

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження процесів виявлення та розпізнавання малорозмірних
безпілотних літальних апаратів в оптичному каналі
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МІМ-20-1
Іваницький С.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та
радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Коритцев І.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Карташов В.М.
(прізвище, ініціали)

2021р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформаціїКафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних системРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Іваницькому Сергію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження процесів виявлення та та розпізнавання малорозмірних безпілотних літальних апаратів в оптичному каналі.затверджена наказом по університету від " 08 " 11 2021 р. № 1675 Ст2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08.12.2021 р.3. Вихідні дані до роботи Виконати огляд аналогічних методів виявлення БПЛА. Провести теоретичний аналіз стереоскопічного метода вимірювання дальності і оцінити його потенційних можливості. Виконати розрахунки похибки визначення дальності для різних комбінацій параметрів системи. Обробити результати експерименту по виявленню дронів за результатами стереовідеоспостереження. Отримати експериментальні значення похибок вимірювання азимута, кута місця і дальності БПЛА за вимірюваннями системи стереобачення.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ1. Огляд аналогічних методів виявлення БПЛА.2. Оцінка методичних похибок стереоскопічного метода вимірювання дальності.3. Експериментальні дослідження з визначення дальності до малих БПЛА за допомогою системи стереовідеоспостереження.ВисновкиПерелік посиланьДодатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій:

1. Методи виявлення БПЛА.
2. Постановка задачі.
3. Класифікація оптичних методів вимірювання дальності.
4. Стереоскопічний метод вимірювання дальності.
5. Теоретичні оцінки потенційних похибок вимірювання.
6. Результати оцінки потенційних похибок вимірювання.
7. Неправильний вибір параметрів системи.
8. Експериментальна установка стереовідеоспостереження.
9. Калібровка фокусної відстані.
10. Калібровка стереоскопічної системи.
11. Результати калібровки стереопари.
12. Логи GPS польота БПЛА.
13. Алгоритм обробки зображень.
14. Результати вимірювання координат БПЛА.
15. Висновки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	08.11.21-11.11.21	
2	Теоретичне обґрунтування методу	12.11.21-18.11.21	
3	Розрахунки потенційної похибки	19.11.21-23.11.21	
4	Калібровка стереопари	24.11.21-26.11.21	
5	Обробка результатів експерименту	27.11.21-29.11.21	
6	Визначення експериментальної похибки	30.11.21-02.12.21	
7	Графічна частина роботи	02.12.21-05.12.21	
8	Перевірка керівником	05.12.21-06.12.21	
9	Перевірка на академічний плагіат	06.12.21	
	Перевірка нормоконтролем	07.12.21	
10	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	07.12.21-08.12.21	

Дата видачі завдання _____ 08.11.21 _____

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи (проєкту) _____ проф. Коритцев І.В. _____

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи: 60 сторінок, 30 рисунків, 50 джерел.

БПЛА, ВИЯВЛЕННЯ, ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ, ДРОН, СТЕРЕОБАЗА, СТЕРЕОБАЧЕННЯ, ПАРАЛАКС, РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ, ФОКУСНА ВІДСТАНЬ

Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки сигналів оптичного діапазону для задачі визначення дальності до безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Мета дослідження – отримання теоретичних і експериментальних числових оцінок похибок вимірювання координат малих БПЛА в оптичному каналі системи виявлення при різних варіантах його реалізації.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, обробка експериментальних даних.

В атестаційній роботі виконано аналітичний огляд оптико-електронних методів вимірювання дальності до об'єктів, проведені теоретичний аналіз стереоскопічного метода вимірювання дальності і оцінка його потенційних можливостей, виконані розрахунки похибки визначення дальності для різних комбінацій параметрів системи, оброблені результати експерименту по виявленню дронів за результатами стереовідеоспостереження, отримані експериментальні значення похибок вимірювання азимута, кута місця і дальності БПЛА за вимірюваннями системи стереобачення.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к аттестационной работе: 60 страниц, 30 рисунков, 50 источников.

БПЛА, ВЫЯВЛЕНИЕ, ИЗМЕРЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ, ДРОН, СТЕРЕОБАЗА, СТЕРЕОВИДЕНИЕ, ПАРАЛЛАКС, РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ, ФОКУСНОЕ РАССТОЯНИЕ

Объект исследования – процессы приёма и обработки сигналов оптического диапазона для задачи определения дальности до беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Цель исследования – получение теоретических и экспериментальных числовых оценок погрешностей измерения координат малых БПЛА в оптическом канале системы обнаружения при различных вариантах его реализации.

Методы исследования – теоретический анализ, числовые расчеты, математическое моделирование, обработка экспериментальных данных.

В аттестационной работе выполнен аналитический обзор оптико-электронных методов измерения дальности до объектов, проведены теоретический анализ стереоскопического метода измерения дальности и оценка его потенциальных возможностей, выполнены расчеты погрешности определения дальности для различных комбинаций параметров системы, обработанные результаты эксперимента по обнаружению дронов по результатам стереовидеонаблюдения, получены экспериментальные значения погрешностей измерения азимута, угла места и дальности БПЛА по измерениям системы стереовидения.

ABSTRACT

Explanatory note to the certification work: 60 pages, 30 figures, 50 sources.

UAV, DETECTION, DISTANCE MEASUREMENT, DRONE, STEREOBASE, STEREOVATION, PARALAX, DISTINCTION, FOCUS DISTANCE

The object of study – the processes of reception and processing of signals in the optical range for the task of determining the range to unmanned aerial vehicles (UAVs).

The purpose of the study is to obtain theoretical and experimental numerical estimates of errors in measuring the coordinates of small UAVs in the optical channel of the detection system for different variants of its implementation.

Research methods – theoretical analysis, numerical calculations, mathematical modelling, processing of experimental data.

In the attestation work the analytical review of optoelectronic methods of distance measurement to objects is performed, the theoretical analysis of the stereoscopic method of distance measurement and estimation of its potential possibilities is carried out, the calculations of range determination error for different combinations of system parameters are performed, the experimental values of azimuth measurement angle, UAV position angle and range according to stereo vision system measurements were obtained.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДПЛЬНОСТІ ДО ОБ'ЄКТІВ.....	10
1.1 Загальна класифікація оптико-електронних методів.....	10
1.2 Методи протидії БПЛА.....	11
1.3 Різновиди підходів по виявленню БПЛА.....	12
1.4 Системи нейтралізації дронів.....	14
1.5 Висновки по розділу 1.....	16
2 ОЦІНКА МЕТОДИЧНИХ ПОХИБОК СТЕРЕОСКОПІЧНОГО МЕТОДА ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ.....	18
2.1 Потенційні можливості стереоскопічного метода вимірювання дальності.....	18
2.2 Висновки по розділу 2.....	26
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО МАЛИХ БПЛА ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ СТЕРЕОВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ.....	27
3.1 Експериментальна установка стереовідеоспостереження.....	27
3.2 Калібровка установки і оцінка експериментальних похибок.....	33
3.3 Опис експерименту з визначення координат БПЛА.....	40
3.4 Алгоритм обробки стереозображень і результати експериментів з визначення координат БПЛА.....	44
3.5 Висновки по розділу 3.....	49

Висновки.....	50
Перелік посилань.....	55
ДОДАТОК А. Графічний матеріал.....	61
ДОДАТОК Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА	–	безпілотний літальний апарат
АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач
ІЧ	–	інфрачервоний
МІРЕС	–	медіаінженерія та інформаційні радіоелектронні системи
НДР	–	науково-дослідна робота
ОЕМ	–	Оптико-електронні методи
ПЗС	–	(прилади із зарядним зв'язком)
КМОП	–	комплементарний метал-оксид-напівпровідник
GPS	–	Global Positioning System – система глобального позиціонування
FOV	–	field of view – поле зору камери
IP	–	Internet Protocol – міжмережевий протокол
LAN	–	Local Area Network – локальна обчислювальна мережа;
OpenCV	–	Open Source Computer Vision Library – бібліотека комп'ютерного зору з відкритим вихідним кодом
WAN	–	Wide Area Network – глобальна комп'ютерна мережа
D	–	дальність
F	–	фокусна відстань оптичної системи
efd	–	еквівалентна фокусна відстань
L	–	лінійний розмір об'єкта
I_p	–	лінійний розмір пікселя
n_1 і n_2	–	координати пікселів по осі x
N	–	роздільна здатність матриці по горизонталі
W	–	ширина світлочутливої матриці
$Zoom$	–	величина збільшення фокусної відстані

ВСТУП

Сьогодні актуальність оперативної протидії безпілотним літальним апаратам (БПЛА) є дуже високою. Сучасний безпілотний літальний апарат (дрон) здатний не тільки вести відеорозвідку на заданій території, але спостерігати за конкретним об'єктом протягом тривалого часу. Літальні апарати можуть протягом кількох днів, тижнів або навіть місяців проводити спостереження за прикріпленою до нього територією.

Крім розвідки, безпілотні апарати, здатні перевозити та транспортувати небезпечні вантажі на об'єкти, що охороняються. Як вантаж може перевозитися вибухова речовина, що перетворює такий літальний апарат на зброю, здатну виконувати диверсійні та терористичні завдання.

Все, що надійно приховано від сторонніх очей високими огорожами та наземними системами охорони, виявиться як на долоні з висоти пташиного польоту. Навіть якщо якимось чином дрон буде перехоплено, відео з його камери залишиться на планшета власника. Боротьба з порушниками в даному випадку, має набувати вже зовсім інший характер. Ця проблема вимагає особливих способів боротьби.

Мета дослідження – отримання теоретичних і експериментальних числових оцінок похибок вимірювання координат малих БПЛА в оптичному каналі системи виявлення при різних варіантах його реалізації.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, обробка експериментальних даних.

1 ОГЛЯД ТА ПОВЕРХНІЙ АНАЛІЗ АНАЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА

1.1 Загальна класифікація оптико-електронних методів вимірювання дальності

Для вирішення задачі знаходження відстані до об'єкту використовують переважно активні оптико-електронні засоби. Активні оптико-електронні локатори вимірюють відстань до цілі двома способами: імпульсним та фазовим. Пасивні переважно використовують багатокамерні пристрої з фіксованою базою для побудови карти глибини сцени на основі стереозображення.

Блок-схема активного оптико-електронного локатора, що використовує імпульсний метод наведена на рис. 1.1.

Цифрами позначені: 1 – призма; 2 – модулятор; 3 – напівпрозоре дзеркало; 4 – світлодіодний; 5 – приймальнопередаюча оптична система; 6 – фотоелектричний підсилювач сигнальний; 7 – підсилювач; 8 – фотоелектричний підсилювач опорний; 9 – блок вимірювання часу запізнення; 10 – індикатор дальності; 11 – генератор керування випромінюванням; 12 – активна речовина.

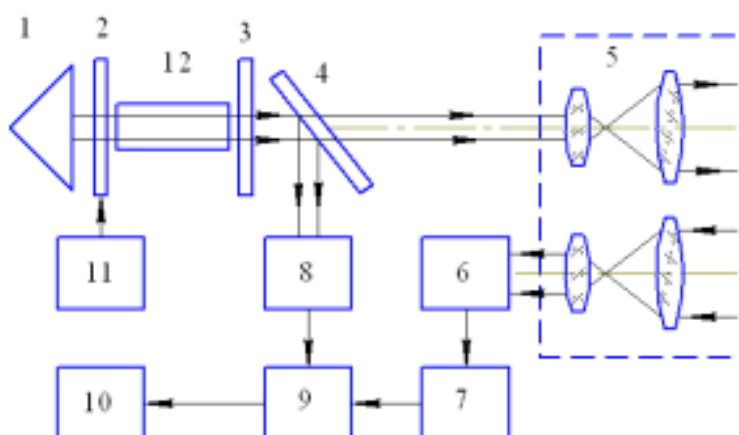


Рисунок 1.1 – Блок-схема лазерного локатора з використанням імпульсного методу вимірювання дальності

1.2 Методи протидії БПЛА

Комплексний захист об'єктів є предметом постійного пошуку оптимальних підходів та рішень.

Заходи протидії подібним загрозам поділяються на три категорії (рис. 1.2).

Перша категорія – це заходи превентивно-профілактичного характеру. До них належать законодавчі заборони держави щодо обов'язкової реєстрацію безпілотних літальних апаратів. Геолокаційні обмежувачі, які останнім часом стали додавати в програмне забезпечення дронів їх виробники. Користувачам дронів буде доступне розблокування польотів над деякими територіями, за винятком найважливіших з погляду держбезпеки.

Певний стримуючий ефект можуть мати інформаційні щити периметрам об'єктів, що охороняються, до стандартних «Заборонена зона». Прохід заборонено» можуть бути додані транспаранти «Використання дронів ближче, ніж у ... метрів від огорожі, заборонено».

Друга категорія – це заходи з дрон-детекції (дистанційного виявлення дронів) на самому об'єкті, що охороняється. У цій галузі активно ведуться розробки обладнання, що функціонує на різних засадах або їх комбінації. Деякі закордонні виробники вже представили на ринку цілком ефективні комплекси дрон-детекції як для міських умов, так і відкритих просторів.

Існує кілька різних підходів щодо виявлення безпілотників.

1.3 Різновиди підходів по виявленню БПЛА

Акустична дрон-детекція. Апаратура акустичного виявлення БПЛА проста в установці та експлуатації, не вимагає дозволу спецслужб і однаково ефективна як денний, так і нічний час.



