

Ковалев Володимир Олександрович

УДК 519.677

ДИСЕРТАЦІЯ

**Підвищення ефективності методів оптико-електронного позиціонування
шляхом комбінованого аналізу елементів кадру**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»

(галузь знань)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник–
Любчик Віталій Романович,
д.т.н., доцент

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*В.о. вченого секретаря спеціалізованої
вченої ради*

/Р.Л. Голяка/

АНОТАЦІЯ

Ковалев В.О. Підвищення ефективності методів оптико-електронного позиціонування шляхом комбінованого аналізу елементів кадру. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 «Радіотехнічні і телевізійні системи» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2021.

В дисертаційній роботі розв’язано науково-технічне завдання підвищення ефективності методів оптико-електронного позиціонування та пасивного стереоскопічного вимірювання дальності за рахунок розробки та впровадження завадостійких методів обробки оптичного потоку.

У першому розділі розглянуто існуючі підходи щодо оптико-електронного пеленгування та оптико-електронного вимірювання відстані. Встановлено, що забезпечення задовільної точності позиціонування в пасивних системах можливе лише при використанні відеовузлів з великою стереобазою при умові ректефікації кадрів відеосистеми. Розглянуто альтернативні методи оптико-електронного позиціонування, такі як оптичний потік; виділено проблемне поле.

Другий розділ роботи присвячено розробці комплексного показника ефективності систем оптико-електронного позиціонування, виділенню факторів, які впливають на сталість супроводу рухомих та статичних об’єктів, запропоновано методіку дослідження систем оптико-електронного позиціонування, що дозволяє оцінювати ефективність системи оптико-електронного позиціонування на етапі проектування.

У третьому розділі дисертаційного дослідження запропоновано удосконалений метод розрахунку оптичного потоку, який, за рахунок врахування висотно-швидкісних даних та даних інерційних систем літального апарату дозволяє зменшити кількість шарів масштабної піраміди, що дозволяє суттєво пришвидшити процес розрахунку оптичного потоку та збільшити

достовірність отриманих даних. Запропонований метод дозволяє будувати карту глибини зображення без використання стереовідеопристроїв та детектувати рухомі об'єкти з метою передавання їх дескрипторів в алгоритми супроводу. Окремо розглянуто випадок одномірного пересування літального апарату в напрямку, перпендикулярному фокальній площині камери та отримано співвідношення для побудови карти глибини на основі розрахованого оптичного потоку та значень швидкостей літального апарату.

Четвертий розділ присвячено розробці алгоритмів роботи систем оптико-електронного позиціонування на базі запропонованого удосконаленого методу розрахунку оптичного потоку. Розроблено загальну функціональну схему системи опроелектронного позиціонування, проведено розподіл обчислювальних потоків для використання з багатопроцесорними обчислювальними пристроями. Особливу увагу приділено синхронізації потоків даних від навігаційних підсистем літальних апаратів з відеопотоком та взаємодії системи з пристроями вводу-виводу інформації.

У п'ятому розділі введено метод попередньої обробки зображень з адаптивною фільтрацією високочастотних шумів для компенсації розмиття периферійної частини кадру, розроблено алгоритми програмного забезпечення дослідного комплексу апаратури та пакет прикладного програмного забезпечення з використанням мов програмування C++ та Python, розроблено конструкторську документацію дослідного комплексу оптико-електронного позиціонування. Наведено експериментальні дані роботи дослідного комплексу та проведено порівняння з результатами, отриманими при математичному моделювання.

Ключові слова: оптико-електронне позиціонування, оптичний потік, карта глибини стереопари, метод Лукаса-Канаде, медіанна фільтрація, білатеральна фільтрація, детектор руху.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Любчик В.Р. Методика проектування комплексів оптико-телевізійного наведення з використанням стереоскопічних оптосистем// Любчик В.Р., Ковалев В.О., Клепиковський А.В. // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький:2016. – № 6. – С. 248–252.

2. Бабій Ю.О. Комплекс оптико-телевізійного наведення з використанням машинного стереозору і адаптивних алгоритмів супроводу // Бабій Ю.О., Клепиковський А.В., Ковалев В.О. //Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – Київ:2017. – № 1. – С. 13-18.

3. Свідоцтво про реєстрацію авторського права №76675 Офіційний бюлетень №48, 2018. «Двodiaпазонний трекер рухомих цілей» Ковалев В.О., Клепиковський А.В.

4. Kovalev V. Increasing the stability of optical flow calculation in unmanned aerial vehicles” // Liubchuk V., Kovalev V., Klepikovskiy A. // Sciences of Europe – VOL.1, №54 (друковане іноземне періодичне видання з напрямку, ISSN 3162-2364)

5. Бабій Ю.О. Розробка перспективного ударно-розвідувального безпілотного літального апарату // Бабій Ю.О., Клепиковський А.В., Ковалев В.О. //Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних сил. – Харків:2017. – № 2(51). – С. 69-71.

6. V Liubchuk. Mathematical modelling of distance measuring multifrequency phase method. // V Liubchuk, A Klepikovskiy, Yu Babiy, E Lenkov, V Kovalev// Informatics & Mathematical Methods in Simulation. Vol. 7 Issue 3 p156-169. 14p.(ISSN : 2223-5744)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Любчик В.Р. Модернізація комплексів оптико-телевізійного наведення з використанням бінокулярної системи комп’ютерного зору та алгоритму покадрового зміщення/ Любчик В.Р., Ковалев В.О., Клепиковський А.В. // V міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми

передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомукаційних системах», Чернівці, 3-5 листопада 2016 р.: матеріали конференції – Чернівці:2016 – С.86-87.

2. Ковалев В.О. Проектування комплексів оптико-телевізійного наведення з використанням систем комп'ютерного стереобачення / Ковалев В.О., Любчик В.Р., Клепіковський А.В., Бабій Ю.О. // XIII міжнародна наукова конференція «Новітні технології – для захисту повітряного простору», Харків, 12-13 квітня 2017 р.: матеріали конференції – Харків:2017 – С.161.

3. Клепіковський А.В. Розробка комплексу оптико-телевізійного наведення з використанням адаптивних алгоритмів супроводу / Клепіковський А.В., Бабій Ю.О., Ковалев В.О. // VIII науково-практична конференція Національної академії Національної гвардії України, Харків, 30 березня 2017 р.: матеріали конференції – Харків:2017 – С.141-143.

4. Любчик В.Р. Особливості використання алгоритмів трекінгу рухомих об'єктів в системах оптико-телевізійного наведення/ Любчик В.Р., Клепіковський А.В., Ковалев В.О., Бабій Ю.О. / Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки», Вінниця, 17-19 травня 2017 р.: матеріали конференції – Вінниця: 2017 – С.201-203.

5. Ковалев В.О. Алгоритм пошуку ключових точок цілей у дводіапазонних системах оптико-телевізійного наведення / Ковалев В.О., Клепіковський А.В., Любчик В.Р. // VI міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомукаційних системах», Чернівці, 9-11 листопада 2017 р.: матеріали конференції – Чернівці:2017 – С.68-69.

6. Доценко О.В. Математичне моделювання низькорівневої попередньої обробки відеопослідовностей в комплексах оптико-електронного наведення / Доценко О.В., Ковалев В.О., Макодзеба П.П. // XV міжнародна наукова конференція «Новітні технології – для захисту повітряного простору», Харків, 10-11 квітня 2019 р.: матеріали конференції – Харків:2019 – С.171.

