, 3,0 км [54]. Відповідні коефіцієнти пропускання атмосфери дорівнюють:

$$\tau_A(0,5) = \exp(-0,2 \cdot 0,5) = 0,905,$$

$$\tau_A(1,0) = \exp(-0,2 \cdot 1,0) = 0,819,$$

$$\tau_A(2,0) = \exp(-0,2 \cdot 2,0) = 0,670,$$

$$\tau_A(3,0) = \exp(-0,2 \cdot 3,0) = 0,549.$$

Для розрахунку температурного розділення використаємо формулу 3.5:

$$NETD_s = NETD_D \frac{f_o'^2}{\tau_A \tau_o D_p^2}.$$

Після підстановки вихідних параметрів до формули отримаємо рівняння для дослідження температурного розділення тепловізійного каналу ОЕСС для різних відстаней спостереження [54]:

- $R = 0,5$ км:

$$NETD_{s0,5}(f_o', D_p) = 40 \frac{f_o'^2}{0,724 D_p^2} = 55,2 \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ мК};$$

- $R = 1,0$ км:

$$NETD_{s1,0}(f_o', D_p) = 40 \frac{f_o'^2}{0,655 D_p^2} = 61,1 \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ мК};$$

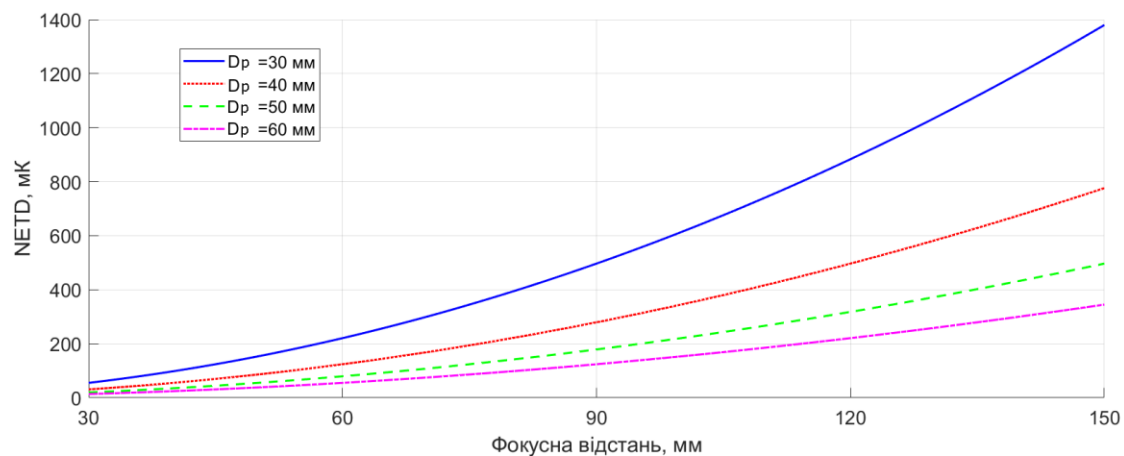
- $R = 2,0$ км:

$$NETD_{s2,0}(f_o', D_p) = 40 \frac{f_o'^2}{0,536 D_p^2} = 74,6 \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ мК};$$

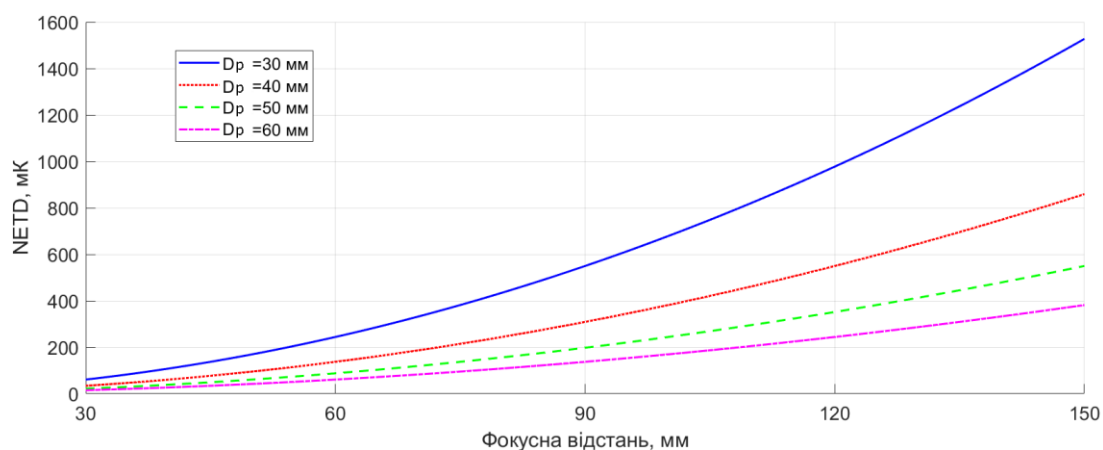
- $R = 3,0$ км:

$$NETD_{s3,0}(f_o', D_p) = 40 \frac{f_o'^2}{0,439 D_p^2} = 91,1 \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ мК}.$$

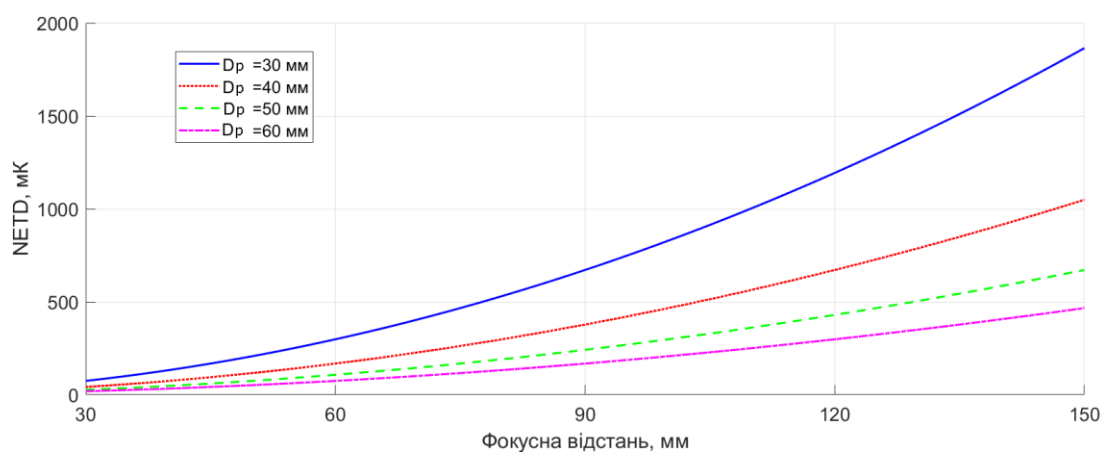
На рис. 3.1 наведено графіки залежності еквівалентної шуму різниці температур $NETD_s(f_o', D_p)$ тепловізійного каналу від фокусної відстані і діаметру вхідної зіниці об'єктиву для різних відстаней спостереження.