Рисунок 1.2 – Різновиди захисту від дронів

Звукові характеристики (сигнатура) дрону що летить, передаються з акустичного датчика на сервер, де порівнюються з сигнатурами всіх безпілотників, зведених в спеціальну базу даних. При збігу з відповідною сигнатурою (пізнання об'єкта як дрона) формується зворотна команда на оповіщення. Акустична дрон-детекція може мати достатньо високу дальність дії та несприйнятливості до перешкод типу дерев, проводів та антен. Проте у міському середовищі високий рівень фонового шуму буде представляти певну складність для системи, що працює на такому принципі. Отже, дані системи найбільше підходять для замських об'єктів.

Оптична дрон-детекція. Апаратура оптичного виявлення безпілотних літальних апаратів легко вбудовується у вже існуючу систему безпеки об'єкта,

оскільки являє собою камери високої роздільної здатності. Спеціальне програмне забезпечення налаштовує їх на малорозмірні повітряні цілі та дозволяє записувати відео наближення дрону до об'єкта. Оптична дрон-детекція краще всього підходить для щільної міської забудови, тому що має порівняно невисокий радіус дії та допускає будь-який рівень шуму. Її мінус у тому, що дрони, зібрані любителями, часто мають силуети, надто відмінні від тих, що містяться в базі даних системи, і отже, вона може їх не пізнати.

Радарна дрон-детекція. Застосування доплерівських радарів для виявлення дронів пов'язане з деякими законодавчими обмеженнями (апаратура подвійного призначення) та досить високою вартістю таких систем. Безперечною перевагою, однак, є дальність дії. Дрон може бути виявлений за кілька кілометрів від об'єкта, що охороняється, що дає достатньо часу для прийняття контрзаходів. Спеціальні параметри налаштування систем радарної дрон-детекції дозволяють їм не реагувати на птахів та пілотовані повітряні судна.

Радіочастотна дрон-детекція. Виявлення дронів за характерними радіосигналами може бути ще одним принципом, що вирішує проблему фонового шуму, обмеженої видимості та малого радіусу дії. Але сучасні коптери (дрони) не завжди управляються по радіо, маршрут їх польоту може бути запрограмований через GPS, тому системи радіочастотної дрон-детекції ефективні не завжди.

Дрон-детекція за допомогою мультисенсорних систем.

Мультисенсорні детектори дронів обробляють сигнал від мети відразу по кількох каналах:

- візуальному;
- тепловому;
- акустичному;
- ультразвуковому;
- радіочастотного;

– радіолокаційному.

Кожна система виявлення дронів має свої переваги та недоліки.

На сьогоднішній день оптимальним варіантом захисту від безпілотників є встановлення мультисенсорних систем виявлення дронів. Такі системи включають оптичні, теплові, акустичні, Wi-Fi датчики, а також можуть доповнюватися радіочастотними сенсорами та спеціалізованими радарми. Це підвищує ймовірність виявлення і багато в чому вирішує проблему помилкових спрацьовувань, що робить мультисенсорні системи дрон-детекції дуже зручними для міських умов або швидкого розгортання в мобільному варіанті на будь-якому об'єкті. Мультисенсорний підхід для аналізу та ідентифікації вхідних загроз. Радіолокаційний датчик відстежує об'єкт, що рухається, відокремлюючи його від фонового шуму, такого як дерева чи птахи. Радіочастотний датчик забезпечує напрямок до мети, відповідаючи набору RF-сигнатури, які регулярно оновлюються. Акустичний датчик порівнює звуковий зразок з базою акустичних даних сигнатури. Якщо він знаходить відповідність, система видає попередження та записує ідентифікуючу інформацію про повітряне судно. Мультисенсорний аналіз дозволяє виявляти безпілотні літальні апарати із високою точністю.

1.4 Системи нейтралізації дронів

Після виявлення та ідентифікації дрону необхідно вжити заходів щодо його нейтралізації. Для цього використовуються різні методи та технології.

Акустична система дозволяє викликати резонанс механічної частини бортового гіроскопа дрону при застосуванні звукової хвилі. Акустична система спрямовує звукову хвилю на ціль. Такі акустичні системи можуть бути встановлені на самих дронах, які автоматично наводяться на ціль звуку двигуна безпілотника. Гіроскоп є практично в кожному безпілотнику та відповідає за зміну положення дрону у просторі. Але, крім гіроскопа, для визначення

положення у просторі у дрону є ще магнітометр, тому тільки акустичній атаці буває недостатньо.

Лазерні системи нейтралізації – проводяться розробки та випробування з застосування лазерних установок.

За допомогою лазерів можна вивести з ладу сенсори в низькоенергетичному режимі або знищити ціль у високоенергетичному режимі.

Можливість швидко перенацілювати лазер має перевагу у застосуванні проти бойових безпілотників, коли дрони літають групою. Але використання лазера обмежено у застосуванні погодними умовами, дальністю дії та, саме головне, потрібно багато електроенергії.

Мікрохвильові системи (НВЧ) - системи, що використовують спрямоване НВЧ-випромінювання на ціль.

Системи РЕБ в даний час активно застосовуються і є найбільш поширеним засобом нейтралізації дронів та шкідливої електроніки. Система радіоелектронної боротьби є системою постановки перешкод. Радіогенератор перешкод дозволяє заглушити сигнали керування дроном, змусити його приземлитися, заглушити передачу фото-або відеоматеріалів від дрону до оператора, а також заглушити сигнали керування від оператора до дрону.

Хакінг дронів – методи злому дрону. Виділяють такі основні способи злому.

Отримання доступу до управління за рахунок злому шифрованого каналу зв'язку або заміни даних авторизації;

Хакінг дронів є інтелектуальними електронними спуфінг-атаками на навігаційну систему GPS. У ході спуфінг-атаки зацікавлена сторона посилає імітовані навігаційні сигнали на приймачі безпілотника, видаючи йому хибні навігаційні дані, які сприймаються як істинні. Обдурена ціль збивається з курсу і йде на хибну позицію. Очевидно, що за атаці безпілотників, що летять у групі, успіх акції зростає, тому що з ладу можуть вийти одразу кілька апаратів.

Активна протидія безпілотним літальним апаратам може здійснюватися за допомогою комплексів, які виявляють мету за допомогою радара, ведуть її за допомогою відео- та інфрачервоної камери, після чого спрямованим променем радіоперешкод виводять з ладу дрон або перехоплюють керування ним .

На сьогоднішній день нейтралізація безпілотників шляхом придушення радіоабо GPS-сигналу може спричинити його неконтрольоване падіння, що створює небезпеку для людей, що знаходяться внизу, і власності. Крім того, це може порушити роботу навколишнього комунікаційного та навігаційного обладнання. Отже такий метод протидії поки що має серйозні мінуси.

Менш технологічний підхід: нейтралізація низьколітаючих дронів може здійснюватися за допомогою пневмомережі (пневматична зброя), а нейтралізація високолітніх – за допомогою дрона-перехоплювача з розгорнутою мережею.

Ведуться перспективні розробки мобільних пневматичних гармат, що стріляють капсулами з мережею та парашутом: дрон, що потрапив у мережу, не падає, а плавно опускається на землю. Втім, законодавча база для активної протидії таким загрозам поки що належному рівні не опрацьовано.

Використання пневматичної чи стрілецької зброї проти майна, що знаходиться навіть безпосередньо над територією, що охороняється, вважається протиправним, оскільки повітряний простір не є приватним об'єктом власності.

У будь-якому випадку, майбутні системи активної протидії безпілотникам можуть бути ефективні лише у зв'язці з апаратурою дрон-детекції.

1.5 Висновки до розділу 1

Кожен безпілотний апарат має свою частоту та тип сигналу за коштами, яким провадиться управління. Якщо вдасться знайти спосіб швидко формувати подібний сигнал для управління літальним апаратом, то з більшою часткою

ймовірності можна буде сформувати сигналоподібну перешкоду і якщо не отримати безпілотник собі, то принаймні порушити систему його управління.

Розглянуто основні способи боротьби з безпілотними літальними апаратами. З наведених даних можна зробити висновок, що на даний момент не існує універсального способу боротьби з безпілотними літальними апаратами і кожен спосіб має свої переваги та недоліки.

2 ОЦІНКА МЕТОДИЧНИХ ПОХИБОК СТЕРЕОСКОПІЧНОГО МЕТОДА ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ

2.1 Потенційні можливості стереоскопічного метода вимірювання дальності

На рис. 2.1 наведено стереоскопічний спосіб вимірювання дальності, адаптований до вимірювальної системи.

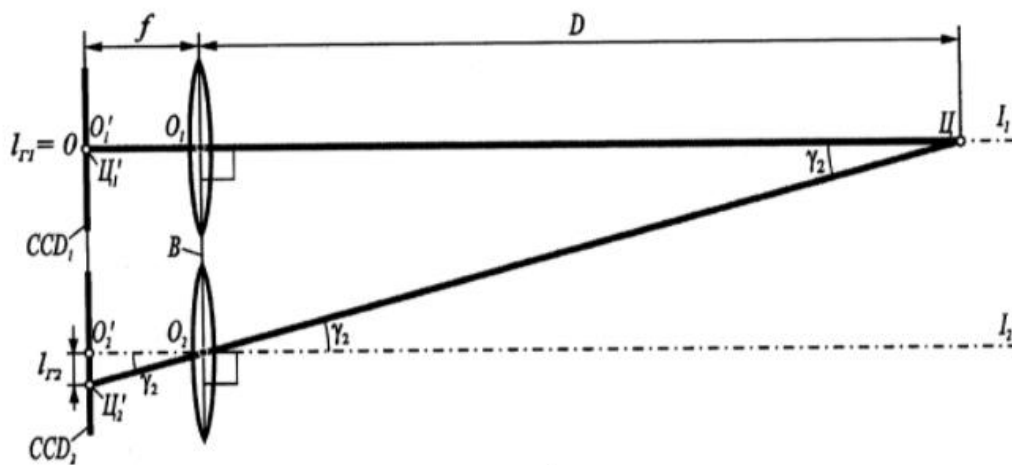


Рисунок 2.1 – Оптико-електронний стереоскопічний далекомір

Він складається із двох цифрових камер. На рис.2.1 є такі позначки:

- \mathcal{C} – об'єкт інтересу;
- $CCD1$ і $CCD2$ – матриці фоточутливих елементів роздільною здатністю $N \times M$ елементів, так як на сьогодні широке поширення отримали ПЗЗ-матриці, то далі за текстом $CCD1$ і $CCD2$ позиціонуватимуться як ПЗЗ-матриці;
- I_1, I_2 – основні оптичні осі об'єktiv IP камер;
- O_1, O_2 – оптичні центри об'єktivів;
- O'_1, O'_2 – геометричні центри матриць $CCD1$ та $CCD2$;
- $\mathcal{C}'_1, \mathcal{C}'_2$ – центри зображення об'єкта \mathcal{C} у полі матриць $CCD1$ і $CCD2$,
- B – база (базисна відстань), рівна відстані від точки O_1 до O_2 ;

– l_1, l_2 - горизонтальні відстані від центрів O_1, O_2 матриць $CCD1$ і $CCD2$ до зображень

– z_1, z_2 (приймемо $l_1, l_2 > 0$, якщо зображення z_1, z_2 розташовані вище геометричних центрів O_1, O_2 матриць $CCD1$ і $CCD2$, і $l_1, l_2 < 0$ - якщо нижче. та $CCD2$);

– $F_1 = F_2 = F$ – фокусні відстані об'єктивів рівні відповідно до відстаней O_1O_1' та O_2O_2' ; D – дальність до об'єкта інтересу (відстань від точки O_1 до точки z).

Дальність D до об'єкта z визначається за величинами паралаксу γ , бази приладу та фокусної відстані об'єктивів за наступною формулою

$$D = \frac{f_B}{\Delta l_\Gamma}, \quad (2.1)$$

де $\Delta l_\Gamma = l_1 - l_2$ – горизонтальне зміщення (різницю положень) зображень об'єкта інтересу z у полях матриць $CCD1$ і $CCD2$, оскільки величина Δl_Γ пропорційна паралактичному куту γ , то величину Δl_Γ іноді називають лінійним паралаксом.

Величина Δl у цифрових системах може бути знайдена як різниця зсувів $l_1 - l_2$, приведена до кількості пікселів ПЗС-матриці та їх лінійного розміру, тоді $\Delta l_\Gamma = l_P(n_1 - n_2)$, де l_P – лінійний розмір пікселя, n_1, n_2 – порядкові номери пікселів (номери стовпців), що відповідають положенню зображень на ПЗС-матрицях.

Як прототип обраний вимірник відстаней на основі цифрового фотоапарата, побудований за способом (Патент UA №2485443 С1, G01C 3/08, G01S 11/12, 2011 р.), що включає отримання двох цифрових зображень об'єкта з використанням двох фотокамер, рознесених на відому відстань. Дальність до об'єкта визначається зсувом між зображеннями по горизонтальній осі. Розмір скануючого вікна з зображенням об'єкта вибирають так, щоб різниця відстаней до окремих фрагментів об'єкта була меншою за інструментальну роздільну здатність по дальності. Здійснюють сканування по горизонталі та вертикалі, зсув між

зображеннями визначають за положенням максимального значення двовимірної нормованої кореляційної функції. Уточнюють положення максимуму кореляційної функції субпіксельному діапазоні і здійснюють локалізацію максимуму між вузлом сітки з найбільшим значенням кореляційної функції і його сусідніми вузлами. Визначають дальність та розміри об'єкта. Дальність до виділеної області об'єкта визначають з виразу, що враховує відхилення від горизонтальної лінії положення двох цифрових фотокамер

$$D = \frac{f_B}{\Delta l_\Gamma} \cos(\arctg \frac{\Delta l_\Gamma}{\Delta l_B}), \quad (2.2)$$

де B – відстань між точками фотографування в просторі,

F – фокусна відстань фотокамери,

Δl_Γ – зсув між зображеннями об'єкта по горизонтальній осі,

Δl_B – зсув між зображеннями об'єкта по вертикальній осі.