ABSTRACT

Kovalev V.A. Improving the efficiency of optoelectronic guidance methods by combined analysis of frame elements. – As a manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the of the Ph. D. degree in technical sciences on specialty 05.12.17 “Radio and television systems” (172 - Telecommunications and Radioengineering). - Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

In the dissertation the scientific and technical task of increase of efficiency of methods of optoelectronic positioning and passive stereoscopic measurement of distance at the expense of development and introduction of noise - tolerant methods of processing of an optical stream is solved. The first section discusses the existing approaches to optoelectronic direction finding and optoelectronic distance measurement. It is established that ensuring satisfactory positioning accuracy in passive systems is possible only when using video nodes with a large stereo base, provided the rectification of video system frames. Alternative methods of optoelectronic positioning, such as optical flux, are considered.

The second section is devoted to the development of a comprehensive indicator of the effectiveness of optoelectronic positioning systems, the selection of factors that affect the stability of the support of moving and static objects, proposed a method of studying optoelectronic positioning systems, which allows to evaluate the efficiency of optoelectronic positioning systems.

The third section of the dissertation research proposes an improved method of calculating the optical flux, which, taking into account high-speed data and data of inertial systems of the aircraft can reduce the number of layers of the large pyramid, which significantly accelerates the process of calculating optical flux and increase reliability. The proposed method allows you to build an image depth map without the use of stereo video devices and detect moving objects in order to transfer their descriptors to the tracking algorithms. The case of one-dimensional movement of the aircraft in the direction perpendicular to the focal plane of the camera is considered

separately and the relation for construction of the depth map on the basis of the calculated optical flow and values of speeds of the aircraft is received.

The fourth section is devoted to the development of algorithms for optoelectronic positioning systems based on the proposed improved method of calculating the optical flux. The general functional scheme of the system of electronic positioning is developed, the distribution of computational flows for use with multiprocessor computing devices is carried out. Particular attention is paid to the synchronization of data streams from the navigation subsystems of aircraft with the video stream and the interaction of the system with information input-output devices. The fifth section introduces the method of pre-processing images with adaptive filtering of high-frequency noise to compensate for blurring of the peripheral part of the frame, developed software algorithms for the experimental set of equipment and application software package using programming languages C ++ and Python, developed design documentation -electronic positioning. Experimental data of the experimental complex are presented and compared with the results obtained in mathematical modeling.

Key words: optoelectronic guidance, optical flow, Lucas-Kanade method, median filtration, motion detector.

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

1. Lyubchik V.R. Methods of designing optical-television guidance complexes using stereoscopic optosystems // Lyubchyk V.R., Kovalev V.O., Klepikovsky A.V. // Bulletin of Khmelnytsky National University. - Khmelnytsky: 2016. - № 6. - P. 248–252.

2. Babiy Y.O. Complex of optical-television guidance using machine stereo vision and adaptive tracking algorithms // Babiy Y.O, Klepikovsky A.V, Kovalev V.O // Modern information technologies in the field of security and defense. - Kyiv: 2017. - № 1. - P. 13-18.

3. Certificate of copyright registration №76675 Official Bulletin №48, 2018. "Two-band tracker of moving targets" Kovalev V.O, Klepikovsky A.V
4. Kovalev V. Increasing the stability of optical flow calculation in unmanned aerial vehicles ”// Liubchyk V., Kovalev V., Klepikovskiy A. // Sciences of Europe - VOL.1, №54 (printed foreign periodical from the direction, ISSN 3162-2364)
5. . Babiy Y.O Development of a promising strike and reconnaissance unmanned aerial vehicle // Babiy Y.O, Klepikovsky A.V, Kovalev V.O // Collection of scientific works of Kharkiv National University of the Air Force. - Kharkiv: 2017. - № 2 (51). - C. 69-71.
6. V Liubchyk. Mathematical modeling of distance measuring multifrequency phase method. // V Liubchyk, A Klepikovskiy, Yu Babiy, E Lenkov, V Kovalev // Informatics & Mathematical Methods in Simulation. Vol. 7 Issue 3 p156-169. 14p. (ISSN: 2223-5744)

Proceedings that certify an approvement of thesis materials:

1. Lyubchik VR Modernization of optical-television guidance complexes using binocular computer vision system and frame shift algorithm / Lyubchyk VR, Kovalev VO, Klepikovsky AV // V International Scientific and Practical Conference "Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems", Chernivtsi, November 3-5, 2016: conference materials - Chernivtsi: 2016 - P.86-87.
2. Kovalev VO Design of optical-television guidance systems using computer stereo systems / Kovalev VO, Lyubchyk VR, Klepikovsky AV, Babiy YO // XIII International Scientific Conference "Latest Technologies - for the Protection of Airspace", Kharkiv, April 12-13, 2017: conference proceedings - Kharkiv: 2017 - P.161.
3. Klepikovsky AV Development of a complex of optical and television guidance using adaptive support algorithms / Klepikovsky AV, Babiy YO, Kovalev VO // VIII scientific-practical conference of the National Academy of the National

Guard of Ukraine, Kharkiv, March 30, 2017: conference materials - Kharkiv: 2017 - P.141-143.

4. Lyubchik VR Peculiarities of using algorithms for tracking moving objects in optical-television guidance systems / Lyubchik VR, Klepikovskiy AV, Kovalev VO, Babiy YO / All-Ukrainian scientific and technical conference "Actual problems of design, manufacture and operation of weapons and military equipment", Vinnytsia, May 17-19, 2017: conference materials - Vinnytsia: 2017 - P.201-203.

5. Kovalev VO, Klepikovskiy AV, Lyubchik VR Algorithm for finding key target points in two-band optical-television guidance systems / // VI International Scientific and Practical Conference "Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems", Chernivtsi, November 9-11, 2017: conference materials - Chernivtsi: 2017 - P.68-69.

6. Dotsenko OV Mathematical modeling of low-level pre-processing of video sequences in optoelectronic guidance complexes / Dotsenko OV, Kovalev VO, Makodzeba PP // XV International Scientific Conference "Latest Technologies - for Airspace Protection", Kharkiv, April 10-11, 2019: conference materials - Kharkiv: 2019 - P.171.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО позиціонування.....	20
1.1. Стан питання та постановка задачі.....	20
1.2.1. Аналіз методів фото – та термоконтрастного позиціонування	29
1.2.2. Аналіз методів контурно-порівняльного позиціонування	32
1.2.3. Аналіз методів позиціонування з адаптивними алгоритмами	36
1.3. Оптико-електронні методи вимірювання дальності та швидкості об’єктів.....	42
1.4. Метод визначення відстаней до множини об’єктів за допомогою аналізу горизонтальних та вертикальних стереопар.....	44
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ТА ОЦІНЮВАННЯ МЕТОДІВ СУПРОВОДУ ОБ’ЄКТІВ, ЗАСНОВАНИХ НА ОБЧИСЛЕННІ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ.....	49
2.1. Вибір методів побудови оптичного потоку для визначення просторового положення об’єктів в системах оптико-електронного позиціонування.	50
2.2. Розробка комплексного показника ефективності систем оптико- електронного позиціонування.	53
2.3. Дослідження ефективності позиціонування за допомогою основних методів побудови оптичного потоку.	60
Висновки до розділу 2.....	63
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ.....	64
3.1. Удосконалення методу побудови оптичного потоку Лукаса-Канаде	64
3.2. Розробка методу побудови карти глибини зображення в умовах зустрічно-курсого наближення.....	69