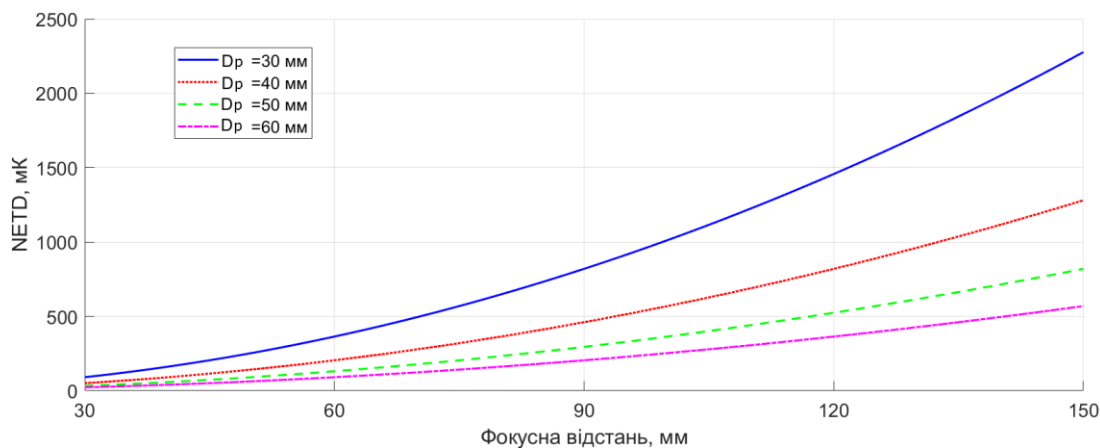
a)



б)



В)



г)

Рисунок 3.1 – Залежність еквівалентної шуму різниці температур тепловізійного каналу від фокусної відстані та діаметру вхідної зіниці об'єктиву [51]: а) $R=0,5$ км, б) $R=1,0$ км, в) $R=2,0$ км, г) $R=3,0$ км

Слід зазначити, що об'єктиви з діафрагмовим числом менше одиниці використовуються доволі нечасто із-за складності абераційної корекції, тому графіки на рис. 3.1 для $D_p = 50$ мм і $D_p = 60$ мм при $f'_o < 50$ мм мають скоріше ілюстративний характер [55].

Для розрахунку розділення по яскравості тепловізійного каналу ОЕСС використаємо формулу 3.10:

$$NELD(f'_o, D_p) = \frac{4f_o'^2}{\pi \tau_A \tau_o D_p^2} E_n.$$

Після підстановки вихідних параметрів до формули отримаємо рівняння для дослідження енергетичного розділення тепловізійного каналу ОЕСС для різних відстаней спостереження:

- $R = 0,5$ км:

$$NELD_{0,5}(f'_o, D_p) = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} f_o'^2}{0,905 D_p^2} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ лк/ср};$$

- $R = 1,0$ км:

$$NELD_{1,0}(f'_o, D_p) = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} f_o'^2}{0,819 D_p^2} = 1,7 \cdot 10^{-3} \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ лк/ср};$$

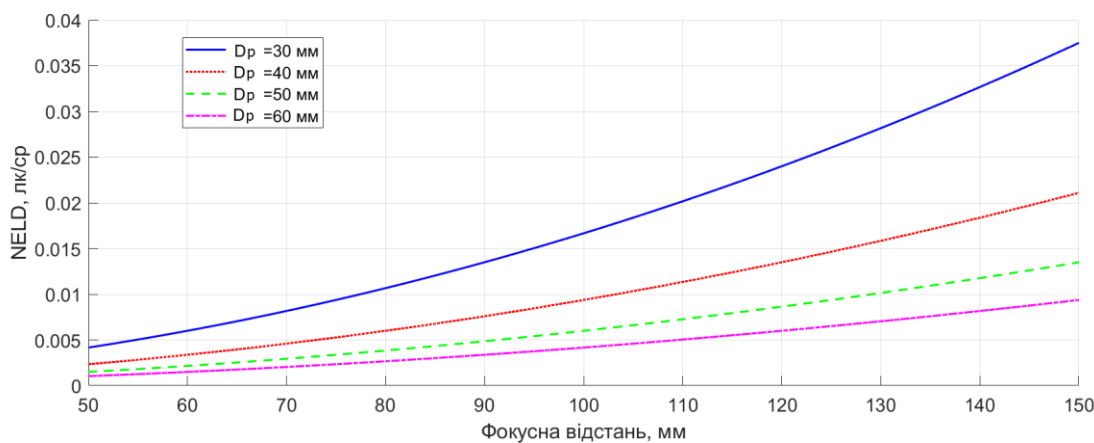
- $R = 2,0$ км:

$$NELD_{2,0}(f'_o, D_p) = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} f_o'^2}{0,670 D_p^2} = 2,1 \cdot 10^{-3} \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ лк/ср};$$

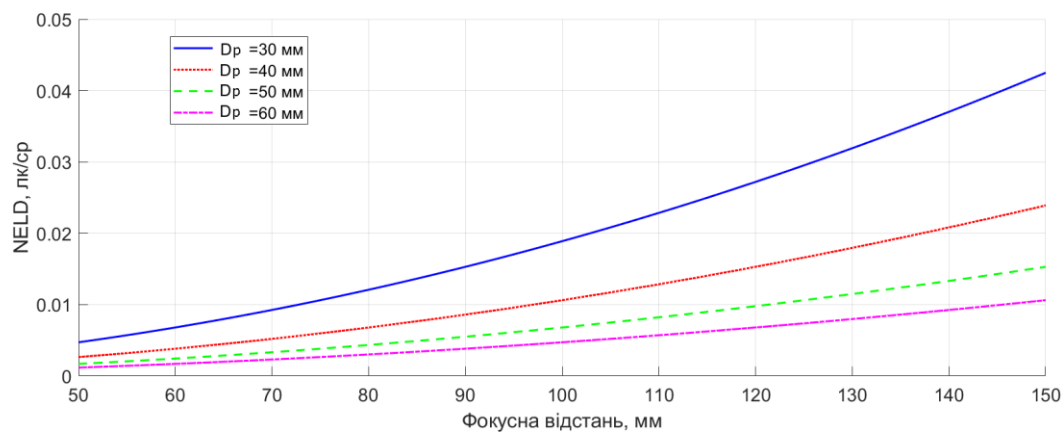
- $R = 3,0$ км:

$$NELD_{3,0}(f'_o, D_p) = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} f_o'^2}{0,549 D_p^2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ лк/ср};$$