Недоліки прототипу пояснюються наступним чином. Аналіз виразів (2.1) і (2.2) показує, що для забезпечення працездатності пристрою вимірювання дальності, що реалізує стереоскопічний спосіб, необхідно, щоб у ньому були застосовані дві ідентичні камери, що накладає певні обмеження на технічну реалізацію, пов'язану з необхідністю підбору камер з однаковими технічними даними.

Якщо стереоскопічна система визначення дальності ідеально відкалібрована у площині вимірів, тобто. забезпечена строга паралельність оптичних осей камер, які входять до складу вимірювальної системи, що практично забезпечити дуже складно, то робочу зону, тобто. зону перетину полів зорів використовуваних камер, як показано на геометричній моделі, представленій на рис. 2.2 умовно можна представити у вигляді сукупності чотирикутників утворених при перетині полів зору окремих елементів фото-

чутливого приймача високої роздільної здатності, наприклад пікселів ПЗС-матриць.

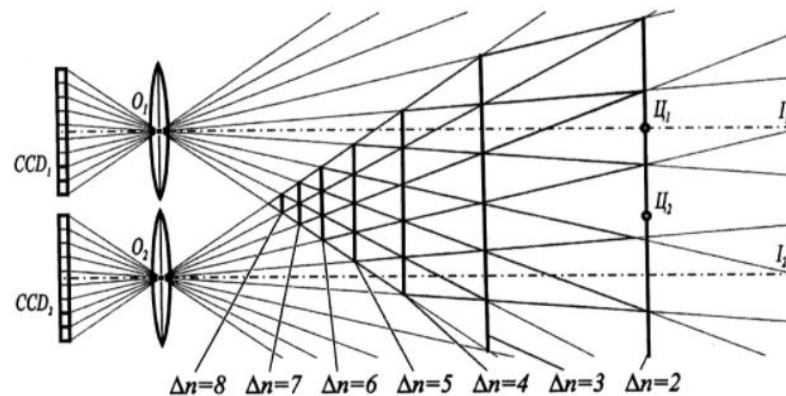


Рисунок 2.2 – Геометрична модель перетину полів зорів використовуваних камер

На рис 2.2 ПЗС-матриці *CCD1* і *CCD2* для наочності представлені дев'ять пікселів. Розміри чотирикутників визначають величину помилки визначення дальності вимірювальної системи. У той же час, як впливає з виразів (2.1) і (2.2), у межах робочої зони можна відобразити лінії рівних зсувів, тобто. ліній при знаходженні в будь-якій з точок яких об'єкта, до якого визначається дальність, зсув Δl буде незмінним. Так, наприклад, як показано на рис. 2.2, при знаходженні об'єкта інтересу в будь-якій з точок, що належать лінії $n=2$, наприклад у точках *Ц1* і *Ц2*, зміщення зображень завжди буде дорівнює двом лінійним розмірам пікселя. З цього випливає, що дальність до об'єкта визначається як відстань перпендикуляра від базової лінії *O1O2*. Ця умова завжди необхідно враховувати, особливо в тих випадках, коли вимірювання дальності проводиться до різних об'єктів щодо однієї точки на місцевості, де встановлено вимірювальна система. Щоб не проводити зайвих математичних перетворень з отриманими значеннями дальностей, вимірювальну систему необхідно наводити на об'єкт інтересу, так щоб він знаходився принаймні поблизу оптичних ліній *I1*, *I2* об'єктивів вимірювальної системи, що знижує зручність користування та збільшує час на процес вимірювання дальності, особливо в тих випадках, коли об'єктів інтересу дещо і всі вони розташовані у різних галузях поля зору.

Зрозуміло, що у тих випадках, коли метою ставиться проведення вимірювань дальності до різних об'єктів щодо однієї точки на місцевості, в якій і встановлено вимірювальну систему, зручніше користуватися системою, яка не вимагає зміни її положення у просторі після кожного з вимірювань, що, у свою чергу, призведе до скорочення сумарного часу попри всі виміри. Ця обставина ілюструється на рис. 2.3, де показані дві відеокамери, поля їх зору, робоча зона, утворена перетином полів зору обох камер, об'єкти інтересу $Ц1$, $Ц2$ і $Ц3$. Видно, якщо вимірювальна система не наводиться на об'єкти $Ц1$, $Ц2$ і $Ц3$, то дальності до цих об'єктів щодо базової лінії, відповідно, будуть рівні $D1$, $D2$ і $D3$, а щодо місця розташування вимірювальної системи, в даному випадку збігається з оптичним центром об'єктива $O1$ лівої камери, дальності становитимуть $D'1$, $D'2$ та $D'3$, і що тільки для об'єкта $Ц1$, що знаходиться на оптичній осі об'єктива лівої камери виконається умова $D'1=D1$.

Крім перелічених недоліків, стереоскопічна система визначення дальності, що реалізує стереоскопічний базовий спосіб за формулами (2.1) або (2.2), має той недолік, що при невиконанні умови паралельності оптичних осей об'єктивів використовуваних камер лінії з однаковими зсувами набувають вигляду близького до дуги (рис. 2.4), що призводить до неоднозначності у визначенні дальності щодо базової лінії $O1O2$ та виникнення помилок. При цьому помилка у визначенні дальності буде тим більшою, чим більше порушено умову паралельності оптичних осей. Так, з геометричної моделі, представленої на рис. 2.4, видно, що і до об'єкта $Ц1$ і до об'єкта $Ц2$ дальності щодо базової лінії $O1O2$ складуть $D1$, $D2$, при цьому $D1 \neq D2$, хоча з виразів (2.1) або (2.2) випливає, що дальності $D1$ і $D2$ повинні бути рівні, так як об'єкти $Ц1$ і $Ц2$ знаходяться на лінії з однаковими усуненнями зображень у всіх її точках.

Для усунення цього недоліку камери перед початком роботи орієнтують (калібрують вимірювальну систему) до усунення непаралельності оптичних осей, що потребує часу та знижує зручність користування вимірювальною системою. Крім цього, на вимірювальну систему може впливати навколишнє середовище,

наприклад, температура та вологість, які можуть вплинути на форму бази та призвести до порушення паралельності оптичних осей камер.

Стереоскопічна система визначення дальності, що реалізує стереоскопічний спосіб за формулами (2.1) або (2.2) має мінімальну та максимальну дальності роботи в межах яких можливе визначення відстаней до об'єктів, наприклад, на Рисунку 2 мінімальної дальності відповідає відстань до об'єкта, що визначається за максимально можливим зміщенням зображень, буде відповідати положенню лінії $n=8$, а максимальна дальність - мінімально можливому зсуву зображень – $n=0$ (на рис. 2.2 не показано). Збільшення максимальної дальності роботи можна забезпечити рахунок збільшення бази, фокусних відстаней об'єктивів чи зменшення лінійних розмірів пікселів. Однак це призведе до збільшення мінімальної дальності роботи. І навпаки, зменшення мінімальної дальності роботи призведе до зменшення та максимальної дальності роботи. Зміна параметрів робочої зони, а саме її ширини, мінімального та максимальної відстані об'єкта від вимірювальної системи, в межах яких можливе визначення дальності, залежно від розв'язуваних завдань та умов застосування без зміни бази та характеристик застосовуваних камер, можна вирішити за рахунок зміни орієнтації камер площині вимірювань, що, своєю чергою, призведе до неправильного визначення дальності, як було показано вище. Завдання, на вирішення яких направлено заявлене технічне рішення, полягають у розширенні арсеналу технічних засобів у цій галузі, а також:

По-перше, у забезпеченні вимірювання дальності до об'єктів в умовах непаралельності оптичних осей лівої та правої камер. Це завдання досягається компенсацією зсувів зображень об'єктів на зображеннях лівої та правої камер на величини горизонтальних кутів, що визначають кутове положення оптичних осей об'єктивів застосовуваних камер, за такими виразами

$$I'_{r1} = F_2 \frac{I'_{r2} - F_2 \operatorname{tga}_1}{F_2 + I'_{r1} \operatorname{tga}_1}, \quad (2.3)$$

де I'_{r1}, I'_{r2} – скомпенсовані значення горизонтальних зсувів об'єктів, до яких вимірюється дальність щодо центрів зображень, отриманих з лівої та правої камер;

$\alpha 1, \alpha 2$ – кути в горизонтальній площині, під якими оптичні осі лівої та правої камер знаходяться до нормалі до базової лінії у точках оптичних центрів лівої та правої камер.

Технічним результатом є можливість зміни параметрів робочої зони, а саме, її ширини, мінімального та максимального відстояння об'єктів від далекоміра, в межах яких можливе визначення дальностей, залежно від розв'язуваних завдань та умов застосування без зміни технічних даних використовуваних камер шляхом розміщення лівої та правої камер на незалежних карданових підвісах, що забезпечують зміну взаємного кутового становища цих камер.

По-друге, у реалізації виміру дальностей до всіх об'єктів незалежно від їхнього розташування в робочій зоні як визначення довжин відрізків, що з'єднують оптичний центр об'єктива лівої камери з відповідним об'єктом. Це завдання при вимірюванні дальності досягається обліком скомпенсованих значень вертикального та горизонтального кутів щодо оптичної осі, під якими зображення від об'єктів потрапляють до об'єктиву лівої камери.

$$\gamma'_{1} = \text{Arctg}\left(\frac{I'_{r1} - F_1 \text{tg} \alpha_1}{F_1 + I'_{r1} \text{tg} \alpha_1}\right), \quad (2.4)$$

$$\delta'_{1} = \text{arctg}\left(\frac{I'_{B1} - F_1 \text{tg} \beta_1}{F_1 + I'_{B1} \text{tg} \beta_1}\right). \quad (2.5)$$

де $\beta 1$ – кут вертикальної площині, під яким оптична вісь лівої камери знаходиться до нормалі до базової лінії в точці оптичного центру в площині вимірювань;

$\gamma' 1$ – скомпенсоване на величину кута $\alpha 1$ значення горизонтального кута $\gamma 1$, під яким зображення від об'єкта потрапляє до об'єктиву лівої камери щодо його оптичної осі $\Pi 1$;

$\delta'1$ – скомпенсоване на величину кута $\beta1$ значення вертикального кута $\delta1$, під яким зображення від об'єкта потрапляє до об'єктиву лівої камери щодо його оптичної осі Π .

Технічним результатом, у разі, є зменшення сумарного часу на вимірювання дальностей до об'єктів, що у робочій зоні, з допомогою відсутності необхідності послідовного наведення оптичних осей далекоміра ці об'єкти.

По-третє, у забезпеченні вимірювання дальностей до об'єктів, коли ліва та права камери мають як однакові, так і різні технічні дані, а саме фокусні відстані об'єктивів та параметри фоточутливих приймачів високої роздільної здатності. Це завдання досягається врахуванням лінійних розмірів елементів фоточутливих приймачів високої роздільної здатності окремо для лівої та правої камер і тим, що при обчисленні дальностей застосовується вираз, що враховує фокусні відстані об'єктивів лівої та правої камер

$$D = \frac{f_1 f_2}{\cos \gamma'_1 \cos \delta'_1 (f_1 l'_{r2} - f_2 l'_{r1})} B, \quad (2.6)$$

де f_1 та f_2 – відповідно фокусні відстані об'єктивів лівої та правої камер;
 B – базисна відстань далекоміра.

Технічним результатом є спрощення технічної реалізації далекоміра, що полягає у відсутності необхідності здійснення підбору за технічними даними двох ідентичних камер.

По-четверте, в автоматичному визначенні взаємного кутового положення лівої та правої камер у просторі. Дана задача досягається застосуванням у складі карданових підвісів лівої та правої камер датчиків горизонтальних та вертикальних кутів, а також наявністю у складі обробної системи модуля калібрування за калібрувальним шаблоном з відомими розмірами.

У цьому випадку технічним результатом є зменшення часу на попереднє налаштування далекоміра за рахунок відсутності необхідності приведення оптичних осей об'єктивів правої та лівої камер до паралельного стану у просторі.

Отримані залежності дозволяють зробити висновки про вибір параметрів системи СВС для малих БПЛА.

2.2 Висновки по розділу 2

З отриманих залежностей можна зробити висновок про те, що в системі СВС принципово можна досягнути досить високої точності дальнометрії. Цікавим є факт, що від вимірюваної відстані залежить не тільки абсолютна, але й відносна помилка вимірювання дальності. Вона зростає майже лінійно зі зростанням вимірюваної величини дальності.

При фокусній відстані $F=100$ мм та базах $B=0,5$ м і $B=1$ м відносна помилка вимірювання дальності не перевищує 5% і 10% відповідно. Це робить систему СВС придатною для вимірювання координат в системі виявлення БПЛА.