3.3.Адаптація методу побудови карти глибини в умовах зустрічно-курсового наближення до роботи в бортових системах літальних апаратів...	70
Висновки до розділу 3.....	72
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ	74
4.1 Розробка функціональної схеми комплексу оптико-електронного позиціонування на основі аналізу оптичного потоку.	74
4.2. Розробка алгоритму роботи комплексу оптико-електронного позиціонування.	78
4.3 Розробка структури програмного забезпечення для головного обчислювального модуля системи оптико-електронного позиціонування.....	91
Висновки до розділу 4.....	100
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ КОМПЛЕКСА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТА ІХ ДОСЛІДЖЕННЯ	101
5.1. Розробка дослідного комплексу оптико-електронного позиціонування.....	102
5.1.1. Розробка принципової схеми комплексу.	102
5.1.2. Розробка конструкції стереокамери	107
5.1.3. Розробка обчислювального блоку з індикатором прямої видимості	110
5.1.4. Розробка конструкції індикатора на лобовому склі	111
5.1.5. Розробка конструкції нашоломного індикатора	113
5.2. Розробка методу адаптивної фільтрації високочастотних шумів зображення на базі аналізу оптичного потоку.....	115
5.3. Практичне дослідження методу оптико-електронного наведення на основі аналізу оптичного потоку.....	117
Висновки до розділу 5.....	118
ВИСНОВКИ.....	119

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121
ДОДАТОК 1. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	131
ДОДАТОК 2. Програмний код імітаційної моделі комплексу оптико-електронного позиціонування.....	133
ДОДАТОК 3. Порівняльні результати імітаційного моделювання систем оптико-електронного позиціонування	142
ДОДАТОК 4. Схеми електричні принципові дослідного зразка системи оптико-електронного позиціонування	144
ДОДАТОК 5. Лістинг програмного забезпечення допоміжного обчислювального модуля дослідної системи оптико-електронного позиціонування.....	147
} ДОДАТОК 6: Акти впровадження результатів дисертаційної роботи..	167

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АМ – амплітудна модуляція;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
БІНС – безінерційна навігаційна система;
БПЛА – безпілотний літальний апарат;
ГРР – геореференційований растр;
ДД – динамічний діапазон;
ІЛС – індикатор на лобовому склі;
ІПВ – індикатор прямої видимості;
ІЧВ – інфрачервоне випромінювання;
КМ – кут місця;
ЛА – літальний апарат;
ОЕЛ – оптико-електронна локація;
ОЕП – оптико-електронне позиціонування;
ОП – оптичний потік;
ПА – початковий азимут;
ПСП – повне світлоповернення;
ПСС – повна світлосила;
РЛЗ – радіолокаційні засоби;
РТЗ – радіотехнічні засоби;
СКВ – середнє квадратичне відхилення;
СКП – середньоквадратична похибка;
СОЕМ – скануючий оптоелектронний модуль;
ФВЧ – фільтр високих частот;
ФНЧ – фільтр низьких частот;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ЦФ – цифровий фільтр;
ЧМ – частотна модуляція;

ВСТУП

Актуальність Системи оптико-електронного позиціонування знаходять широке застосування в сучасній безпілотній та пілотованій авіації, засобах автономної навігації, засобах попередження повітряних зіткнень. На сьогоднішній день засобами оптико-електронного позиціонування та оптико-електронної локації оснащені більше 60% всіх існуючих безпілотних літальних апаратів. До основних переваг таких систем відносяться компактність, інформативність, зручність представлення інформації, висока селективність об'єктів, висока роздільна здатність. Проте, вимоги до перспективних засобів оптико-електронного позиціонування стають більш жорсткими. Основними передумовами модернізації систем оптико-електронного позиціонування на даний час є:

1. Частковий перехід авіації на безпілотні літальні апарати. Отже, обмеження маневрових та лінійних швидкостей, пов'язані з фізіологічними особливостями пілота, знімаються і виникає необхідність прискорення процесу обробки даних для впевненого супроводу цілей.
2. Зменшення габаритів літальних апаратів та підвищення вимог до енергоефективності потребує відмови від використання в дальномірному каналі активних потужних лазерних випромінювачів.
3. Перехід до дистанційно керованих літальних апаратів створює затримки в передачі керуючого сигналу та сигналів телеметрії. При використанні супутникового каналу зв'язку ці затримки можуть досягати 2 секунд, що підвищує вимоги до ступеня автоматизації систем оптико-електронного позиціонування з метою недопущення повітряного інциденту в межах часового проміжку затримки сигналу.

Підсумовуючи все вищезазначене, можна стверджувати, що на основі вимог, які висуваються до перспективних систем та комплексів оптико-електронного позиціонування, важливим науково-прикладним завданням є підвищення стійкості алгоритмів обробки вхідної відеоінформації до швидкої зміни ракурсів об'єктів спостереження, власного маневрування літального

апарата – носія шляхом розробки завадостійкого методу розрахунку оптичного потоку. Реалізація вищезазначених завдань дасть змогу створювати ефективні засоби оптико-електронного позиціонування, що працюватимуть в складних метеоумовах на значній дальності без використання активних джерел випромінювання, що є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами науково-дослідних робіт.

Тема дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з положеннями:

- Стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2030 року.
- Наказ «Про затвердження Правил інженерно-авіаційного забезпечення державної авіації України» №343 від 05.07.2016.
- Закон України «Про розвиток літакобудівної промисловості» №1814-VI від 20.01.2010 (із змінами, внесеними згідно з Законом №1796-VIII від 20.12.2016)

Тема дисертаційної роботи пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, наведеними в «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок до 2020 року», затвердженому Постановою Кабінету міністрів України № 556 від 23 серпня 2016.

Дисертаційне дослідження виконане відповідно до наукового напрямку науково-промислового комплексу «КУРС» та ДП «Антонов».

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності методів оптико-електронного позиціонування та пасивного стереоскопічного вимірювання дальності за рахунок розробки та впровадження завадостійких методів обробки оптичного потоку.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

1. Провести аналіз та систематизацію методів оптико-електронного позиціонування, оптико-електронного вимірювання дальності, виділення проблемного поля та його аналізу;

2. Визначити основні фактори, що впливають на ефективність процесу оптико-електронного позиціонування і розробити метод кількісного оцінювання ефективності роботи засобів оптико-електронного позиціонування;
3. Оцінити кількісні показники існуючих методів позиціонування і визначити шляхи удосконалення цих методів;
4. Удосконалити метод аналізу оптичного потоку шляхом використання даних з інерційних та навігаційних систем літальних апаратів ;
5. Розробити алгоритми для програмної реалізації удосконаленого методу аналізу оптичного потоку;
6. Розробити, виготовити та дослідити макет системи оптико-електронного позиціонування.

Об'єкт досліджень: процес визначення ключових точок об'єктів в стереоскопічному відеопотоці в умовах факторів впливу.

Предмет досліджень: – методи побудови та аналізу оптичного потоку, які забезпечують підвищення ефективності функціонування систем оптико-електронного позиціонування.

Методи дослідження: У роботі використано такі методи наукових досліджень: методи математичного аналізу, матричної алгебри, теорії ймовірності і математичної статистики, теорії цифрової фільтрації шумів. Математичні моделі розроблені на основі теорії цифрової фільтрації, ланцюгового детектування, згорткових моделей. Методи експериментальних досліджень: натурний експеримент, імітаційне моделювання. Реалізація методів проведена з використанням програмного забезпечення, створеного в інтегрованих середовищах розробки «Python IDLE», «Keil u-vision», «CodeVisionAVR».

Наукова новизна одержаних результатів обумовлена новим вирішенням важливої науково-практичної проблеми, що полягає у підвищенні ефективності функціонування систем оптико-електронного позиціонування.