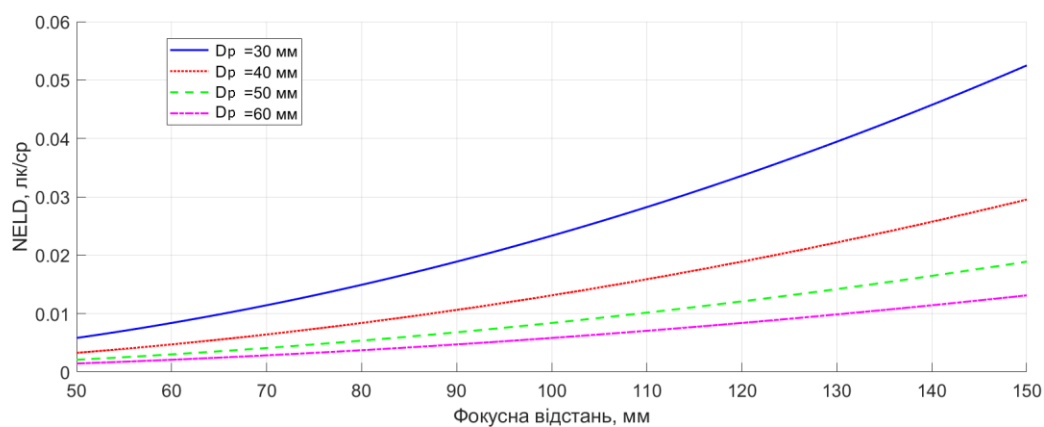
На рисунку 3.2 наведено графіки залежності еквівалентної шуму різниці яскравості $NELD(f'_o, D_p)$ телевізійного каналу від фокусної відстані і діаметру вхідної зіниці об'єктиву для різних відстаней спостереження [51].



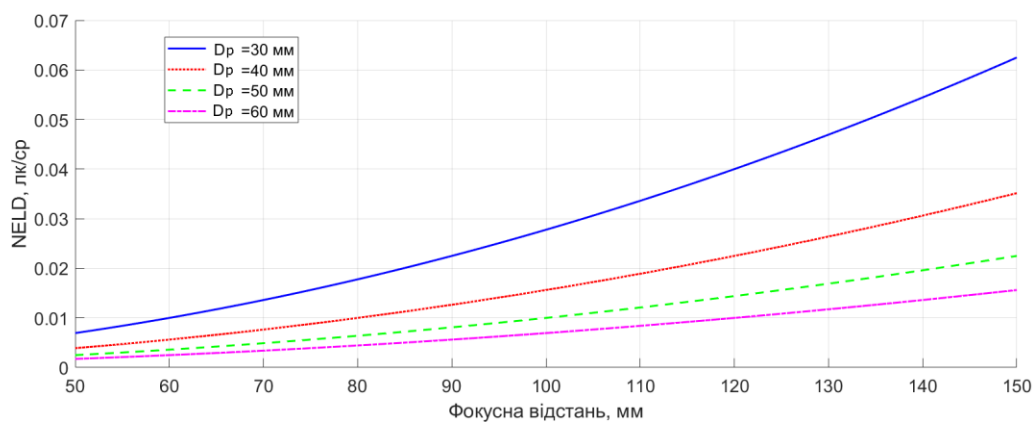
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2 – Залежність еквівалентної шуму різниці яскравості телевізійного каналу від фокусної відстані та діаметру входньої зіниці об'єктиву [51]: а) $R=0,5$ км, б) $R=1,0$ км, в) $R=2,0$ км, г) $R=3,0$ км

Для практичного застосування отриманих результатів можна оцінити їх відповідно до мінімальних типових контрастів фоноцільової обстановки. При низьких рівнях сонячного освітлення у сутінках приблизно 10 лк і ламбертівському характері відбиття об'єктом з коефіцієнтом $\rho=0,3$ маємо яскравість 1 лк/ср. Стандартним температурним контрастом для енергетичних розрахунків є $T=2^\circ$. Порівнюючи ці контрасти з розрахунковими значеннями чутливості можна відмітити, що вибрані конфігурації каналів ОЕСС задовольняють стандартним вимогам. Звичайно такі порівняння є приблизними, адже не враховані шумові компоненти сигналу крім власних шумів МПВ. Більш точні результати можна отримати через розрахунки ймовірнісних характеристик виявлення сигналу [51].

Часто навіть на недорогих невеликих БПЛА бажано мати змінне збільшення об'єктива для забезпечення детальнішого огляду зони інтересу. В об'єктивах із змінним збільшенням діафрагмове число залишається незмінним. Наведені графіки дозволяють оцінити падіння енергетичного розділення при підвищенні фокусної відстані. Наприклад, при використанні об'єктива з $D_p = 30$ мм при 3-х кратному зумі з $f'_o = 40$ мм до $f'_o = 120$ мм температурне розділення тепловізійного каналу зменшується в 9 разів – з 0,1 К до 0,9 К. Для об'єктивів з більшим значенням діаметру вхідної зіниці таке падіння не змінюється у відносних одиницях, але є набагато меншим в абсолютних одиницях. Наприклад, при $D_p = 60$ мм і $f'_o = 120$ мм температурне розділення становить приблизно 0,2 К. Отже, якщо габарити ОЕСС дозволяють, то краще використовувати об'єктиви з більшим значенням D_p [56].

3.3 Висновки до розділу 3

Для автоматичної багатоканальної оптико-електронної системи виявлення МБПЛА слід враховувати існуючі обмеження та початкові умови, що характеризують умови застосування системи:

- Необхідність роботи у будь-який час доби, будь-яку пору року, при різних погодних умовах.
- Характер цілей: об'єктами виявлення є малорозмірні безпілотні літальні апарати, які перебувають у русі на певній висоті.
- Характер місцевості: передбачається застосування системи в умовах відкритої та напівзакритої місцевості з різними варіантами рельєфу від рівнинної до гірської.

За вказаних умов доцільно об'єднання у системі двох каналів — тепловізійного та телевізійного. Тепловізійний забезпечує здатність системи працювати в темний час доби і при обмеженій видимості через атмосферні перешкоди, а також високу ефективність у плані виявлення активних тепловипромінювальних цілей. Телевізійний канал забезпечує працездатність комплексу в денний час, коли тепловізійний канал може виявитися менш ефективним через теплові перешкоди обумовлені нагріванням фонових об'єктів сонячним випромінюванням, а також забезпечує розпізнавання та ідентифікацію цілей.

Застосування додаткових каналів недоцільно, оскільки вони або функціонально дублюватимуть основні, або ефект від їх використання не можна порівняти з витратами від їх введення до системи.