В той же час, при неправильному виборі параметрів системи – бази, фокусної відстані, просторової роздільної здатності – значення помилки вимірювання дальності різко зростає. Воно може досягати десятків і сотень відсотків. Особливо помітний вплив фокусної відстані. При намаганні отримати широкий кут огляду системи шляхом зменшення фокусної відстані об'єктивів при незмінній роздільній здатності матриць можна спостерігати різке зростання помилки вимірювання при $F < 10$ мм. Це слід враховувати при проектуванні систем СВС малих БПЛА.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО МАЛИХ БПЛА ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ СТЕРЕОВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ

3.1 Експериментальна установка стереовідеоспостереження

Експериментальна установка побудована на базі двох IP камер Hikvision DS-2CD2643G0-IZS. Камера має такі технічні характеристики:

- тип світлочутливої матриці – CMOS;
- роздільна здатність матриці – 4 Мп (2688 x 1520);
- діагональ матриці – 1/3 дюйма;
- чутливість (мінімальна освітленість) – 0,3 лк при F1,4 витримка 1/30 с, колір, ІЧ підсвітка виключена;
- фокусна відстань 2.8...12 мм
- кути огляду – горизонтальний 98 ° -28 °;
- оптичне збільшення (Zoom) – 16x;
- підтримувані горизонтальні розрізнення 2688, 2560, 2304, 1920, 1280, 1280, 704, 640, 352;
- відеокодеки H.265, H.264;
- максимальні бітрейти: H.264 – 10240 кбіт/с; H.265 – 8448 кбіт/с.

Зовнішній вигляд камери показаний на рис. 3.1



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд відеокамери

Камери мали можливість рознесення по горизонталі на величину бази $B=0,5$ м; 1 м.

Відеокамери підключалися по LAN інтерфейсу до мережного роутера, а потім через WAN інтерфейс – до ноутбука з програмним забезпеченням Smart PSS для запису відеопотоків з відеокамер. Системні годинники відеокамер і ноутбука попередньо програмно синхронізувалися. Початок і кінець процесів відеозапису проводилися шляхом одночасної подачі сигналу "тривоги" на обидві відеокамери.

Горизонтальне поле зору обох камер через веб-інтерфейс встановлювалося однаковим. У веб-інтерфейсі камери Hikvision відображається, на жаль, не значення фокусної відстані або куту огляду, а деякі умовні одиниці Zoom (рис.3.2).

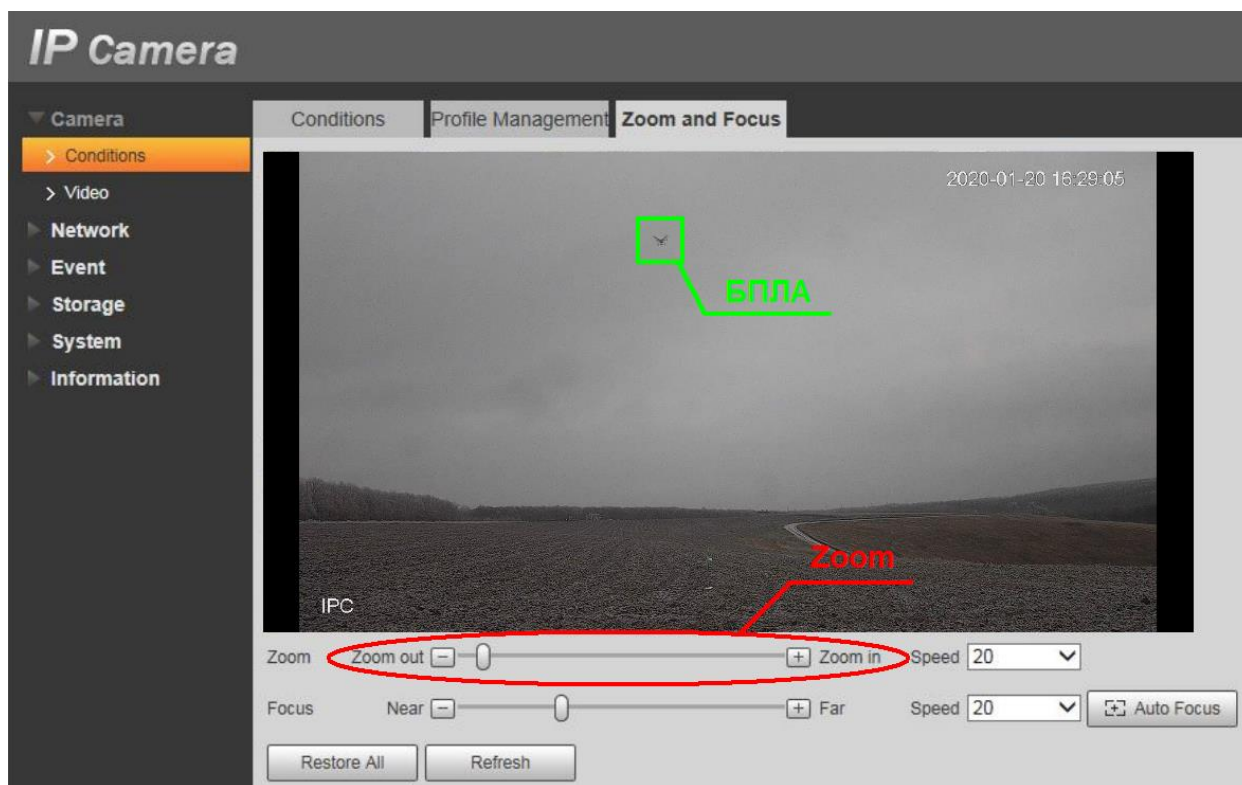


Рисунок 3.2 – Веб-інтерфейс IP камери

Для точного контролю горизонтального кута огляду FOV і еквівалентної фокусної відстані була проведена попередня калібровка відеокамери за допомогою мірної таблиці.

Схема експерименту з калібровки наведена на рис. 3.3.

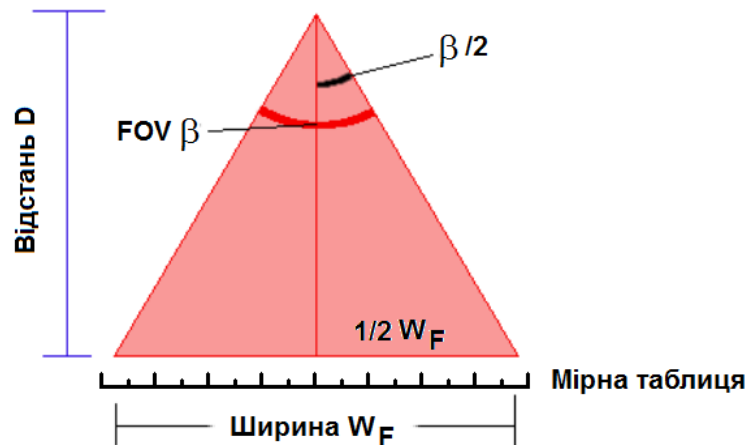


Рисунок 3.3 – Схема експерименту з калібровки горизонтального поля зору камери

Спеціальна мірна таблиця з відмітками ширини була встановлена на відстані $D=1$ м перпендикулярно оптичній осі камери. За результатами вимірювання ширини охопленої області W_F для кожного значення показника Zoom (рис. 3.2) було розраховане значення горизонтального кута огляду FOV

$$\beta = 2\arctan\left(\frac{D}{2W_F}\right). \quad (3.1)$$

Фокусна відстань розраховувалася за виразом

$$F = D \frac{DW_F}{W}, \quad (3.2)$$

де W – ширина світлочутливої матриці.

Оскільки з технічних параметрів нам відома діагональ матриці d і відношення сторін W/H , то можна знайти фізичну ширину матриці виходячи з таких співвідношень

$$d = \sqrt{W^2 + H^2}, \quad (3.3)$$

$$W/H = 16/9. \quad (3.4)$$

Виражаючи з (3.4) $H = 9W/16$ і підставляючи в (3.3), отримаємо

$$d = \sqrt{W^2 + (9/16)^2 W^2} = W \sqrt{1 + (9/16)^2} \approx 1,147 \times W. \quad (3.5)$$

Тоді:

$$W = \frac{d}{1,147} \approx 0,87d \quad (3.6)$$

Тобто, при діагоналі матриці $d = (1/3)$ її ширина складе

$$W = 0,87 \cdot (1/3) \cdot 25,4 = 7,37 \text{ мм.}$$

На рис.3.4 показаний графік залежності величини горизонтального кута огляду FOV від значення умовного параметра Zoom у веб-інтерфейсі камери, Результати яких ми отримали у ході проведеного експерименту калібровки.

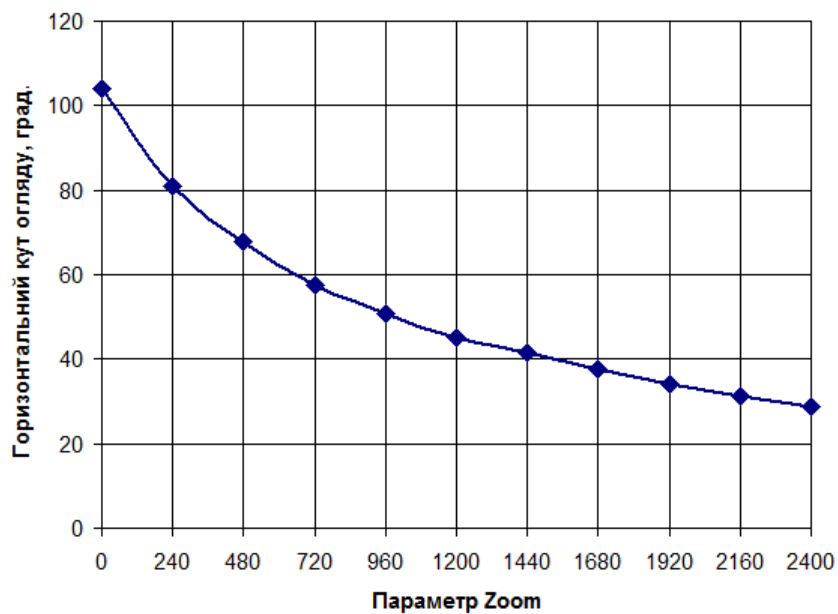


Рисунок 3.4 – Графік залежності величини горизонтального кута огляду FOV від значення умовного параметра Zoom

На рис.3.5 зображено графік залежності величини фокусної відстані від значення умовного параметра Zoom.

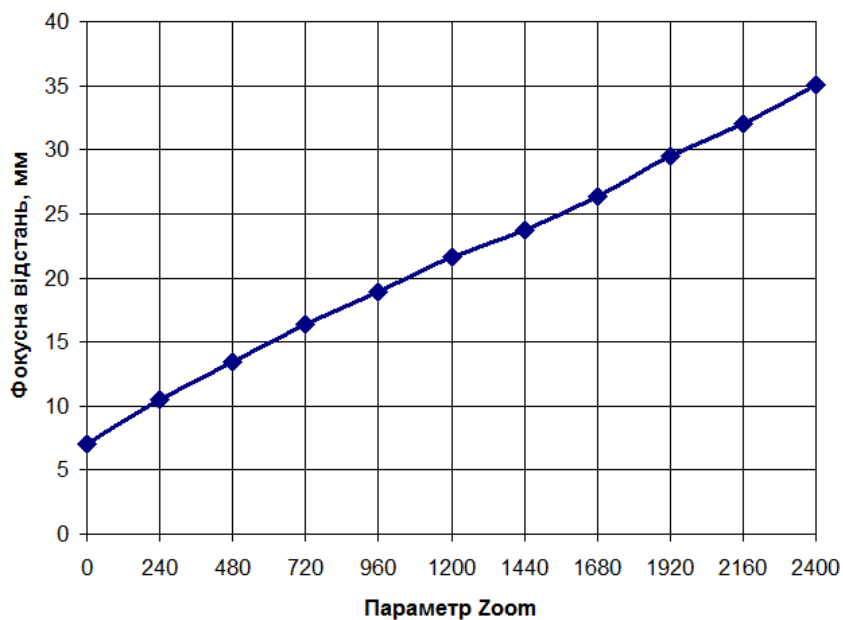


Рисунок 3.5 – Графік залежності величини фокусної відстані від значення умовного параметра Zoom

IP камери підключалися по LAN інтерфейсу до мережевого роутера TP-Link TL-WR841N, а потім по WAN інтерфейсу – до ноутбука с програмним забезпеченням Smart PSS для запису цифрових відеопотоків з відеокамер. Системні годинники IP камер і ноутбука було попередньо програмно синхронізовано. Старт і закінчення процесів запису проводилися шляхом одночасної подачі апаратного сигналу "тривоги" на обидві камери.

Структурна схема експериментальної установки показана на рис. 3.6, а зовнішній вигляд – на рис.3.7.

Схема стереоскопічної системи і розрахункова формула (2.2) передбачають, що оптичні осі об'єктивів паралельні і фотоприймальні матриці знаходяться на одній прямій, паралельній осі x . Однак у реальній експериментальній установці це реалізувати достатньо важко.

Ще одне джерело помилок вимірювання є спотворення об'єктивів камер, головним чином – дисторсія. У цьому випадку коефіцієнт лінійного збільшення змінюється по полю зору об'єктива, порушуючи геометричну подібність між об'єктом і його зображенням.