В результаті проведеного дисертаційного дослідження здобувачем отримані такі нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано комплексний показник ефективності систем оптико-електронного позиціонування з урахуванням природних факторів впливу, маневрових характеристик носія системи, маневрових характеристик об'єктів супроводу та штучних перешкод, що дає змогу оцінити роботу подібних комплексів в реальних умовах, не проводячи натурних експериментів;
2. Удосконалено методи побудови оптичного потоку за рахунок зменшення піраміди масштабів, що відрізняється від існуючих методів введенням в математичну модель обробки інерційних та висотно-швидкісних даних носія системи оптико-електронного позиціонування, що дозволяє зменшити час обробки та підвищити ефективність системи.
3. Вперше розроблено метод багатоканального пасивного вимірювання дальності на основі оптичного потоку в стереоскопічному зображенні, який, на відміну від існуючих, дає змогу будувати карту глибини зображення в некаліброваних стереопарах з кутовим паралаксом.
4. Удосконалено метод попередньої обробки зображень, який відрізняється від існуючих введенням адаптивної фільтрації високочастотних шумів, що дозволяє підвищити завадостійкість систем оптико-електронного позиціонування при супроводі об'єктів на неоднорідному фоні.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає у створенні програмних та апаратних засобів, які реалізують методи:

1. Реалізовано алгоритми побудови та аналізу оптичного потоку з використанням даних інерційних та висотно-швидкісних датчиків, що збільшило швидкість обробки вхідних даних в 1,73 рази.

2. Розроблено та програмно реалізовано алгоритми попередньої обробки кадрів відеопослідовності з адаптивною фільтрацією, що збільшило тривалість супроводу приповерхневих об'єктів від 36 до 92% в залежності від характеру місцевості.

3. На основі отриманих в роботі результатів було виготовлено комплект конструкторської та програмної документації, а також виготовлено дослідний зразок системи оптико-електронного позиціонування.

Практичну цінність отриманих результатів підтверджують акти впровадження, отримані у ТОВ «АНГ-Україна» та НПК «КУРС».

Апробація результатів роботи.

Основні положення і результати дисертаційних досліджень, практичні висновки та рекомендації, одержані в процесі досліджень, були апробовані, оприлюднені та отримали позитивну оцінку у ході:

V міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомукаційних системах», (2016р., м. Чернівці) , XIII міжнародної наукової конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (2017р., м. Харків), VIII науково-практичної конференції Національної академії Національної гвардії України (2017р., м. Харків), всеукраїнська науково-технічної конференції «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки» (2017 р., м. Вінниця), VI міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомукаційних системах» (2017 р., м. Чернівці), XV міжнародної наукової конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору»(2019 р., м. Харків), міжнародному авіасалоні «Авіасвіт-XXI» (2018р., м.Київ), міжнародній виставці «Зброя та безпека-2018» (2018р., м.Київ).

Особистий внесок здобувача. Основні результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, що викладені в дисертації, отримані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: [1] – удосконалення методів обчислення оптичного потоку за рахунок введення в математичну модель інерційних та висотно-швидкісних параметрів; [2] – досліджено вплив методів попередньої обробки зображень на ефективність роботи систем оптико-електронного позиціонування; [3] –

досліджено метод підвищення ефективності роботи систем оптико-електронного позиціонування шляхом компенсації афінних викривлень на етапі попередньої обробки; [4] – розробка стійкого алгоритму супроводу рухомих об'єктів; [5] – розробка системи електродистанційного керування БПЛА з автоматичною корекцією курсу на об'єкт супроводу, [6] - математичне моделювання дистанційного вимірювання висоти літальних апаратів..

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 10 наукових працях, серед них 1 стаття в іноземному науковому періодичному виданні за напрямом дисертації [1], 4 статті у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України [2,3,5,6], 1 свідоцтво на реєстрацію авторського права на програмне забезпечення[4] та 6 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаних джерел і 6 додатків. Загальний обсяг роботи 168 сторінок, з них 105 сторінок – основного тексту. Дисертація містить 56 рисунків і 23 таблиці. Список використаних джерел нараховує 115 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

1.1. Стан питання та постановка задачі

Системи оптико-електронного позиціонування дедалі більше використовуються в складі літальних апаратів. Стрімка мініатюризація пристроїв вводу та обробки відеоінформації (в тому числі мікроболометричних тепловізорних систем) забезпечує можливість встановлення таких пристроїв на малорозмірні безпілотні літальні апарати. До переваг систем оптико-електронного позиціонування відносять: компактність, інформативність, висока енергоефективність, зручність представлення інформації, висока адаптивність під конкретне завдання, гнучкість алгоритмів обробки інформації. Сучасні мікроболометричні технології дозволяють використовувати малогабаритні теплові камери в складі бортової апаратури БПЛА, що забезпечує можливість цілодобового використання подібних систем та використання їх в складних метеоумовах. Проте необхідно зазначити фундаментальні проблеми подібних систем, такі як необхідність використання додаткового каналу вимірювання дальності (лазерного, акустичного або радіолокаційного), необхідність стабілізації зображення для коректної пеленгації об'єктів спостереження, значне уповільнення роботи системи при аналізі відеопослідовностей з високою роздільною здатністю.

Додатково, враховуючи часові затримки, які виникають при кодуванні/декодуванні телеметричного сигналу, необхідно підвищувати ступень автономності БПЛА, оснащених системами оптико-електронного позиціонування та забезпечити зв'язок цих систем з апаратурою керування літальними апаратами з метою уникнення повітряних інцидентів.

До систем оптико-електронного позиціонування часто висуваються противоречиві вимоги. Оскільки задовільнити всі вимоги одна система не може, подібні засоби диференціюються в залежності від типів ЛА, об'єктів

супроводу, радіусу дії, вимог до метеоумов та цілодобового використання. Так існують системи телевізійного, тепловізорного, багатодіапазонного типів, широкопольні, вузькопольні, трансфокаторні та інші види систем оптико-електронного позиціонування. В окремих випадках функції двох або декількох видів систем оптико-електронного позиціонування об'єднуються в одному комплексі. Загальна класифікація систем та комплексів ОЕП наведена на рис.1.1