РОЗДІЛ 4 Розроблення стартап-проекту «Обробка зображень в автоматичних багатоканальних оптико-електронних системах виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів»

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

Ідея стартап-проекту [57] полягає у комплексуванні інформації (зображень) з двох каналів при різних умовах роботи (день-ніч, сонячно, дим, туман, тд.). Запропонована ідея належить до галузі оптики.

Результати аналізу ідеї стартап-проекту показані в таблиці 4.1.

Таблиця. 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту [57]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Комплексування (поєднання) інформації з двох каналів.	1. Війська справа, 2. Виявлення пожеж.	Забезпечення найбільшої дальності виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів.

Основним напрямком застосування даного проекту є виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів при різних умовах навколишнього середовища.

Так як прямих конкурентів у розробки немає, то для того, щоб проаналізувати, які система має переваги та недоліки порівняємо її характеристики з наближеним аналогом. Конкурент (аналог) – Багатоканальний пристрій виявлення МБЛА та прицілювання. В таблиці 4.2 наведена порівняльна характеристика.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту [57]

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		<i>Мій проект</i>	<i>Конкурент</i>			
1.	Вартість, грн	400\$	1000\$			+
2.	Кількість розробників	3-4	8-10			+
3.	Точність	Невелика похибка	Невелика похибка		+	
4.	Інформативність	Інформативна	Інформативна		+	

З таблиці 4.2 видно, що даний проект по основним своїм техніко-економічним характеристикам не поступається конкуренту-аналогу. Визначивши сильні та слабкі сторони, можна зробити висновок, що продукт не має слабких сторін, а сильною стороною є вартість.

Далі проведемо аудит ідеї стартап-проекту. Проведено аналіз технологічної здійсненості стартап-проекту. В таблиці 4.3 наведені характеристики технологічної здійсненності ідеї цього проекту.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту [57]

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Комплексування (поєднання) інформації з двох каналів.	Методи комплексування інформації.	Наявні	Доступні
2		Виготовлення оптичних елементів.	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Методи комплексування інформації.				

Проаналізувавши технології реалізації проекту видно, що вони є вільному доступі, для їх отримання не потрібні додаткові дозволи, а щоб реалізувати задумку потрібна лише обізнаності у даному напрямку. Обраною технологією є комплексування каналів за різними діапазонами. Цей метод не потребує великих розрахунків та спеціального програмного забезпечення. Проаналізувавши обраний метод, можна зробити висновок, що реалізація проекту можлива, використавши вже наявні на ринку технологій, які є доступними автору проекту.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Виконаємо аналіз ринку для оцінки потенційних загроз, а також можливих умов виведення товару на ринок, урахувавши потреби потенційних споживачів і пропозицій конкурентів. В таблиці 4.4 наведена характеристика потенційного ринку.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту [57]

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	1
2	Загальний обсяг продажу, грн/ум.од	4000000 грн.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	50%

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що ринок зростає, не має

обмежень та має достатньо високу норму рентабельності, а отже він є достатньо привабливим для виходу на нього.

Далі визначимо цільову аудиторію, потенційних споживачів даного товару, їх основні вимоги та характеристики до продукту. Характеристики наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту [57]

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Товар задовольняє потреби ринку в системі, яка могла б комплексувати інформацію з двох каналів при різних умовах роботи.	Військові організаційні структури.	Ціна, результативність.	Універсальність, можливість роботи в різних умовах середовища, надійність.

Ринок, на який є бажання вийти, є достатньо специфічним, а тому його особливості можуть мати певні перепони, для нових гравців на ринку. Але переваги які є у проекту безперечно сприятимуть поширенню цього товару на даному ринку. Цільовою аудиторією є армія, та інші компанії які потребують новітніх та недорогих оптичних приладів, для отримання якомога більше інформації про місцевість. Різна поведінка споживачів спричинена ціною та результативністю приладів.

Після того, як були визначені основні групи потенційних споживачів, робимо аналіз факторів загроз, які можуть завадити виведенню цього товару на ринок (таблиці 4.6).

Таблиця 4.6 – Фактори загроз [57]

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Створення нових дешевих аналогічних приладів	Створення конкурентами нових більш результативніших приладів	Розробка більш нової та покращеної схеми приладу

Продовження таблиці 4.6

2	Оптимізація існуючих приладів	Конкуренти можуть оптимізувати свої прилади	Вдосконалення запропонованої системи
3	Небажання поновлювати вже існуючі системи	Небажання компаніями переобладнувати своє технічне забезпечення	Запропонувати з продажем приладу безкоштовне налаштування
4	Бажання клієнтів отримати ще більш інформативні зображення	Бажання клієнтів отримати ще більш інформативні зображення	Створення нового приладу або вдосконалення запропонованого приладу
5	Зниження ціни конкурентами	Конкуренти можуть знизити ціну на свої прилади	Знижувати ціну або вдосконалювати запропонований прилад

В таблиці 4.6 були визначені фактори основних загроз, які мають перешкоди для успішного введення товару на ринок. Також були визначені необхідні дії, реакції компанії, для того, щоб звести до мінімуму загрози, які перешкоджають проекту. Аналіз показав, що поведінка конкурентів може зашкодити виходу на ринок. Конкуренти можуть створити новий прилад, або вдосконалити свої існуючі прилади. Також, вони можуть знизити ціну на свій прилад.

В таблиці 4.7 наведені фактори можливостей для даного стартап-проекту та можливі реакції компанії на них. Ці можливості є основними характеристиками для виходу стартапу на ринок.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей [57]

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Відсутність аналогічних пропозицій	Наразі на ринку немає систем, які б використовували такий самий підхід до обробки зображень.	Зосередити увагу споживачів на інновації цього підходу.
2	Впровадження нових технологій обробки зображень	Комплексування інформації (зображень) з трьох різних каналів.	Оптимізація алгоритму роботи.

Продовження таблиці 4.7

3	Ціна	Споживач бажає отримати якість, якої б задовольняла, поєднуючи це разом з хорошою ціною.	Зосередити увагу споживачів на достатньо не високій ціні та можливості покращення даної розробки.
4	Багатоканальність	Завдяки тому, що наявні два канали з'являється можливість використання систему для виявлення різних типів БПЛА за різних умов середовища.	Звернути увагу покупців на дану перевагу перед конкурентами.

Таблиця 4.7 показує, що запропонований товар задовольняє всі сучасні напрямки технічного розвитку, такі як багатоканальність, універсальність та доступна ціна. Якщо компанія буде вміло використовувати ці переваги тошвидко знайде свою нішу на даному ринку.

На ринку систем обробки зображень, так як і на будь-якому іншому є своя конкуренція, тому проаналізуємо пропозиції ринку для того, щоб визначити загальні риси конкуренції на ринку (таблиця 4.8).