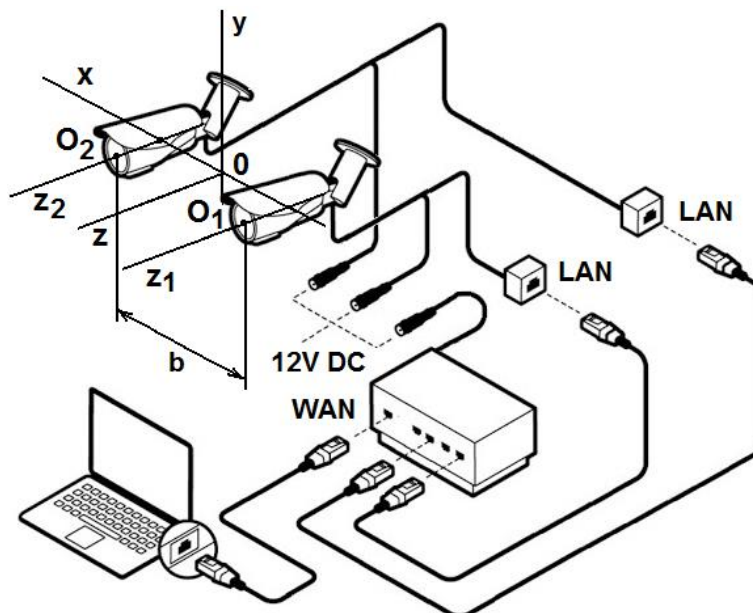


Рисунок 3.6 – Структурна схема експериментальної установки



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд експериментальної установки

3.2 Калібрування установки і оцінка експериментальних похибок

Калібрування являє собою процес співвідношення ідеальної моделі камери з фактичним фізичним пристроєм та визначення положення та орієнтації камери щодо системи координат захватного пристрою.

Кути α_1 , α_2 і β_1 , β_2 , фокусні відстані об'єктивів і визначають для лівої і правої камер шляхом захоплення калібрувального зображення. Наприклад, модуль калібрування використовує алгоритм розпізнавання образів виявлення на зображенні відомого геометричного шаблону калібрувального зображення.

Кути відхилення оптичних осей камер і фокусні відстані їх об'єктивів, отримані в процесі калібрування, порівнюються з відповідними кутами, отриманими з датчиків кута повороту рам підвісу і власними даними, якщо є розбіжність, то у пам'яті даних калібрування зберігаються поправки.

Калібрування виконують під час завершальних етапів процесу виготовлення захватного пристрою, наприклад, після його збирання та

перевірки працездатності. Додатково калібрування виконують безпосередньо перед захопленням зображень конкретного об'єкта, дальність якого необхідно отримати в умовах навколишнього середовища, які можуть вплинути на форму захватного пристрою (наприклад, через скорочення або розширення матеріалів) і, відповідно, на розташування камер відносно захватного пристрою.

Модуль інтерфейсу користувача виконаний з можливістю створення форми 52 управління зображенням для відображення через дисплей 23 і містить модулі, що дозволяють користувачеві 3 через пристрій 22 управління і введення даних взаємодіяти з вимірювальним додатком 25.

Виготовлена калібрувальна таблиця являла собою фанерний щит з наклеєною на нього калібрувальної сіткою у вигляді шахового поля з кількістю квадратів 10 x 7 (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Калібрувальна таблиця

Калібрувальне зображення складається з чорно-білих квадратів, що чергуються, або прямокутників, розташованих на площині на зразок шахівниці. Розміри індивідуальних шаблонів перевірок відомі. Наприклад, для визначення геометричних центрів кожного квадрата на калібрувальному зображенні та побудови ліній, що проходять через ці центри, використовують технології

обробки зображення. Якщо дані лінії не є паралельними прямими, тобто присутні перспектива зображення, то може бути виведена формула для їх коригування та використання після усунення спотворень зображення. В результаті ця формула може бути використана для формування таблиці перетворення світових прямих ліній у прямі лінії зображення. Ця формула являє собою ряд векторів, скалярні значення яких являють собою дисторсію об'єктива та розбіжність центру оптичної осі площини зображення, який називається головною точкою, з механічною віссю площини зображення. Два кути вздовж будь-якого краю квадрата на калібрувальному шаблоні відповідають пікселям, що представляють ці кути на площині зображення. Однорідні вектори, спрямовані від датчика зображення, перетинаються у фокусі та проходять через кути квадрата, розміри якого відомі. Фокусну відстань об'єктивів визначають за висотою трикутника, сформованого цими двома лініями, від площини зображення до калібрувального шаблону. (рис. 3.9).

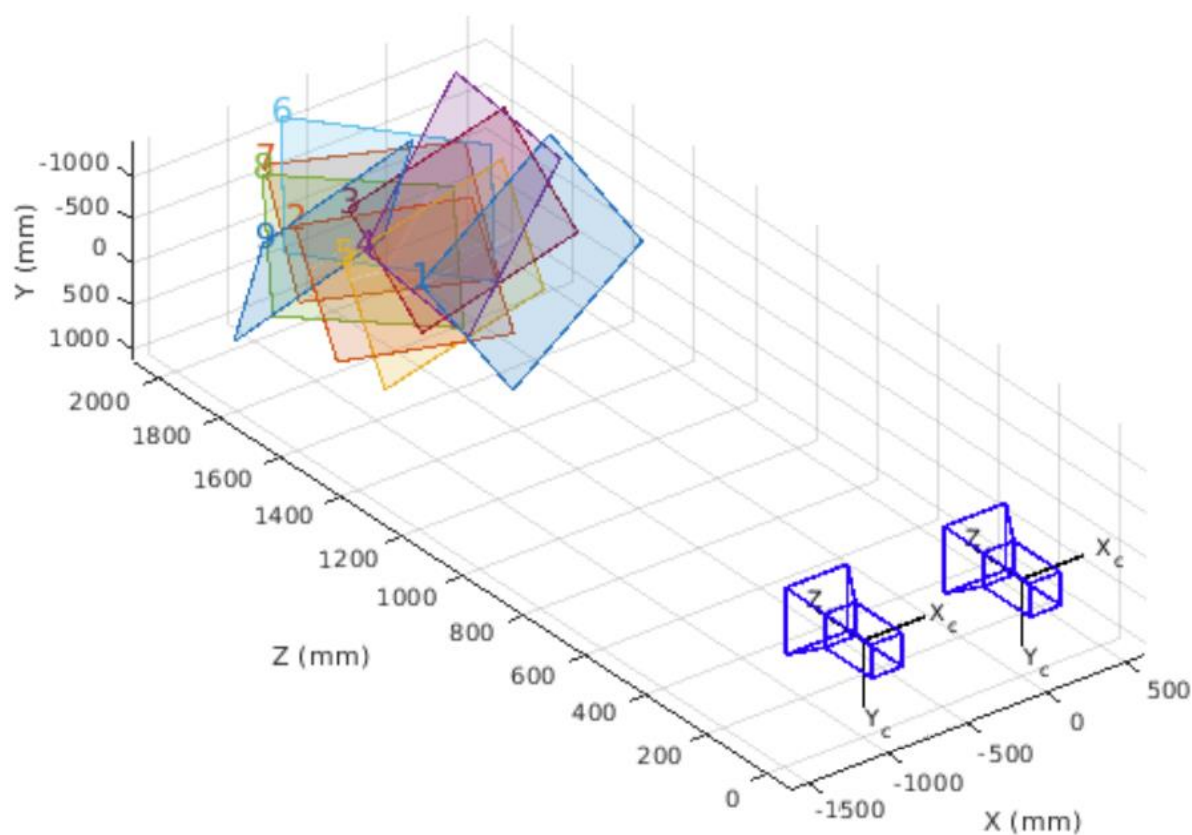


Рисунок 3.9 – Візуалізація процесу калібрування камер

Для відеопотоків IP камер при цьому встановлювалося мінімальне стиснення. Приклад одного такого зображення зі знайденими калібрувальними точками показаний на рис. 3.10.

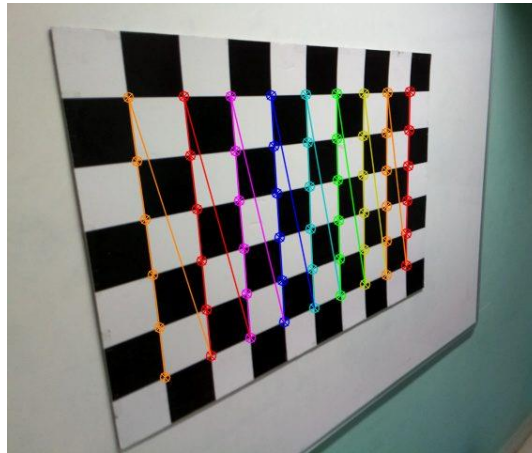


Рисунок 3.10 – Приклад зображення калібрувальної таблиці зі знайденими калібрувальними точками

Оцінка похибки калібрування проводилася при фіксованому значенні бази $B=1$ м (рис. 3.10).

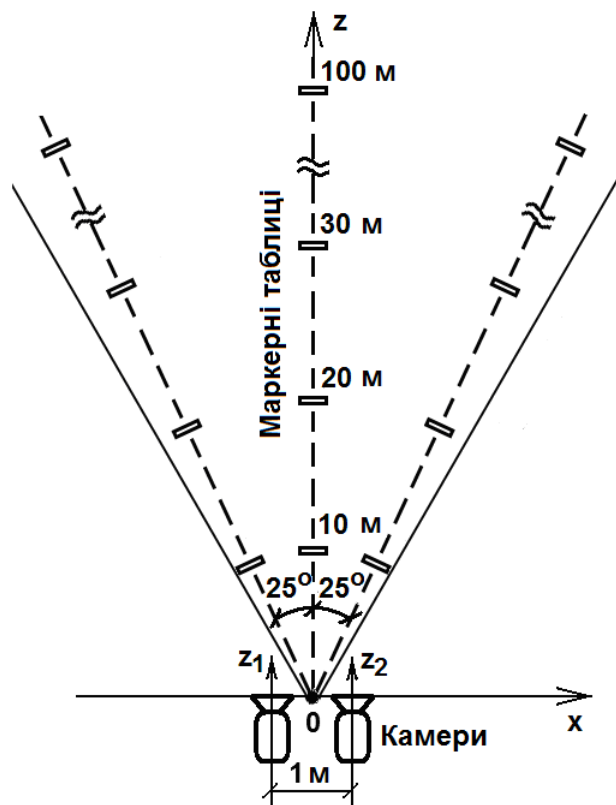


Рисунок 3.10 – До оцінки похибок системи СВС

Маркер дальності встановлювався вздовж осі z при $y=0$ (по осі системи) і по осях, відхилених від осі z на $\pm 25^\circ$. Діапазон дальностей до маркера від 5 м до 100 м, крок – 5 м

Відстані від центру системи СВС до маркера були виміряні за допомогою лазерного далекоміра Bosh GLM 250 з типовою точністю вимірювань ± 1 мм (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд лазерного далекоміра Bosh GLM 250

Маркер представляв собою таблицю, виготовлену аналогічно калібрувальної, але із зображенням хреста в центрі. Визначення точки перетину ліній хреста на зображенні проводилося в автоматичному режимі. На кожній відстані проводилося 10 вимірювань дальності по 10 довільним парам кадрів системи СВС.

Визначення дальності здійснювалося по формулі (2.2), приведеної до виду, куди замість фокусної відстані F і кроку пікселів I_p входять кут огляду β і роздільна здатність по горизонталі N світлочутливої матриці. Фокусну відстань F можна виразити через кут огляду β камери

$$F = \frac{W}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}, \quad (3.10),$$

де W – ширина світлочутливої матриці.

Підставляючи (3.10) в вираз (2.2) і враховуючи, що $W/l_p = N$, отримуємо

$$D = \frac{bM_x}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)[n_{2x} - n_{1x}]}. \quad (3.11)$$

Результати випробувань відкаліброваної установки СВС з визначенням дальності за виразом (3.11) показані на рис. 3.12.

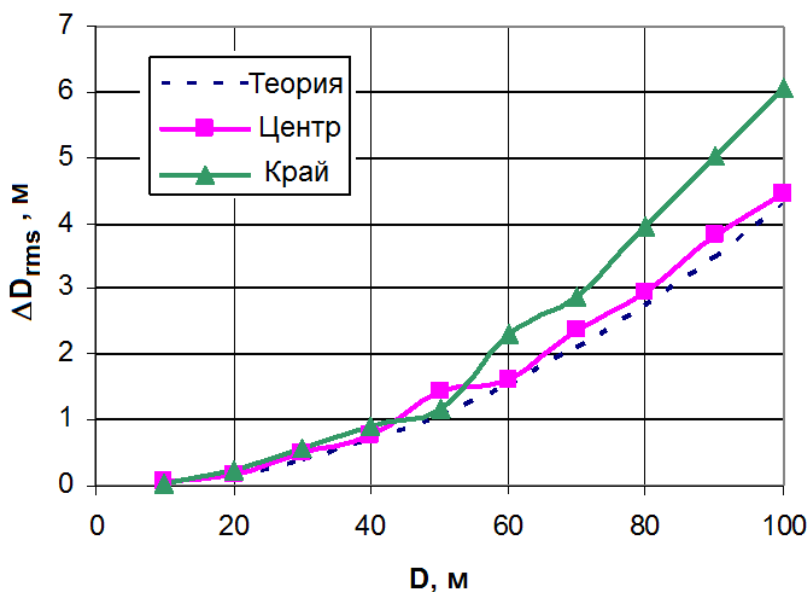


Рисунок 3.12 – Результати випробувань відкаліброваної установки СВС

Для кожної відстані наведені значення середньоквадратичної (по 10 вимірюванням) помилки вимірювання дальності. Пунктирною лінією показані значення максимальної абсолютної помилки визначення дальності, розраховані за формулою (2.15), яка враховує роздільну здатність системи СВС.

Вхідні у формулу (2.15) величини, що відповідають умовам експерименту:

- $F = 6,38$ мм з урахуванням $\beta = 60^\circ$ і діагоналі матриці $d = (1/3)''$,
- $l_p = 2,74$ мкм при горизонтальному розрізненні $N = 2688$.