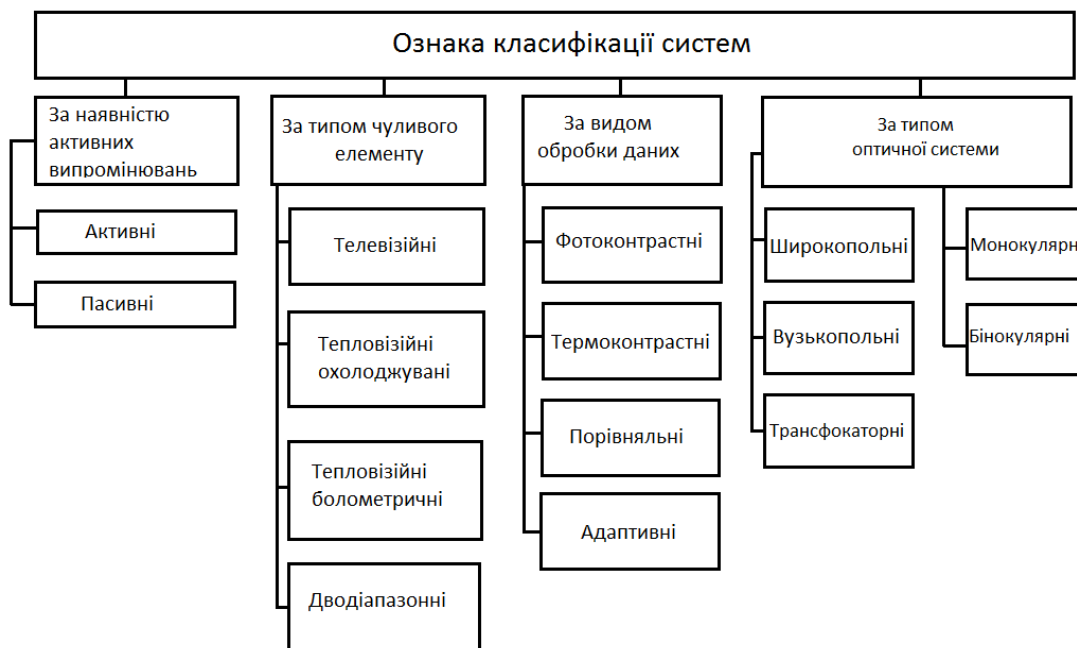


Рис 1.1 Класифікація систем оптико-електронного наведення

Бортові дводіапазонні системи оптико-електронного наведення призначені для знаходження, ідентифікації та супроводу наземних статичних, наземних рухомих та повітряних об'єктів з ефективним радіусом дії $R_{\max} = 35$ км [1]. Інформація, яка отримується від систем оптико-електронного позиціонування, використовується для генерації керуючих сигналів автопілоту, індикації на ІПВ та на фоні закабінного простору (у випадку використання систем ОЕП на пілотованих літальних апаратах) або передається в канали телеметрії та пристрої відеофіксації (у випадку використання в складі бортової апаратури БПЛА). Кутові похибки пеленгації та похибки вимірювання відстані до об'єктів спостереження регламентуються переважно призначенням системи і знаходяться в діапазоні $\Delta_{AZ} = 0,1..0,6^\circ, \Delta_{UM} = 0,1..0,3^\circ, \Delta_D = 2..12$ м [1]. Частота

оновлення координат (КМ та ПА) об'єкту становить 25..200 Гц, швидкість переміщення лінії візування знаходиться в діапазоні $10..60^\circ/\text{сек}$. Аналіз спекру завдань, для яких можуть використовуватись засоби ОЕП показує, що для ефективного функціонування систем в складі бортової апаратури БПЛА необхідно забезпечити радіус дії порядку 5..8 км [1].

Розглядаючи норми проектування систем оптико-електронного позиціонування встановлено наступне.

Бортова система ОЕП повинна виявляти наземні об'єкти з площею 10 м^2 і більше в умовах неоднорідної місцевості в межах простору, що охоплюється робочими кутами $+15-80^\circ$ в вертикальному полі зору та $\pm 40^\circ$ в горизонтальному полі зору.

Похибка у визначенні положення центроїда контуру об'єкта спостереження не повинна перевищувати $\pm 0,2^\circ$.

Абсолютна похибка індикації відстані до об'єкту спостереження не повинна перевищувати $\pm 12 \text{ м}$ при вирішенні завдання початкового позиціонування та $\pm 4 \text{ м}$ для вирішення завдання автоматичного супроводу об'єкта.

Роздільна здатність системи за азимутом повинна бути не гірше $0,1^\circ$.

Похибка визначення відстані повинна бути не гірше 5% ефективного радіуса роботи системи.

Інформація про положення об'єкту супроводу (КМ, ПА) повинна оновлюватись з частотою не менше 10 Гц.

Основні вимоги до перспективних комплексів оптико-електронного позиціонування зведено в таблицю 1.1.

Вимоги до систем оптико-електронного позиціонування

Характеристика		Рекомендоване значення
Ефективний радіус, км		8
Ймовірність сталого супроводу рухомого об'єкту на протязі 180 сек.		0,83
Еквівалентна площа мінімального об'єкту супроводу на ефективному радіусі, м ²		10
Кути поля зору системи	Широке поле, градус	30*40
	Вузьке поле, градус	1.2*1
Діапазон кутів роботи системи стабілізації	Вертикальний, градус	+15 -80
	Горизонтальний, градус	±35
Роздільна здатність:		
за дальністю, м		20м
за азимутом, градус		0,1
Похибка вимірювання дальності:		
в режимі коригованого супроводу, %		12
в режимі автоматичного супроводу, %		4

Системи, які використовуються на даний час, забезпечують технічні характеристики відмінні від нормативних рекомендованих вимог до систем оптико-електронного позиціонування. Відомі наступні типи бортових систем та комплексів ОЕН: И-251 виробництва Красногорського заводу, РФ; EODAIRS, General Dynamics, США; Litening, Rafael, Ізраїль; БТП-300, Красногорський завод, РФ, ОПЭС-29 Уральського заводу ОМП, РФ [2]. Для порівняння технічних характеристик вищезазначених систем, їх зведено до таблиці 1.2.

Порівняльна таблиця різних типів систем оптико-електронного позиціонування

Параметр		И-251	EODAIRS	Litening	БТП-300	ОПЭС-29
Ефективний радіус, км		26	46(?)	60(?)	15	30
Ймовірність сталого супроводу		0.79	0.9	0.84	0.7(?)	0.9 (пов.)
Еквівалентна площа об'єкту, м ²		>6	>5	>5	>10	>10
Швидкість переміщення лінії візування		10	120	90	25	60
Кути поля зору, градус	широке	6	4	4	–	–
	вузьке	0.7	0.8	0.8	0.5	0.35
Діапазон кутів стабілізації, градус	По вертикалі	+15 -76	+15 -90	+60 -60	+30 -60	+ 60 -60
	По горизонталі	+35 -35	360	360	+45 -45	+60 -60
Роздільна здатність, м	За дальністю	6	3	3	–	20
	За азимутом	1.3	1.5	1.5	8	1.2
Похибка вимірювання дальності, м						
В режимі коригованого супроводу		15	5	4	–	15
В режимі автоматичного супроводу		7	5	4	–	15

Аналіз наведених в табл. 1.2 даних показує, що існуючі системи оптико-електронного позиціонування в цілому задовільняють вимогам щодо коректного супроводу об'єктів, але при цьому використовують активний лазерний канал для вимірювання відстані до об'єкту, що збільшує масогабаритні показники, енергетичні витрати та унеможлиблює супровід декількох об'єктів одночасно. Також всі розглянуті вище системи та комплекси мають вузьке поле зору, що накладає обмеження при використанні на малих висотах та відстанях до об'єктів супроводу.

Системи та комплекси оптико-електронного позиціонування працюють в двох режимах: активному та пасивному.

Пасивний режим передбачає прийом та реєстрацію відбитого від поверхні об'єкту природнього випромінювання, власного випромінювання у видимій частині спектру або власного випромінювання в інфрачервоній частині спектру.

На відміну від пасивного режиму, в активному режимі використовується оптичний когерентний генератор, який генерує модульоване випромінювання, яке після відбиття від об'єкту реєструється і декодується системою. Загальна схема активної системи ОЕП наведена на рис 1.1. Цифрами на рисунку позначені: 1 – оптичний когерентний генератор (ОКГ); 2,3 – лінзи вихідного об'єктиву; 4 – ціль; 5 – лінза вхідного об'єктиву; 6 – фоточутливий елемент; I, II – вихідний та вхідний тракт відповідно.

Робота передавального пристрою активних систем з використанням ефекту Доплера аналогічна зі звичайними активними випромінювачами. Відмінність полягає в наявності у вхідному тракті фотоелектронного помножувача, який працює в режимі, аналогічному з балансним змішувачем у радіочастотних пристроях [1]. На ньому проводиться виділення биття, пропорційного швидкості об'єкту. Проте, цей режим не передбачає вимірювання радіальної швидкості об'єкту, що обумовлює використання додаткових засобів для її реєстрації. Загальна схема активної системи з використанням ефекту Доплера наведена на рис 1.2. Цифрами на рисунку

позначені: 1 – ОКГ; 2 – напівпрозоре дзеркало; 3 – дзеркало; 4 – ціль; 5 – фотоелектронний помножувач (ФЕП).