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [57]

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції – вільна	Жоден з гравців, які присутні на ринку не може серйозно впливати на утворення цін продукції.	Проведення великої кампанії, для залучення нових споживачів за рахунок низьких цін.
2. За рівнем конкурентної боротьби – національна	Конкуренція між компаніями виробниками зосереджена на всій території держави.	Зосередити найбільшу увагу на технічно розвинених областях країни.
3. За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Конкуренція лише між представниками однієї галузі.	Звернути увагу клієнтів на універсальності системи.
4. Конкуренція за видами товарів – товарно-родова	Конкуренція, яка відбувається між товарами, що використовують різні канали.	Можливість використання одразу трьох каналів в одній системі.

Продовження таблиці 4.8

5. За характером конкурентних переваг – нецінова	Достовірність виявлення є головним критерієм оцінки системи.	Покращити елементну базу, щоб досягти більш точного виявлення.
6. За інтенсивністю – немарочна	Споживач звертає увагу не на марку виробника, а на характеристики товару.	Покращити характеристики та надійності виробу з одночасною рекламою бренду.

З таблиці 4.8 можна зробити висновок, що конкуренція на ринку є вільною в національних масштабах, і не визначається маркою виробника. Тому не знайдено факторів, які б однозначно обмежували вихід товару на ринок.

В таблиці 4.9 наведено аналіз умов конкуренції в галузі за М. Портером.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером [57]

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Арсенал	Наявність товарних знаків, розмір капіталовкладень, доступ до ресурсів, можливість використання новітніх технологій.	Значення розміру поставок для постачальників, налагоджені поставки.	Торгівельні знаки, прибутки, система інформації.	Немає.
Висновки	В межах України конкурентна боротьба неінтенсивна	Є можливості входу на ринок за рахунок гнучкості цін, переваг у затратах	Постачальники не диктують умови роботи на ринку.	Клієнти диктують певні умови: впізнаваність продукту, ціна, реклама, якість.	Немає.

Зробивши аналіз конкурентного ринку, та деякі обмеження з боку клієнтів, можна зробити висновок, що робота на ринку буде дуже важкою, проте можлива через переваги в ціні та не великої різниці в результатах. Для виходу на закордонний ринок, потрібно ще

вдосконалювати проект.

Взявши до уваги аналіз конкуренції, визначивши групи потенційних споживачів, врахувавши фактори можливостей та загроз проведемо аналіз факторів конкурентоспроможності.

В таблиці 4.10 наведено перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності [57]

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Хороша ціна на продукт при високій якості	Є достатньо не дорогим, але при цьому забезпечує високу точність виявлення.
2	Новизна продукції	Прямих аналогів на ринку не має.
3	Технічна підтримка	Технічна підтримка здійснюється протягом всього терміну експлуатації, що включає в себе покращення складових системи, для більш точного виявлення та обробки інформації.
4	Універсальність	Через багатоканальність системи можливість використання при різних умовах роботи.
5	Надійність	Система має високу надійність, адже для розробки системи використовуються високоякісні комплектуючі.
6	Компактність	Завдяки вдалому підбору складових та їх розміщенню, система виходить досить не великою.

Провівши аналіз конкурентоспроможності можна зробити висновок, що в даного продукту є певна кількість переваг перед конкурентами, що робить товар достатньо конкурентоспроможним на ринку.

Зробивши дослідження факторів конкурентоспроможності проведемо аналіз сильних та слабких сторін проекту.

В таблиці 4.11 наведено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартапу «Обробка зображень в автоматичних багатоканальних оптико-електронних системах виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів» [57]

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Автоматична багатоканальна оптико-електронна система виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Хороша ціна на продукт при високій якості	18							+
2	Новизна продукції	19							+
3	Технічна підтримка	17						+	
4	Універсальність	19				+			
5	Надійність	18					+		
6	Компактність	19							+

Провівши аналіз переваг та недоліків можна зробити висновок, що продукт є достатньо привабливим для потенційних споживачів, адже з результатів видно, що стартап має більше переваг.

Виконаємо SWOT-аналіз стартапу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (таблиця 4.12) на основі визначених факторів загроз та можливостей.

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту [57]

Сильні сторони: 1. Не висока ціна. 2. Новизна продукції. 3. Технічна підтримка. 4. Компактність. 5. Універсальність. 6. Мобільність. 7. Надійність.	Слабкі сторони: 1. Нова компанія на ринку. 2. Точність виявлення та обробки.
--	--

Продовження таблиці 4.12

Можливості: 1. Відсутність аналогів на ринку. Запровадження нових технологій обробки зображень.	Загрози: Поява нових конкурентів з закордону на нашому ринку. Зміна курсу гривні, яка призведе до зменшення кількості продажів продукту.
--	---

SWOT-аналіз показує нам, що сильні сторони стартап-проекту переважають над слабкими, які є лише тимчасовими та при подальшому розвитку компанії будуть ліквідовані. В свою чергу, цей аналіз показує те, що загрози та можливості не є реалізованими та мають невелику ймовірність здійснитися.

На основі цього та попередніх аналізів можна визначити альтернативи впровадження стартап-проекту на ринок, урахувавши потреби потенційних споживачів (таблиця 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартапу [57]

<i>№</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність ресурсів отримання</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії.	60 %	3-5 місяців
2	Приймати участь в міжнародних конференціях.	Висока	9-12 місяців
3	Вихід з ринку.	Низька	1,5-2 роки

На основі SWOT-аналізу було розроблено альтернативи ринкової поведінки 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. З усіх альтернатив було обрано проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії – 60%, а строки реалізації – найменшими 3-5 міс.

4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту

Для того, щоб почати розробку ринкової стратегії стартап-проекту, спочатку потрібно описати цільові групи потенційних споживачів, які наведені у таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів [57]

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Військові підприємства	Висока	Високий	Середня	Висока
2	Виявлення пожеж, та аварійно-небезпечних ділянок	Середня	Високий	Середня	Середня
3	Приватні особи	Низька	Середній	Відсутня	Висока
Які цільові групи обрано: військові підприємства					

Отже, проаналізувавши потенційні групи споживачів було обрано одну з них, якій буде запропоновано розроблену систему, а саме військові підприємства, оскільки їм не завжди потрібний високий рівень інформативності, а існуючі в них прилади є достатньо дорогими. Всі групи готові сприйняти продукт.

Визначимо базову стратегію розвитку стартап-проекту (таблиця 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку [57]

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії.	Ексклюзивний розподіл.	Підвищення рівня кваліфікації сприятиме оптимізації запропонованого приладу, а також розробка нових.	Стратегія диференціації.

Стратегією охоплення ринку було обрано – ексклюзивний розподіл, адже вона є найбільш підходящою для запропонованого стартап-проекту. Саме ця стратегія допоможе задовольнити потреби споживачів, за рахунок підвищення кваліфікації робітників компанії. Базовою стратегією було обрано – стратегію диференціації. Така стратегія є найбільш підходящою, тому що вона знижує ступінь замінності товару по відношенню до прямих конкурентів, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність.