Як впливає з отриманих даних рис. 3.12, експериментальна помилка вимірювання дальности не перевищує 4,5% по центру і 6% по краях горизонтального поля спостереження.

3.3 Опис експерименту з визначення координат БПЛА

Експеримент з вимірювання координат БПЛА за допомогою системи СВС проводився в польових умовах в Харківській області, Україна. Місце проведення експерименту на Гугл-мапі показано на рис. 3.13.



Рисунок 3.13 – Місце проведення експерименту на Гугл-мапі

Вимірювання здійснювалися 20.01.2021 року з 14.00 до 16.00 в похмуру погоду. Освітленість на вертикальній площині становила 450...650 лк. Вимірювання освітленості проводилося люксометром Wintact WT81 (рис. 3.13).



Рисунок 3.14 – Зовнішній вигляд люксметра Wintact WT81

На рис. 3.15 показане розташування експериментальної установки СВС при проведенні експерименту.

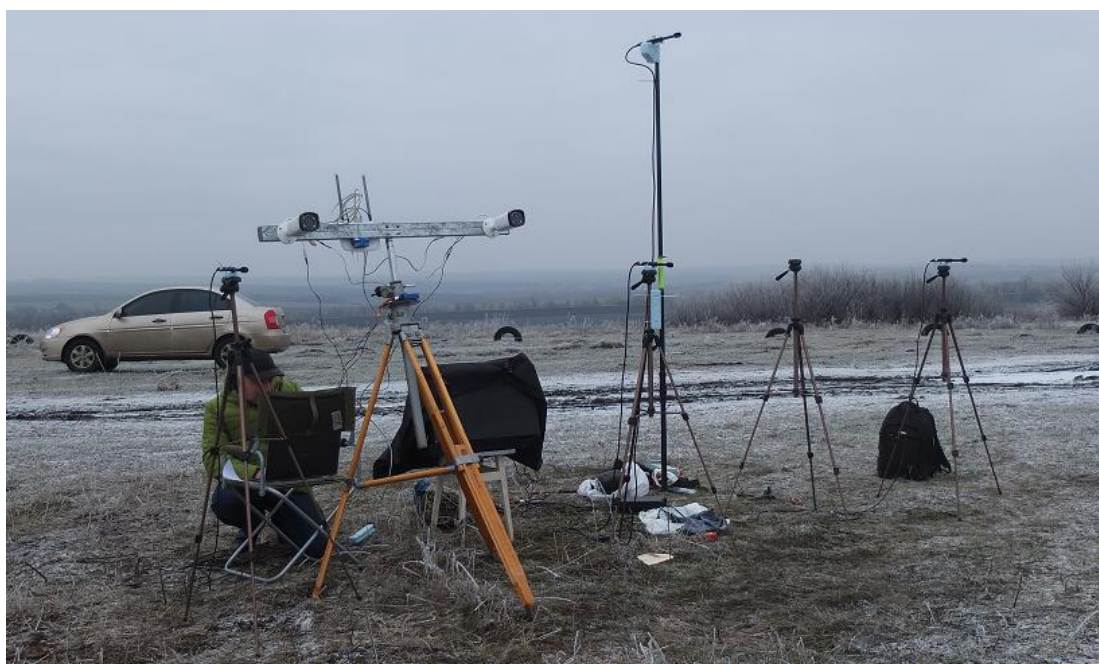


Рисунок 3.15 – Розташування експериментальної установки СВС при проведенні експерименту

В експерименті використовувався квадрокоптер DJI Phantom 3 SE з горизонтальним розміром 0,35 м (рис.3.15).



Рисунок 3.15 – Зовнішній вигляд квадрокоптера DJI Phantom 3 SE

Тестові польоти відбувалися на відстані до 200 м.

Координати квадрокоптера (широта, довгота і висота), отримані стандартним GPS приймачем квадрокоптера, використовувалися для порівняння з координатами БПЛА, отриманими за допомогою системи СВС. Для цього географічні координати квадрокоптера перетворювалися в декартові, а потім шляхом повороту і зсуву осі координат поєднуювалися з системою координат системи СВС.

Місцезнаходження квадрокоптера описується відносно початку відліку в декартових координатах.

У атестаційній роботі оброблені результати вимірювань за двома тестовими польотами БПЛА:

- трек 1 (рис.3.16) – проліт уздовж осі з зависанням на висоті 5 м над точками, віддаленими на 3 м, 25 м, 50 м, 100 м, 150 м, 200 м.

- трек 2 (рис.3.17) – підіймана спіраль з діаметром витка 50 м на висоту 30 м з центром, віддаленим по осі z на 100 м, 3 витка.

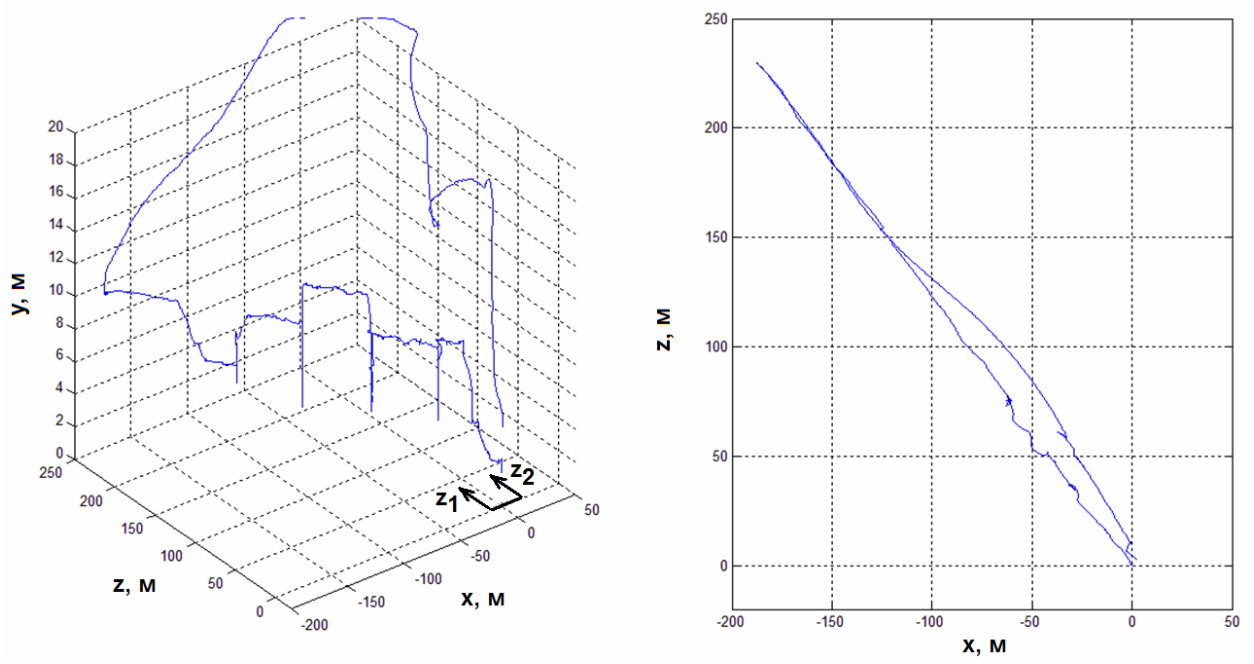


Рисунок 3.16 – Логи GPS для польота БПЛА по треку 1

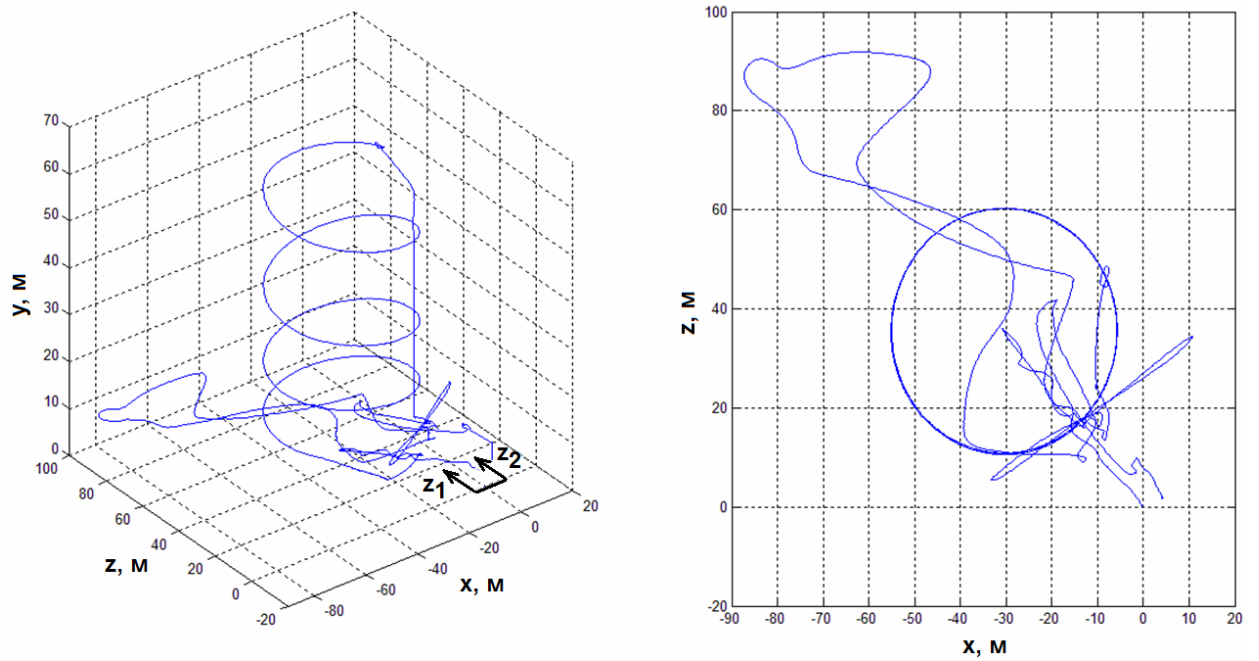


Рисунок 3.17 – Логи GPS для польоту БПЛА по треку 2

3.4 Алгоритм обробки стереозображень і результати експериментів з визначення координат БПЛА

Алгоритм обробки зображень системи СВС для виявлення і розпізнавання БПЛА докладно описаний в роботах співробітників кафедри МІРЕС ХНУРЕ [34, 38]. Він включає в себе наступні етапи:

- перетворення кольорового зображення в відтінки сірого і виконання нормалізації його яскравості для зменшення впливу змін інтенсивності освітлення;
- виділення рухомих фрагментів зображення в поточному відеокадрі на нерухомому фоні методом MOG, MOG2 або KNN;
- застосування до всіх фрагментів зображення, в яких виявлено рух, алгоритму історії руху для зменшення кількості помилкових тривог;
- розпізнавання зображення БПЛА за допомогою нейронної мережі.

Даний алгоритм дозволяє виявляти і розпізнавати БПЛА при мінімальному розмірі зображення 5x5 пікселів з імовірністю більше 90%. При розрізненні відеокамери 2688x1520 відстань до квадрокоптера DJI Phantom 3 SE, при якому розмір його зображенні дорівнює 5x5 пікселів, становитиме 166 м. Це максимальна дальність системи СВС, обмежена надійністю виявлення і розпізнавання БПЛА.

В оптичному каналі для збільшення надійності виявлення об'єктів запропоновано і обґрунтовано застосування датчиків денного, нічного та теплового бачення. Усі вони мають чутливі матриці високого розрізнення. Розроблений метод стереовідеоспостереження (СВС), що базується на вимірюванні лінійних паралаксів зображення об'єктів на матрицях, дозволяє використовувати один алгоритм обробки сигналів для усіх трьох датчиків (камер). При цьому забезпечується визначення дальності при експериментальних дослідженнях з середньоквадратичною похибкою не більш

(10...12)%, кутових координат рухомого об'єкта – з розрахунковою похибкою 1,3 мрад.

Алгоритм обробки зображень для пеленгації і визначення дальності до БПЛА показаний на рис. 3.18.



Рисунок 3.18 – Алгоритм обробки сигналів для визначення координат БПЛА

В якості сполучених точок зображення БПЛА використовувалися координати центру області $V(x, y)$, виділеної на етапі виявлення і розпізнавання (рис. 3.19).

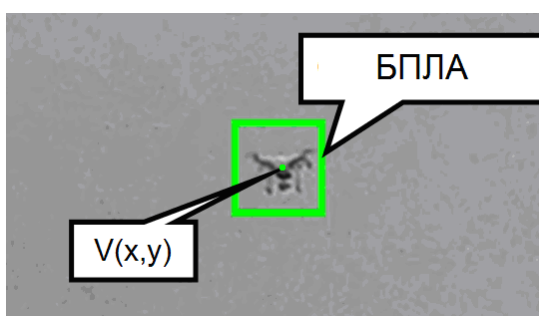


Рисунок 3.19 – Знаходження координат БПЛА на зображенні

Азимут і кут місця БПЛА обчислювалися як

$$\varphi_{az} = \frac{\beta \cdot x}{N_x}, \varphi_{el} = \frac{\beta \cdot y}{k \cdot N_y}, \quad (3.12)$$

де N_x, N_y – роздільні здатності камери по горизонталі і вертикалі,
 k – формат кадру (16/9).

Результуючі значення азимута і кута місця обчислювалися як середнє по результатам вимірювань двома камерами.

На рис. 3.20 і рис. 3.21 показані результати порівняння GPS координат БПЛА і результатів вимірювань системи СВС.

Рис. 3.20 відповідає треку 1, рис. 3.21 – треку 2. Графіки побудовані в координатах: а – азимут-час; б – кут місця - час; в – дальність - час.