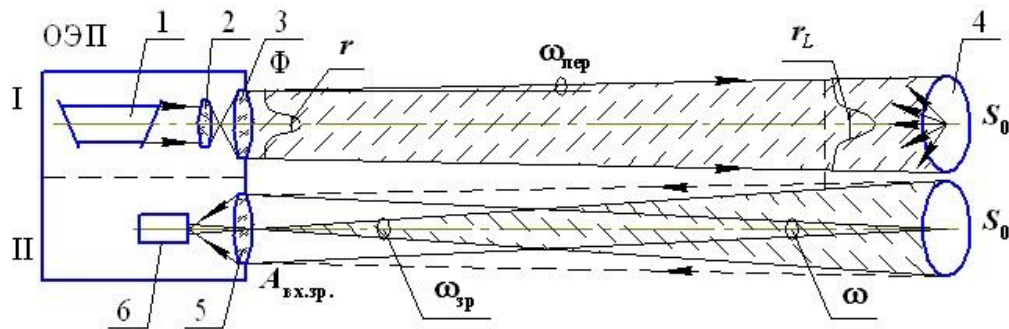


Рис. 1.1. Загальна схема активної системи ОЕП

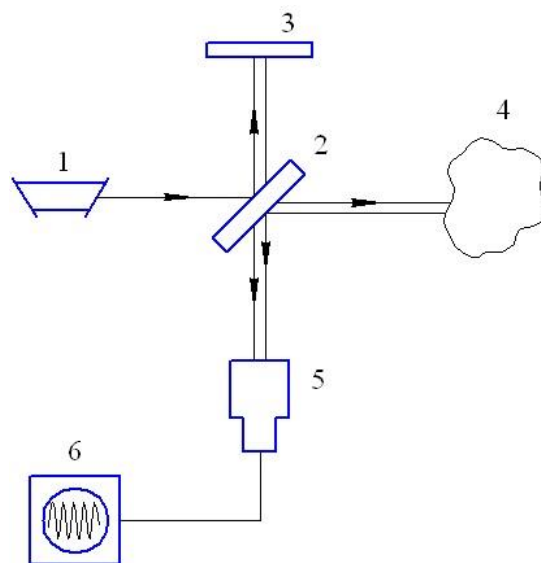


Рис.1.2. Загальна схема активної системи ОЕП з вимірювачем швидкості цілі з використанням ефекту Доплера

Необхідно зауважити, що використання систем з вимірюванням швидкості за допомогою ефекту Доплера на великих відстанях дає суттєву похибку (до 20..46%) у зв'язку з важкістю стабілізації положення об'єктів системи ОЕП при малому розмірі світлової плями. Це є їх суттєвим недоліком, оскільки при генерації керуючих сигналів для підсистеми автоматичного супроводу на межі ефективної дальності невірне оцінювання швидкості руху об'єкту може призвести до виходу його за межі детектування [2].

У зв'язку із вищенаведеним оглядом систем оптико-електронного позиціонування, завданням подальшої роботи є:

- провести аналіз відомих методів детектування, ідентифікації та супроводу рухомих та статичних об'єктів, визначити переваги і недоліки, режими застосування;
- проаналізувати перспективні методи детектування, ідентифікації, супроводу та визначення просторово-швидкісних параметрів рухомих об'єктів спостереження;
- провести удосконалення аналітичних виразів методів попередньої та остаточної обробки відеопотоків систем ОЕП;
- розробити метод виявлення та надійного супроводу наземних і повітряних об'єктів для одно – і багатодіапазонних систем ОЕП;
- дослідити точність удосконаленого методу вимірювання просторових та швидкісних параметрів об'єктів супроводу;
- розробити імітаційну математичну модель, алгоритми комп'ютерної програми та провести математичне моделювання процесу визначення характерних ознак об'єктів супроводу та їх просторово-швидкісних параметрів;
- розробити структурні схеми комплексу оптико-електронного позиціонування, який реалізує удосконалену методику.
 - розробити комплект конструкторської, технологічної та програмної документації для виготовлення дослідного зразка системи оптико-електронного позиціонування.

1.2. Аналіз методів обробки інформації в системах оптико-електронного позиціонування

Як було показано в попередньому розділі, основні функції системи оптико-електронного позиціонування зводяться до вимірювання азимута, кута місця, швидкості та вектору руху об'єкту супроводу. При вирішенні певних завдань, додатково додається вирішення зворотньої геодезичної задачі для отримання географічних координат об'єкту. Якщо вимірювання азимуту та кута місцевості цілком залежить від роздільної здатності фото- чи термочутливого елемента та кутових характеристик об'єктиву, то вимірювання дальності

залежить від застосованих методів дальнометрії. Сучасні комплекси ОЕП використовують імпульсний, фазовий або пасивний стереометричний методи визначення відстані до об'єктів. Швидкість об'єку в активних системах вимірюється з використанням пристроїв, заснованих на ефекті Доплера, у відомих пасивних системах вимірювання швидкості цілі не проводиться[1].

Для всіх систем оптико-електронного позиціонування характерною спільною ознакою є попереднє завдання об'єкту супроводу. Об'єкт може характеризуватись набором унікальних ознак або початковими координатами (в такому випадку необхідно використання додаткових методів автоініціалізації детектора об'єкту).

Основним завданням комплексу ОЕП є супровід та утримання об'єкту в полі зору з постійним оновленням його координат впродовж процесу супроводу. Для цього використовуються наступні способи:

1. Фото- та термоконтрастний – заснований на різному характері відбиття (у випадку фотоконтрастного) випромінювання або власного випромінювання від об'єкту та від оточуючого середовища. В загальному вигляді метод заснований на проведенні порогової бінарізації зображення з подавленням високочастотних шумів. Ефективний для повітряних об'єктів (в обох варіантах), наземних об'єктів у випадку однорідного рельєфу місцевості (у фотоконтрастному варіанті) та неземних об'єктів з власним тепловим випромінюванням (у термоконтрастному варіанті).

2. Метод контурного аналізу – базується на порівнянні виділених контурів об'єкту із заздалегідь відомим шаблоном. Заснований на виділенні градієнтів зображення, детектуванні меж та ланцюгових алгоритмах пошуку контурів. До переваг методу можна віднести можливість ідентифікації об'єктів, автоматичного пошуку. Недоліки – необхідність наявності великої бази даних, висока ймовірність втрати об'єкту супроводу при частковому перекритті зображення стороннім об'єктом.

3. Методи з адаптивними або самонавчальними алгоритмами – засновані на виділенні особливих точок об’єктів супроводу з генерацією розширювальних та урізаючих подій, інваріантні до плавної зміни ракурсу спостереження, часткового перекриття об’єктів, короткочасної втрати об’єкту з поля зору системи ОЕП. Недоліки: необхідність використання великих обчислювальних потужностей, залежність ймовірності вірного пере захоплення ключових ознак від просторового положення носія системи ОЕП.

Спільною ознакою для всіх вищенаведених методів є те, що вимірювання відстані до об’єкту проводиться в активному режимі з використанням опичного когерентного генератора, що збільшує енергетичні витрати і дозволяє одночасно вимірювати відстань лише для одного об’єкту.