Далі визначимо базову стратегію конкурентної поведінки, інформація про яку наведена у таблиці 4.16.

Таблиця 4.16 – Базова стратегія конкурентної поведінки [57]

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Шукати нових споживачів та забирати у конкурентів існуючих.	Так, оскільки прилад оптимізується, а не створюється новий	Стратегія позиціонування.

Базовою стратегією конкурентної поведінки було обрано стратегію позиціонування, оскільки вона є найбільш влучною. Компанія показує чим продукт унікальний, чим відрізняється від конкурентів, чим корисний споживачу, а саме відбувається позиціонування на особливостях технології, що є важливим для споживачів. Також, з таблиці видно, що товар не є "першопрохідцем" та буде копіювати основні характеристики товарів у конкурентів.

Основною частиною стратегії розвитку проекту є визначення стратегії позиціонування (таблиця 4.17). Так як вона формує основні ринкові позиції, за допомогою яких споживачі мають визначити стартап-проект.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування [57]

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три)
1	Результативність	Стратегія диференціації.	Використання сучасних методів та підходів для вирішення поставлених задач.	Простота, технічне обслуговування, результативність.
2	Технічне обслуговування			
3	Простота			

Основними вимогами до товару цільової аудиторії є результативність, технічне обслуговування та простота. Ключові конкурентоспроможні позиції дають можливість виконати ці вимоги у повному обсязі, тому і було обрано асоціації на базі вимог цільової аудиторії, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту – простота, результативність, технічне обслуговування.

Після того, як були проведені дослідження ринку, аналіз сильних та слабких сторін товару, розробимо концепцію товару, згідно до якої товар буде виводитись на ринок. Для того, щоб це зробити підсумуємо всі результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (таблиця 4.18).

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару [57]

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Оптимізований метод комплексування оптико електронних каналів.	Дає змогу отримувати одне зображення з двох або більше каналів з більшою результативністю.	Пропонований прилад є більш результативним за попередній, а також легкий у використанні і не потребує високої кваліфікації користувача.

Зробивши аналіз ключових переваг нашого товару перед аналогами конкурентів, видно, що продукт є дуже конкурентоспроможним і може витіснити з ринку існуючі

товари.

Далі потрібно сформувати хорошу систему збуду товару, яка б відповідала поставленим задачам. В таблиці 4.19 проведемо формування системи збуту даного стартап-проекту.

Таблиця 4.19 – Формування системи збуту [57]

№ п/п	Специфіка закупівельної Поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	На сьогоднішній день споживачі купують продукт безпосередньо у науково-дослідницьких інститутах або ж розробляють власну продукцію.	Встановлення контактів зі споживачами, їх підтримка.	Канал нульового рівня (виробник безпосередньо продає товар клієнту).	Збут продукції відбувається шляхом виставлення продукції на спеціальних виставках.

Найкращим рішенням для збуту товару даного виду є канал нульового рівня, тобто безпосередній продаж товару клієнту напряду.

Останнім етапом у формуванні маркетингової частини є формування концепції маркетингових комунікацій. Аналіз наведено в таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 – Концепція маркетингових комунікацій [57]

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Клієнти дізнаються про нові продукти з реклами в інтернеті, наукових публікацій, сайтів компаній, соціальних мереж, за рекомендаціями.	Конференції та виставки, Інтернет.	Ціна, SMM, контент-маркетинг.	Донести до потенційних споживачів переваги товару, представлення товару з метою залучення та зацікавлення клієнтів.	Особисті зустрічі із потенційними споживачами та пропонувати їм товар.

В підсумку можна сказати, що визначена концепція маркетингових комунікацій сформує оптимальний результат та запропоновано систему збуту продукції. Концепція маркетингових комунікацій показала, для того щоб популяризувати власну продукцію необхідно виступати на конференціях, публікувати дослідницькі статті, показувати продукцію на виставках, тобто показувати свою активну розробницьку наукову діяльність по різних джерелах. Завданням рекламного повідомлення має стати представлення товару відповідній аудиторії (підприємств).

4.4 Організація реалізації стартап-проекту

Важливим є визначення ключових функцій, необхідних знань та навичок для наявних та потенційних працівників. З цією метою складемо профіль посади стартап-проекту (таблиця 4.21).

Таблиця 4.21 – Профіль працівників стартап-проекту [57]

Критерій	Зміст
Основна освіта	Бажано вища технічна освіта, але розглядається і незакінчена технічна освіта
Додаткова освіта, спеціалізована	Цифрова обробка зображень
Необхідний досвід роботи	Досвід роботи з оптичними системами, кресленнями
Завдання	Розробка автоматичної багатоканальної оптико-електронної системи виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів.
Знання	Базові знання оптики та оптичних систем
Навички, вміння, ділові якості	Швидко орієнтуватися в ситуації
Особисті якості	Відповідальність, чіткість, розуміння
Мотивація (що можемо запропонувати)	Можливість кар'єрного зростання, участь у нових розробках, висока заробітна плата та можливість її підвищувати

З визначення профіля працівника видно, що основною вимогою до потенційних працівників є знання оптики та оптичних систем. Потрібні люди, які хочуть і можуть працювати. Головною вимогою є вміння працювати з оптичною технікою, швидке реагування на зроблену помилку та вміння її вчасно виправити.

Важливою та необхідною складовою організації реалізації стартап-проекту є формування календарного плану-графіка (таблиця 4.22).

Таблиця 4.22 – Календарний план-графік стартапу [57]

Зміст етапу	Період запуску (за місяцями з початку підготовки проекту)				Вартість стадії, грн
	1	2	3	4	
Формування ідеї	0				0
Сформувані технологічне завдання, визначити перспективні напрямки та створити пропозицію, запустити та проаналізувати результат		5000			5000
Розробити маркетингову стратегію. Оцінити ринок споживачів. Аналіз смаків цільової аудиторії. Створити скетч для опису продукту. Перевірити продукт та дати feedback. Описати досвід використання, всі недоліки та можливі покращення.			5000		5000
Пошук постачальників комплектуючих				0	0
Розробка остаточного варіанта приладу				45000	45000
Разом					55000

Із сформованого календарного плану-графіка видно, що даний стартап- проект можна реалізувати за 4 місяці з невеликою кількістю витрат.

Далі співставивши всі складові витрат, які будуть на початковій стадії стартап-проекту, сформуємо таблицю 4.23, де продемонструємо, які ж початкові витрати матиме розроблюваний стартап-проект.