Аналізуючи графіки на рис. 3.20 і рис. 3.21 можна відзначити, що вимірювання азимута і кута місця БПЛА системою СВС точно збігаються з даними GPS приймача. Це пояснюється високою роздільною здатністю камер і досить точним калібруванням їх внутрішніх параметрів.

Для вимірювань по треку 1 середньоквадратичне відхилення відносної помилки вимірювання дальності склало $\Delta D_{rms} = 9,6\%$, максимальна відносна помилка вимірювань $\Delta D_{max} = 26,4\%$.

Для вимірювань по треку 2 – $\Delta D_{rms} = 7,8\%$, $\Delta D_{max} = 24,8\%$.

Визначення пов'язаних точок як координат центрів областей, виділених на етапі виявлення і розпізнавання БПЛА, дає недостатньо хороший результат на малих дальностях до об'єкта. Тому потрібно уточнювати місце розташування сполучених точок кореляційним методом з розміром вікна, що дорівнює або трохи більше розміру області.

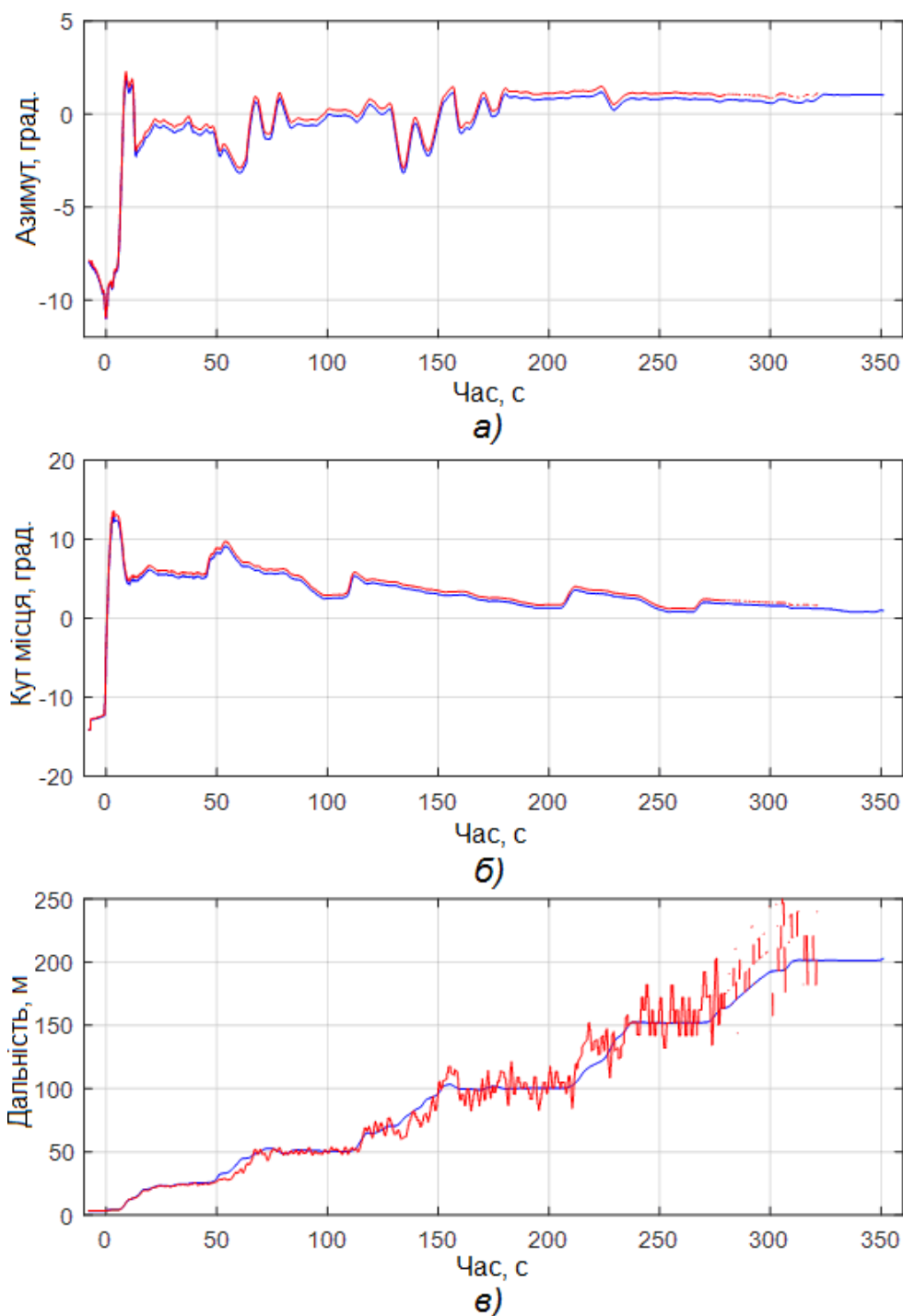


Рисунок 3.20 – Визначення координат БПЛА (трек 1)

При дальностях понад 160 м на рис. 3.20 спостерігаються збої в системі виявлення і розпізнавання БПЛА, пов'язані з тим, що розмір зображення об'єкта стає менш, ніж 5x5 пікселів. Цей процес супроводжується помітним збільшенням абсолютної помилки вимірювання дальності.

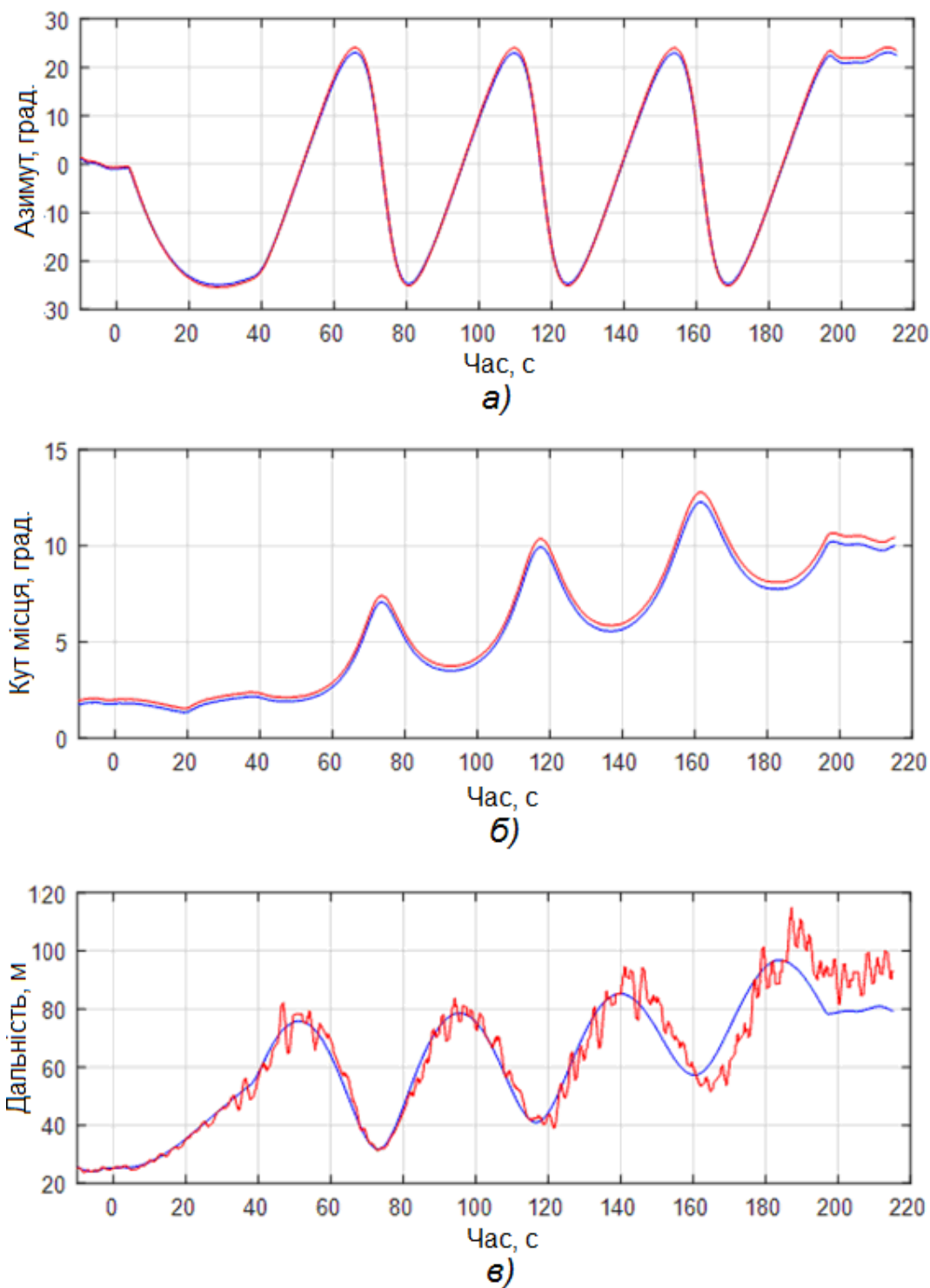


Рисунок 3.21 – Визначення координат БПЛА (трек 2)

Найбільша середньоквадратична помилка вимірювань дальності спостерігається в середньому діапазоні відстаней дії системи СВС 70...120 м. Як показав аналіз, причиною цього є одночасна дія двох факторів:

– перший – погіршення роздільної здатності системи СВС по дальності зі збільшенням дальності (рис. 3.12),

– другий – невисока точність методу визначення сполучених точок як координат центрів областей $V(x, y)$ виявлення БПЛА (рис.3.19). Причому другий фактор дає великі помилки на менших дальностях до об'єкта.

На графіку рис. 3.21 (в) помітно вплив недостатньо точної ректифікації системи СВС, що проявляється в збільшенні помилки вимірювання дальності при великих азимутах і кутах місця. При цьому вплив помилок неточної ректифікації порівняний з впливом помилок визначення сполучених точок.

3.5 Висновки по розділу 3

В оптичному каналі для збільшення надійності виявлення об'єктів запропоновано і обґрунтовано застосування датчиків денного, нічного та теплового бачення. Усі вони мають чутливі матриці високого розрізнення. Розроблений метод стереовідеоспостереження (СВС), що базується на вимірюванні лінійних паралаксів зображення об'єктів на матрицях, дозволяє використовувати один алгоритм обробки сигналів для усіх трьох датчиків (камер). При цьому забезпечується визначення дальності при експериментальних дослідженнях з середньоквадратичною похибкою не більш (10...12)%, кутових координат рухомого об'єкта – з розрахунковою похибкою 1,3 мрад.

Проведений теоретичний аналіз і експериментальні дослідження показали:

1. Основний внесок в похибку визначення координат БПЛА за допомогою системи СВС належить вимірюванням дальності. Вимірювання азимута і кута місця при цьому досить точні при високій роздільній здатності камер і досить точній компенсації їх нелінійних спотворень.

2. Очевидними шляхами для збільшення точності вимірювання дальності системою СВС, а також збільшення дальності виявлення об'єкта, є збільшення роздільної здатності камер. Однак, для виявлення, розпізнавання і пеленгації БПЛА в реальному часі в цьому випадку знадобляться значні обчислювальні ресурси. Збільшення чіткості зображення в 2 рази призводить до збільшення обчислювальної складності в 4 рази на кожному етапі обробки.

3. Зменшення кута огляду камер при інших рівних умовах збільшує роздільну здатність системи СВС по азимуту, куту місця і дальності. Зменшення поля зору системи при цьому необхідно компенсувати введенням просторового механіко-електричного сканування, а після виявлення БПЛА – епізодичним трекінгом об'єкта, щоб він не вийшов з поля зору.

ВИСНОВКИ

Широке використання малих БПЛА крім, позитивних сторін породило ряд проблем. Вони пов'язані з неадекватною поведінкою деяких власників БПЛА, несанкціонованим моніторингом об'єктів і територій державного значення, збільшенням випадків вторгнення в особисте життя. В цій ситуації актуальною стає задача виявлення і визначення координат БПЛА в повітрі.

Ця задача може бути виконана засобами активної і пасивної радіолокації, акустичної і теплової локації, системами відеоспостереження. У разі малих БПЛА, кожен з зазначених методів має ряд істотних складнощів і обмежень. Тому на практиці використовується комплексування цих методів.

Одним з напрямків у виявленні БПЛА є оптико-електронний канал у видимому діапазоні. Метою атестаційної роботи є отримання теоретичних і експериментальних числових оцінок похибок вимірювання координат малих БПЛА в оптичному каналі системи виявлення при різних варіантах його реалізації.

Проведено аналіз оптичних методів вимірювання координат об'єктів. В результаті зроблено висновок, що для вирішуваної задачі найкраще підходять пасивні двокамерні методи. Активні методи потребують застосування потужних лазерів, що здорожує систему і не відповідає вимогам скритності і безпеки для оточуючих. Однокамерні пасивні методи повинні оперувати серією кадрів, зроблених в різних положеннях камери або при зміні фокусної відстані. Для оперативного вимірювання координат рухомих об'єктів такі методи не підходять.

На першому етапі досліджень проведено теоретичний аналіз стереоскопічного метода вимірювання дальності і оцінка його потенційних можливостей. В цьому методі дальність до об'єкта може бути обчислена за лінійним паралаксом його зображення на світлочутливих матрицях камер, рознесених по горизонталі на відому відстань. По паралаксу з урахуванням

стереобазі і фокусної відстані об'єтивів обчислюється відстань до площини Q3, паралельної площині Q1 розташування камер. І немає різниці, в якій точці площини Q3 відносно головної осі системи знаходиться об'єкт.