Для визначення методу або комбінації методів оптико-електронного позиціонування, які забезпечують найбільш сталий супровід проведемо більш детальний аналіз вищенаведених методів а також методів вимірювання відстані до об’єктів супроводу.

1.2.1. Аналіз методів фото – та термоконтрастного позиціонування

Як було зазначено вище, цей метод базується на пороговій бінарзації зображення, отриманого від телевізійної чи тепловізійної камери.

В загальному, бінарзація – операція порогового розділення, яка в результаті дає бінарне зображення з метою радикального зменшення інформації для подальшої обробки [3]. Бінарзація проводиться різними способами. В практиці побудови систем оптико-електронного позиціонування використовуються наступні:

Бінарзація з нижнім порогом.

Бінарзація з нижнім порогом є найбільш спрощеним варіантом операції, в якому використовується лише одне значення порогу:

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, & f(m,n) \geq t \\ 1, & f(m,n) \leq t \end{cases} \quad (1.1)$$

, де t – фіксоване значення порогу бінарзації, $f(m,n)$ - інтенсивність пікселя з координатами (m,n) . Бінарзація з нижнім порогом на сьогоднішній день використовується виключно для систем з термоконтрастним пеленгатором для виявлення повітряних об'єктів та наземної техніки.

Бінарзація з подвійним обмеженням (смугова бінарзація) в загальному вигляді записується наступним чином:

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, f(m,n) \geq t_1 \\ 1, t_1 < f(m,n) \leq t_2 \\ 0, f(m,n) \geq t_2 \end{cases} \quad (1.2)$$

Цей метод використовується в термоконтрастному пеленгуванні для селектування об'єктів за інтенсивністю теплового випромінювання.

Неповна порогова обробка характеризується тим, що вихідне зображення не є повністю бінаризованим, однак цей метод дозволяє скоротити обсяг інформації видаленням однорідного фону. Використовується переважно в системах попередження повітряних зіткнень для усунення фону від хмар, а також при термоконтрастному позиціонуванні наземних об'єктів однорідному тепловому характері місцевості. В загальному вигляді записується наступним чином:

$$f'(m,n) = \begin{cases} f(m,n), f(m,n) > t \\ 0, f(m,n) \leq t \end{cases} \quad (1.3)$$

Вищезазначені методи використовуються переважно системами, в яких габаритні розміри не дозволяють використовувати повноцінні обчислювальні пристрої.

Більш досконаліми методами порогової бінарзації є наступні:

Метод Отса – відноситься до локальних методів та використовує гістограму розподілу яскравості растрового зображенні [3]. Гістограма будується за значеннями $p_i = n_i / N$, де N – загальна кількість пікселів зображення, n_i - кількість пікселів з рівнем яскравості i . Діапазон яскравості

ділиться на два класи за допомогою порогового значення яскравості k , k - ціле значення від 0 до L. Кожному класу відповідають частоти ω_0, ω_1 :

$$\omega_0(k) = \sum_{i=1}^k p_i, \omega_1(k) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega_0(k), \mu_0(k) = \sum_{i=1}^k \frac{ip_i}{\omega_0}, \mu_1(k) = \sum_{i=k+1}^L \frac{ip_i}{\omega_1} \quad (1.4)$$

Далі розраховуються максимальні значення оцінки якості розділення на дві частини. Для цього розраховуються відповідні значення дисперсії:

$$\sigma_k^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (1.5)$$

, де σ_k^2 - міжкласова дисперсія, σ_s^2 - загальна дисперсія для всього зображення, отримується як середньоквадратичне значення міжкласових дисперсій. Середній рівень для двох класів зображення розраховується наступним чином:

$$\eta(k) = \max_{k=1}^{L-1} \left(\frac{\sigma_k^2(k)}{\sigma_s^2} \right) \quad (1.6)$$

Цей метод використовується як в термоконтрастному, так і в фотоконтрастному позиціонуванні, дозволяє відфільтрувати локальні максимуми та суттєво зменшити об'єм інформації для подальшої обробки.

Визначення порога на основі градієнта яскравості зображення базується на припущенні щодо розділення зображення на два класи: об'єкт і фон. Першим кроком обчислюється модуль градієнта яскравості для кожного пікселя зображення:

$$G(m, n) = \max\{|G_m(m, n)|, |G_n(m, n)|\}, \quad (1.7)$$

$$G_m(m, n) = f(m+1, n) - f(m-1, n)$$

$$G_n(m, n) = f(m, n+1) - f(m, n-1)$$

Наступним кроком обчислюється безпосередньо поріг бінарізації:

$$t = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) G(m, n)}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} G(m, n)} \quad (1.8)$$

Цей метод так само використовується в обох варіантах контрастного пошуку об'єктів і добре зарекомендував себе в умовах супроводу об'єктів у вузькому полі зору.

Глобальна порогова обробка такими методами як метод Бернсена, метод Ейквіла, метод Ніблека, метод Яновіца і Брукштейна не знайшли застосування в системах оптико-електронного позиціонування у зв'язку з великими обчислювальними затратами [3].

Аналіз методів фото- та термоконтрастного позиціонування показує, що необхідною умовою детектування та сталого супроводу цілі є однорідність фону, що не дозволяє виконувати пеленгування об'єктів в умовах складної місцевості або потрапляння в кадр локальних джерел випромінювання.

1.2.2. Аналіз методів контурно-порівняльного позиціонування

Метод порівняння контурів є одним з найбільш широко розповсюджених методів ідентифікації та супроводу об'єктів. Основними завданням методу є виділення контурів та введення певної метрики, яка дозволяє проводити класифікацію контурів.

Задача виділення контурів вирішується в достатньо повному обсязі за допомогою відповідних детекторів та операторів, таких як оператор Собеля або детектор Канні [4].

Розпізнавання контурів в системах оптико-електронного позиціонування виконується наступними способами:

Дескриптори Фур'є.

Для контура, що складається з N пікселів, пронумерованих від 0 до $N-1$, де піксель, що має номер k відповідає координатам (x_k, y_k) , контур описується наступним виразом з параметричними координатами $x(k), y(k)$:

$$x(k) = x_k, y(k) = y_k \quad (1.9)$$

Застосовуючи перетворення Фур'є до кожного з цих виразів, отримаємо дві спектральні характеристики:

$$ax(i) = F(x(k)), ay(i) = F(y(k)) \quad (1.10)$$

Для кінцевого числа пікселів контуру можна застосувати дискретне перетворення Фур'є. Незважаючи на те, що дискретне перетворення передбачає

роботу з періодичною функцією, при роботі з замкненим контуром можна розглядати сам контур як одинарний прохід періодичної функції. Для зручності подальшої роботи пара координат (x, y) точки в декартовій системі переводиться в одне комплексне число:

$$s(k) = x(k) + iy(k) \quad (1.11)$$

Даний метод отримав широке розповсюдження завдяки тому, що в режимі супроводу для ідентифікації об'єкта потрібно лише декілька перших компонент $F(s(k))$, а перетворення Фур'є легко нормується для масштабування, повороту та початкової точки межі. Зсув контура відповідає збільшенню значень координат на деяку константу, тобто на компоненту, що відповідає нульовій частоті, яка не характеризує сам контур. Обертання контуру відповідає помноженню дескриптора на $e^{i\theta}$, масштабування контура призводить до помноження дескриптора на масштабний коефіцієнт.

Дескриптор Фур'є застосовується в комплексах оптико-електронного позиціонування з попереднім вказанням координат об'єкту супроводу, коли ключові ознаки об'єкту спостереження необхідно отримувати вже в першому кадрі [4].

Порівняння контурів за допомогою обчислення моментів.