Таблиця 4.21 – Початкові витрати проекту [57]

№	Стаття витрат	Обсяги витрат в 0-й рік, тис. грн.
1	Розробка проектних матеріалів	1
2	Робоче проектування і прив'язка проекту	3
3	Витрати на придбання обладнання, устаткування та пристроїв	20
4	Витрати на приймально-здавальні випробування	3
5	Витрати на придбання нематеріальних активів	6
6	Оплата юридичних послуг	4
7	Витрати на перед виробничі маркетингові дослідження і створення збутової мережі	5
8	Витрати, пов'язані з формуванням команди	3
Разом		45

Як видно з визначення початкових витрат, вони не є досить великими, адже в основному витрати йдуть на придбання обладнання, устаткування та необхідних пристроїв. Витрати повністю покриває розробник і проект не потребує додаткових інвестицій.

Далі потрібно визначити межі цін, які будуть використовуватися при формуванні цін на розроблюваний товар. Для цього потрібно проаналізувати доходи цільової аудиторії, а також ціни на товари замітники.

В таблиці 4.22 визначимо межі цін.

Таблиця 4.22 – Визначення меж встановлення ціни [57]

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	~\$300-500 грн.	~\$800-1000 грн.	~\$2000-3500 грн/рік	\$200-700 грн.

В таблиці були наведені рівні цін на товари-замінники та аналоги, а також рівень доходів потенційних споживачів. З цих даних обрано верхню та нижню межу ціна на

розроблюваний продукт.

4.5 Висновки до розділу 4

Виконавши загальний аналіз здійснення ідеї стартап-проекту, можна зробити загальний висновок.

Попит на продукцію є, що підтверджується позитивною динамікою ринку та потребою в оптимізованому приладі, для отримання більш результативного вихідного зображення.

Інтенсивність конкуренції в сегменті в рамках України значна, а вхід у сегмент є важким, проте реальним.

Цільовою групою потенційних клієнтів є військові підприємства, оскільки їм не завжди потрібна високий рівень інформативності, а існуючі в них прилади є достатньо дорогими.

В якості альтернативи впровадження проекту доцільно обрати проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії. За межами України є необхідність у виступах на конференціях та примати участь у міжнародних виставках.

Перевагою даного проекту є підвищення рівня результативності в порівнянні з низьким рівнем ціни на проект. Проект буде захищено від копіювання за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці.

Здійснення (імплементация) запропонованого проекту є доцільною, оскільки технології та проекти в області злиття зображень залишаються та будуть актуальними у майбутньому.

ВИСНОВКИ

Виявлення безпілотних літальних апаратів, а особливо малогабаритних, на сьогоднішній день є досить актуальною та непростою задачею. Кількість сфер їх застосування зростає, вони стають доступними для звичайних користувачів. Тому виявлення БПЛА має вирішальне значення для захисту від їх застосування для неправомірних дій.

Для виявлення БПЛА використовують різні методи, зокрема, радіолокаційні, акустичні, радіочастотні та оптико-електронні. В даній роботі розглядалась автоматична багатоканальна оптико-електронна система, яка складається з телевізійного та тепловізійного каналів, виявлення та пошуку малогабаритних безпілотних літальних апаратів.

Аналіз літератури показав, що OEM вимірювання дальності до повітряних цілей є дуже ефективними і забезпечують вимірювання максимальної дальності від 100 – 200 м до 20 – 30 км із абсолютною похибкою вимірів від $\pm 10^{-2}$ м до 0,5 м відповідно.

Основа всіх оптико-електронних систем це ті чи інші типи камер, які відрізняються робочими спектральними діапазонами, їх завдання полягає у виявленні та ідентифікації об'єкта. Обов'язковою умовою ідентифікації цілі є контраст характерних елементів — зовнішній (стосовно фону) для крайових елементів та/або внутрішній (по відношенню до інших елементів об'єкта) для елементів, що знаходяться всередині видимої проекції об'єкту.

Розглянуто типові структурні схеми оптико-електронних систем.

Розроблено методики розрахунку відношення сигнал/шум в тепловізійному та телевізійному каналах. Досліджено модель для забезпечення заданих ймовірностей виявлення і розроблено пропозиції щодо вибору найбільш доцільного методу виявлення для заданих умов спостереження: визначено діапазон змін вхідних величин телевізійного та тепловізійного каналів – габаритних та енергетичних параметрів

об'єктів спостереження, обґрунтовано діапазон характеристик оптичної системи та блоку приймача випромінювання телевізійного та тепловізійного каналів, розроблено пропозиції щодо вибору найбільш доцільного методу виявлення для заданих умов спостереження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (дата доступа 16.10.2019).
2. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетецентрическая война - принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. – СПб.: Научно-технические технологии, 2018. – 898 с.
3. Аниськов Р. В., Архипова Е. В., Гордеев А. А., Пугачев А. Н. К вопросу борьбы с незаконным использованием беспилотных летательных аппаратов коммерческого типа // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9-10 (111-112). С. 71-75.
4. Митрофанов Д. Г., Шишков С. В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 28-40.
5. Демьянович М. А. Использование беспилотных летательных аппаратов в преступных целях: методы противодействия и борьбы // Правопорядок: история, теория, практика. 2019. № 2 (21). С. 108-112.
6. Самойлов П. В., Иванов К. А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59-65. – URL <https://moluch.ru/archive/179/46398/>.
7. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-problemy_i_perspektivy_protivostoania.

8. Алешин Б. С., Суханов В. Л., Шибяев В. М., Шнырев А. Г. Типы беспилотных летательных аппаратов // Межотраслевой альманах. 2014. № 46. – URL: <http://slaviza.ru/print:page,1,1494-tipy-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov.html>.
9. Васильчук Є. О., Микитенко В. І., Оптико-електронні системи виявлення малих об'єктів та методи обробки зображень в них. XXI Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи", 17-18.05.2022, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, с. 40 – 41.
10. Ананенков А. Е., Марин Д. В., Нуждин В. М., Расторгуев В. В., Соколов П. В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 19.
11. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 29.01.2015. № 6 (14).
12. Зайцев А. В., Назарчук И. И., Красавцев О. О., Кичулкин Д. А. Особенности борьбы с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2013. № 5. С. 37-43.
13. Бодров В. Н., Прудников Н. В., Панков С. Е. Многоканальные «смотрящие» ОЭС кругового и секторного обзора с высоким угловым разрешением и быстродействием // Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки). Материалы всероссийской научной конференции. – Звенигород: Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН, 2018. – С. 324-337.
14. Дмитриев М. Л., Покровский М. В., Ростопчин В. В., Федин С. И. Возвращаемый беспилотный летательный аппарат с трехопорным шасси // Патент РФ № 2408500. 2008.
15. Аснис Л.А., Васильев В.П. и др. Лазерная дальнометрия. Москва : Радио и связь, 1995. 256 с.

16. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А. и др. Лазерные приборы и методы измерения дальности. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 92 с.
17. Hammer M., Hebel M., Laurenzis M., Arens M. Lidar-based detection and tracking of small UAVs // International Society for Optics and photonics, 2018. Vol. 10799. P. 107990.
18. Evenson K., Wells J., Speed of light from direct frequency and wavelength measurement of the methane stabilized laser // Phys Rev.Lett. 1972. Vol. 29, No. 19. P. 1346–1349.
19. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Ланинград: Машиностроение, 1976. 296 с.
20. Bercovich G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements // Adv. Opt. Photonic. 2012. P. 441–473.
21. Wu H., Zhang F., Liu T., Absolute distance measurements by chirped pulse interferometry using a femtosecond pulse laser // Opt.Express. 2015. Vol. 23, No.24. P. 31582–31593.
22. Baumann E., Comb-calibrated frequency-modulated continuous wave lidar for absolute distance measurements // Opt. Lett. 2013. Vol. 38, No.12. P. 2026 – 2028.
23. Вильнер В., Лаврюшин А., Рудь Е. Оценка возможностей светолокационного измерителя дальности с накоплением // Фотоника. 2007. С. 22–26.
24. Фуфаев А.В., Фёдорцев Р.В. Повышение точности измерения дистанции в дальномерном канале прибора наблюдения с использованием полупроводникового лазера // Приборы и методы измерений. 2013. №2. С. 95-102.
25. В.І. Микитенко, В.М. Сенаторов, і А.О. Гурнович, «Наземний роботизований комплекс з пасивним вимірюванням дальності», Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak., вип. 62(2), с. 11–16, Груд 2021.
26. Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Пінчук Б. Ю., Сокол Б. В. і Тягур В. М. (2021) «Комп'ютерно-інтегрований метод виявлення об'єктів поляризаційним тепловізором», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (85), с. 21-26.

27. Власов В.Г., Лазнева Э.В. Метод гетеродинного приема излучения, амплитудно-модулированного в диапазоне 5 – 50 МГц, с помощью фотодиода // Опт.- мех. пром. 1968. №10. С. 5 – 8.
28. Попов Ю.В., Утенков Б.И. Методы управления режимом работы фотоэлектронных умножителей // Опт.- мех. пром. 1976. №2. С. 65–71.
29. Zhang W. Comb-referenced frequency sweeping interferometry for precisely measuring large stepped structures // Appl. Opt. 2018. Vol. 57, No.5. С. 1247–1253.
30. Shihua Zhang, Zheyi Xu, Benyong Chen, Liping Yan, and Jiandong Xie. Shihua Zhang Sinusoidal phase modulating absolute distance interferometer combining frequency sweeping and multiwavelength intrferometry // Optics Express. Vol. 26. Issue 7. Pp. 9273-9284.
31. Gunnar Arisholm. Combined range ambiguity resolution and noise reduction in lidar signal processing // Opt. Eng. 2018. Vol. 57, No.7. P.73 – 103.
32. Медведев А.В., Гринкевич А.В., Князева С.Н. Современные подходы к созданию пассивных дальномеров // Фотоника. 2017. №8/68. С.30 – 37.
33. Juan Luis Nieves Multispectral synthesis of daylight using a commercial digital CCD // Appl. Opt. 2005. Vol.44, No.27. P. 5696 – 5703.
34. Ямбаев Х.К., Староверов С.З. Особенности фоточувствительных приемников с зарядовой связью и их возможности в геодезии и метрологии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017.
35. Donald E. Groom. Recent progress on CCDs for astronomical imaging // Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors. 2000. Proc. Vol. 4008.
36. Волков В.Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для обеспечения безопасности // Системы управления, связи и безопасности. 2016. №3. С.66 – 94.
37. Night vision technologies handbook. Homeland security. 2013. 34 p.
38. Рева В.П. и др. ПЗС-фотоматрицы с электронным умножением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2017. № 1-2. С.33 – 37.

39. Сизов Ф.Ф., Чувствительность матриц ПЗС с электронным умножением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2018. № 2. С.9 – 14.
40. Стафеев В.И., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Акимов В.М. и др. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 10. С. 1257-1265.
41. Lohrmann D., Littleton R., Reese C. et al. Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges // Opt. Eng. 2013. Vol.52, No.6. 061305.
42. Иванов С. Д., Косцов Э. Г. Автометрия. Тепловые приемники неохлаждаемых многомерных тепловизионных матриц. 2015. Т. 51, № 6. С.79-88.
43. Masafumi Kimata. Uncooled infrared focal plane arrays // wiley.com/doi/full/10.1002/tee.22563. 2017.
44. Волков В.Г. Тепловизионные приборы для спецтехники //bnti.ru/showart.asp. 2012.
45. Патент RU2680265. Способ определения дальности до движущегося воздушного объекта методом пассивной локации / А.И. Стучилин, заявитель и патентообладатель. 2019.
46. Колобродов В.Г., Шустер Н.. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підручник. - К.:, 1999. - 340 с.
47. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 2004. – 480 с.
48. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Основы улучшения видимости в сложных условиях. – М.: ООО «Недра-бизнесцентр», 199. – 286 с.
49. Кощавцев Н.Ф., Конщавцев А.Н., Федотова С.Ф. Анализ перспектив развития приборов ночного видения // Прикл. физика. – 1999. – №3. – С. 66-69.
50. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 352 с.

51. Кравченко І.В., Микитенко В.І., Васильчук Є.О., Енергетичний розрахунок автоматичних оптико-електронних систем спостереження малорозмірних безпілотних літальних апаратів, «Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування», Вип. 64(2), с.26-36, 2022
52. Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження: монографія / В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, Є.Г. Балінський // Київ: «Вік прінт», 2017. - 202 с.
52. WLP Uncooled Infrared Detectors. [Online]. Available: <https://www.gst-ir.net/uploads/products/pdf/wlp-uncooled-infrared-detectors.pdf>
53. KAF-0402 - 768 (H) x 512 (V) Full Frame CCD Image Sensor. [Online]. Available: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/ON%20Semiconductor%20PDFs/KAF-0402_Rev2_Apr2015.pdf
54. Колобродов В. Г., Микитенко В. І. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія. Поліграфічний центр «Аверс», Київ, 2013. – 178 с.
55. Igor G Chyzh, Valentin G Kolobrodov, Anatoly V Molodyk, Volodymyr I Mykytenko, Grygorij S Tymchik, Energy resolution of dual-channel opto-electronic surveillance system / Proceedings of SPIE, Volume 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020; 115810K (2020).
56. Б. Ю. Пінчук, В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, В. М. Тягур, В. М. Боровицький Математичне моделювання і обробка сигналів в космічних системах спостереження з матричними приймачами випромінювання. Монографія [Електронний ресурс] – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 172 с.
57. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей/ За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.