Для оцінки потенційних похибок вимірювання координат розглянута модель у вигляді перетинів елементарних полів зору стереосистеми. Для об'єкта в точці А буде отримано такий же результат визначення дальності, як і для об'єктів в крайніх точках А1 і А2 елемента розрізнення системи. І розрахована дальність може не відповідати дійсному положенню об'єкта.

Виходячи з геометричних міркувань отримано вираз для похибки вимірювання дальності в стереосистемі. Величина похибки зростає зі збільшенням дальності і розміру пікселів світлочутливої матриці і зменшується зі збільшенням стереобазі і фокусної відстані об'єтивів.

З використанням середовища MathCAD проведено розрахунки похибки визначення дальності для фокусних відстаней від 50 до 200 мм і значень бази 0,5; 1; 2 м. Вважалося, що камери мають повнокадрова матриця з розмірами 36 × 24 мм і роздільною здатністю по горизонталі 1920 пікселів (формат Full HD). В разі використання в системі матриці іншого розміру, замість фокусної відстані слід розглядати поняття ефективної фокусної відстані, яка відрізняється від реальної на значення кроп-фактору.

З отриманих залежностей можна зробити висновок про те, що в стереосистемі можна досягнути досить високої точності дальнометрії. Цікавим є факт, що від вимірюваної відстані залежить не тільки абсолютна, але й відносна помилка вимірювання дальності. Вона зростає майже лінійно зі зростанням вимірюваної величини.

При фокусній відстані 100 мм та базах 0,5 м і 1 м відносна помилка вимірювання дальності не перевищує 5% і 10% відповідно. Це робить систему придатною для вимірювання координат в системі виявлення БПЛА.

В той же час, при неправильному виборі параметрів системи – бази, фокусної відстані, просторової роздільної здатності – значення помилки

вимірювання дальності різко зростає. Воно може досягати десятків і сотень відсотків. Особливо помітний вплив фокусної відстані. При намаганні отримати широкий кут огляду системи шляхом зменшення фокусної відстані об'єктивів при незмінній роздільній здатності матриць можна спостерігати різке зростання помилки вимірювання при $F < 10$ мм. Це слід враховувати при проектуванні систем виявлення БПЛА.

В атестаційній роботі оброблені результати експерименту по виявленню дронів за результатами стереовідеоспостереження, проведених колективом кафедри МІРЕС ХНУРЕ. Експериментальна установка побудована на базі двох IP камер з роздільною здатністю матриці 2688 пікселів і діагоналлю 1/3 дюйма. Камери, рознесені по горизонталі на величину бази 1 м, підключалися по LAN інтерфейсу до мережевого роутера. Потім – через WAN інтерфейс – до ноутбука с програмним забезпеченням Smart PSS для запису відеопотоків. Системні годинники камер і ноутбука програмно синхронізувалися. Початок і кінець відеозапису відбувалися при одночасній подачі апаратного сигналу "тривоги" на обидві камери.

Горизонтальне поле зору камер через веб-інтерфейс встановлювалося однаковим. У веб-інтерфейсі камер Dahua відображається, на жаль, не значення фокусної відстані або куту огляду, а деякі умовні одиниці Zoom. Тому для точного контролю горизонтального кута огляду FOV і фокусної відстані F була проведена попередня калібровка камер за допомогою мірної таблиці. В результаті чого були отримані графіки відповідності FOV і F від умовного параметра Zoom.

Схема стереоскопічної системи і розрахункова формула дальності передбачають, що оптичні осі об'єктивів паралельні, і об'єктиви не мають дисторсії. Однак у реальній експериментальній установці це реалізувати неможливо. Тому потрібна калібровка внутрішніх і зовнішніх параметрів стереосистеми. В результаті внутрішньої калібровки визначаються матриці внутрішніх спотворень S , які враховують дисторсію кожної камери. Задача

взаємної калібровки вирішується шляхом знаходження зовнішніх параметрів матриці повороту R і вектором перенесення t . Останнім часом отримали розвиток методи, які використовують калібровочну таблицю у вигляді сітчастого або шахового поля відомих розмірів, що знімається в різних положеннях. Трьох кадрів достатньо, щоб визначити всі внутрішні і зовнішні параметри камери. При малому числі знімків, такі методи не дуже точні, однак при великій їх кількості (20 і більше) їх точність достатньо висока.

Використовувалася калібрувальна таблиця розміром 1 м x 0,7 м у вигляді шахового поля з кількістю квадратів 10 x 7. Кути квадратів сітки служать калібрувальними точками. Розмір таблиці дозволяє робити калібрувальні знімки на відстані 1 м і більше. При цьому таблиця повністю потрапляє в кадр при горизонтальному куті поля зору 60° і знаходиться далі, ніж ближня межа зони різкості.

Калібрування здійснювалася в OpenCV. Були сформовані 30 зображень калібрувальної таблиці в різних позиціях на відстанях 1...2 м від камер. Після калібрування експериментальна помилка вимірювання дальності до об'єктів з відомих просторовим положенням в діапазоні дальностей до 100 м не перевищувала 4,5% по центру і 6% по краях горизонтального поля спостереження.

Оброблено результати стереовідеоспостереження дрона DJI Phantom 3. Координати квадрокоптера, отримані його GPS приймачем, використовувалися для порівняння з координатами, отриманими за допомогою стереосистеми. В атестаційній роботі оброблені результати вимірювань за двома тестовими польотами БПЛА: трек 1 – проліт уздовж осі з зависанням на висоті 5 м над точками, віддаленими на 3, 25, 50, 100, 150 і 200 м; трек 2 – вверх по спіралі 3 витка з діаметром витка 50 м на висоту 30 м.

При розрахунку паралакса в якості сполучених точок зображення БПЛА використовувалися координати центру $V(x, y)$, виділеної області на етапі виявлення і розпізнавання.

Отримані значення азимута, кута місця і дальності БПЛА по GPS і за вимірюваннями стереосистеми. Можна відзначити, що вимірювання азимута і кута місця точно збігаються з даними GPS приймача. Це пояснюється високою роздільною здатністю камер і досить точним калібруванням їх внутрішніх параметрів.

Середньоквадратичне значення відносної помилки близько 10%, максимальна відносна помилка близько 25%.

При дальностях понад 160 м спостерігаються збої в системі виявлення і розпізнавання БПЛА, пов'язані з тим, що розмір зображення об'єкта стає менш, ніж 5x5 пікселів. Цей процес супроводжується помітним збільшенням абсолютної помилки вимірювання дальності.

Найбільша середньоквадратична помилка вимірювань дальності спостерігається в середньому діапазоні відстаней дії системи 70...120 м. Як показав аналіз, причиною цього є одночасна дія двох факторів:

- перший – погіршення роздільної здатності системи СВС по дальності зі збільшенням дальності,
- другий – невисока точність методу визначення сполучених точок як координат центрів $V(x,y)$ виявлення БПЛА.

Помітний вплив недостатньо точної калібровки системи, що проявляється в збільшенні помилки вимірювання дальності при великих азимутах і кутах місця. При цьому вплив помилок неточної калібровки порівняний з впливом помилок визначення сполучених точок.

Таким чином, проведенні дослідження дозволяють зробити практичні висновки, які слід враховувати при проектуванні і подальшому дослідженні оптичних систем вимірювання дальності до малих БПЛА.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аснис Л.А., Васильев В.П. и др. Лазерная дальнометрия. М.: Радио и связь, 1995. – 256 с.
2. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А. и др. Лазерные приборы и методы измерения дальности. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 92 с.
3. 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.
4. Информационно-измерительные системы / Ю. С. Сагдуллаев, С. Д. Ковин, Т. Ю. Сагдулаев, А. И. Смирнов. // М.: «Спутник+», 2013. – 199 с.
5. Вильнер В., Лаврюшин А., Рудь Е. Оценка возможностей светолокационного измерителя дальности с накоплением // Фотоника. 2007. – С. 22–26.
6. 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.
7. 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.
8. Попов Ю.В., Утенков Б.И. Методы управления режимом работы фотоэлектронных умножителей // Опт.- мех. пром. 1976. №2. С. 65–71.
9. Zhang W. Comb-referenced frequency sweeping interferometry for precisely measuring large stepped structures // Appl. Opt. 2018. Vol. 57, No.5. – P. 1247–1253.
10. Baumann E., Comb-calibrated frequency-modulated continuous wave lidar for absolute distance measurements // Opt. Lett. 2013. Vol. 38, No.12. P. 2026 – 2028.

11. 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.

12. Gunnar Arisholm. Combined range ambiguity resolution and noise reduction in lidar signal processing // Opt. Eng. 2018. Vol. 57, No.7. – P.73 – 103.

13. Бабенко В.С. Оптика телевизионных устройств. М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.

14. Медведев А.В., Гринкевич А.В., Князева С.Н. Современные подходы к созданию пассивных дальномеров // Фотоника. 2017. №8/68. – С. 30 – 37.

15. Juan Luis Nieves Multispectral synthesis of daylight using a commercial digital CCD // Appl. Opt. 2005. Vol.44, No.27. – P. 5696 – 5703.

16. Ямбаев Х.К., Староверов С.З. Особенности фоточувствительных приемников с зарядовой связью и их возможности в геодезии и метрологии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017.

17. Donald E. Groom. Recent progress on CCDs for astronomical imaging // Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors. 2000. Proc.Vol. 4008.

18. Волков В.Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для обеспечения безопасности // Системы управления, связи и безопасности. 2016. №3. – С.66 – 94.

19. Night vision technologies handbook. Homeland security. 2013. – 34 p.

20. Рева В.П. и др. ПЗС-фотоматрицы с электронным умножением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2017. № 1-2. – С. 33 – 37.

21. Сизов Ф.Ф., Чувствительность матриц ПЗС с электронным умножением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2018. № 2. – С. 9 – 14.

22. 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 $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 10. – С. 1257-1265.
23. 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.
24. Иванов С. Д., Косцов Э. Г. Автометрия. Тепловые приемники неохлаждаемых многомерных тепловизионных матриц. 2015. Т. 51, № 6. С.79 – 88.
25. Masafumi Kimata. Uncooled infrared focal plane arrays //wiley.com/doi/full/10.1002/tee. 22563. 2017.
26. Волков В.Г. Тепловизионные приборы для спецтехники //bnti.ru/showart.asp. 2012.
27. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, М.М. Колендовская, Л.П. Тимошенко, Н.В. Рыбников, А.И. Капуста. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 201. – С. 120 – 129.
28. Raja Abdullah, Raja Syamsul Azmir. A Review of Copter Drone Detection Using Radar Systems // Science & Technology Research Institute for Defence (STRIDE), 2019. – pp. 16 – 38.
29. S. Al-Emadi, F. Al-Senaïd. Drone Detection Approach Based on Radio-Frequency Using Convolutional Neural Network // 2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT), Doha, Qatar, 2020. – pp. 29 – 34.
30. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.

31. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.

32. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. –New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.

33. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.

34. V. Kartashov, V. Oleynikov, O. Zubkov, S. Sheiko. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p.

35. I. Koryttsev, S. Sheiko, V. Kartashov, O. Zubkov, V. Oleynikov, I. Selieznov, M. Anohin. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 International Scientific-Practical Conference. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6-9, 2020. – 5 p.

36. И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.М. Карташов, О.В. Зубков, В.Н. Олейников, С.И. Бабкин, И.С. Селезнев. Обработка сигналов при пеленгации и определении дальности до малоразмерных БПЛА в оптическом и инфракрасном диапазонах // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 125 – 134.

37. В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, О.В. Зубков, С.И. Бабкин. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных объектов и измерения их координат // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 153 – 159.
38. О.В. Зубков, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин. Исследование эффективности детектирования и распознавания изображений дронов по видеопотоку // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 136 – 146.
39. Савчук В. П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория: учеб. пособие для студентов вузов. Ч.1 – Одесса: ОНПУ, 2002. – 54 с.
40. Зубарь, А. В. Оценка точности определения дальности оптико-электронным стереоскопическим дальномером /А. В. Зубарь, В. П. Пивоваров // Вестник академии военных наук. Спецвыпуск № 3 (40). – М. : Военное издательство МО РФ, 2012. – С. 125–129.
41. Shapiro L., Stockman G. Computer Vision. Prentice Hall, 2001. – 617 p.
42. Computer Vision. CCF Chinese conf. CCCV 2015. Proseedings, Part II / Editors Zha H., Chen X., Wang L., Miao Q. Xi'an, China. September, 2015. – 471 p.
43. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Washington: Springer, 2011. – 812 p.
44. Tsai R.Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses // IEEE Int. Journal on Robotics and Automation. 1987. Vol. 3. – P. 323–344.
45. Cipolla R., Drummond T., Robertson D. Camera calibration from vanishing points in images of architectural scenes // BMVC. September, 1999. – P. 382–391.
46. Chaudhuri S., Rajagopalan A.N. Depth from Defocus: A Real Aperture Imaging Approach. Washington: Springer, 1999. – 172 p.

47. Zhang Z. Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22 (11). – P. 1330–1334.

48. Bouguet J.Y. MATLAB calibration tool // http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc.

49. Іваницький С.О. Виявлення негаусових полів сигналів на фоні гаусових шумів // 25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2020. – с. 85 – 86.

50. Методичні вказівки з виконання атестаційної магістерської роботи за спеціальністю 8.05090102 «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення». Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр / Упоряд. В.М. Карташов, В.А. Тихонов, І.В. Савченко – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 68 с.