Двомірними моментами порядку $(p+q)$ спільної густини ймовірності ϵ вирази вигляду:

$$m_{pq} = \iint_D x^p y^q p(x, y) dx dy, \quad p, q = 1, 2, \dots, \quad (1.12)$$

, де D – область зображення, для якої обчислюються моменти. Для опису зображення, спільна ймовірність замінюється функцією яскравості зображення $f(x, y)$. Перехід до центральних моментів забезпечує інваріантність двовимірних моментів до зсуву:

$$\mu_{pq} = \int_D (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy, \quad p, q = 1, 2, 3, \dots, \quad (1.13)$$

,де $\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$ - координати центру області D, μ_{pq} - центральний момент контуру, p, q - порядок моменту.

Перехід до нормалізованих центральних моментів забезпечує інваріантність відносно масштабування:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00} \frac{p+q}{2} + 1} \quad (1.14)$$

Значення функцій S1-S7 інваріантні до обертання зображення:

$$\begin{aligned} S_1 &= \eta_{20} + \eta_{02}, \\ S_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2, \\ S_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (\eta_{03} - 3\eta_{21})^2, \\ S_4 &= (\eta_{30} + \eta_{21})^2, \\ S_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{03} + \eta_{21})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{03} + \eta_{21})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] \\ S_6 &= (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{21}), \\ S_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{03} + \eta_{21})^2] - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{21})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] \end{aligned} \quad (1.15)$$

В якості міри схожості двох зображень (A і B) переважно обирають наступну функцію:

$$I(A, B) = \sum_{i=1..7} \frac{1}{m_i^A} - \frac{1}{m_i^B} \quad (1.16)$$

,де $m_i^A = \text{sign}(h_i^A) \lg(h_i^A), m_i^B = \text{sign}(h_i^B) \lg(h_i^B)$, де h_i^A, h_i^B - моменти зображень A і B відповідно.

Цей метод знайшов широке застосування в практиці оптико-електронного позиціонування та контурного аналізу взагалі. Перевагами методу є інваріантність до масштабування та обертання об'єкту, до недоліків можна віднести високу ймовірність втрати об'єкту під час його маневрування або після короткочасної втрати візуального контакту.

Метод побудови полярних діаграм засновано на перерахунку координат точок, які належать до контуру, з прямокутної в полярну систему координат[4]. Побудова полярної діаграми для початкової точки зведена до підрахунку кількості точок контура, які належать до того чи іншого сектора. На рис.1.3

наведено перший етап методу – розбиття зображення на сектори. На рис.1.4. наведено діаграму, яка показує розподіл точок в контурі та не залежить від масштабу контура, що розглядається.

Задачу порівняння двох контурів А і В, заданих діаграмами D_A, D_B відповідно, можна розглядати як задачу мінімізації:

$$I_{diff} = \min_{j=0 \dots N-1} \left(\sum_{i=0}^{N-1} D_{A_i} - D_{B_j} \right) \quad (1.17)$$

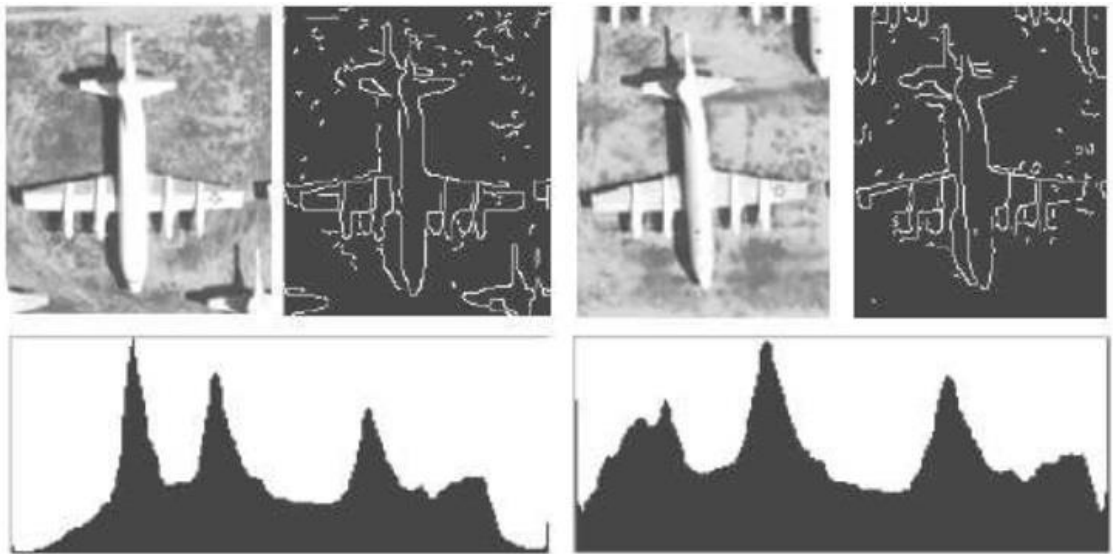


Рис.1.3.Розбиття зображення на сектори при контурному аналізі методом побудови полярної діаграми

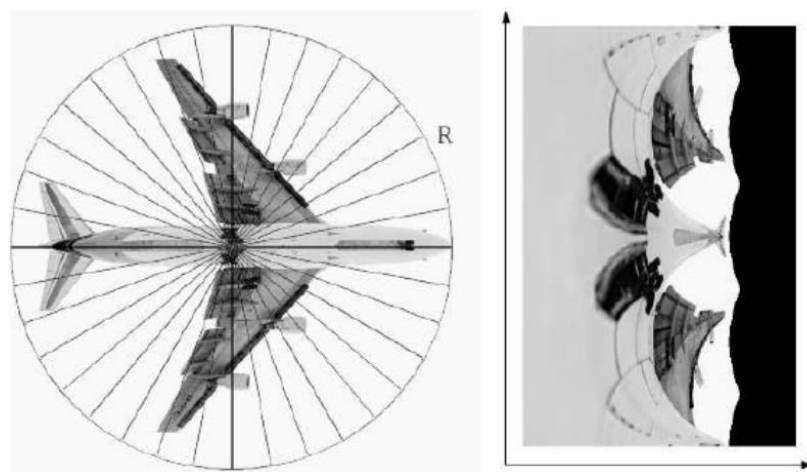


Рис.1.4.Порівняльні даіаграми розподілу точок контурів

Розглянуті методи контурного аналізу широко зстосовуються в програмному забезпеченні систем та комплексів ОЕП. Характерними перевагами методів є можливість автоматичного пошуку однотипних об'єктів, інваріантність до морфологічних змін зображення, відносна простота апаратної реалізації. Проте, контурно-порівняльні методи потребують наявності шаблону для пошуку об'єкту, або точного початкового позиціонування, що суттєво обмежує можливості та збільшує інформаційне навантаження оператора системи ОЕП.

1.2.3. Аналіз методів позиціонування з адаптивними алгоритмами

Методи позиціонування з адаптивними або самонавчальними алгоритмами будуються на основі детектування та вивчення переміщень певних особливих точок об'єктів, або ключових точок (КТ). Вони забезпечують достатню швидкість обробки відеопослідовності. При цьому вони не потребують заздалегідь занесеного в базу даних системи шаблону та створюють таку базу в процесі супроводу цілі. При цьому, в процесі маневрування об'єкта до бази даних додаються нові КТ, що дозволяє при короткочасній втраті візуального контакту поновити супровід незалежно від ракурсу спостереження.

Методика адаптивного супроводу включає три основних етапи: детектування КТ, створення дескриптора КТ, порівняння перезахоплених ключових точок з попередніми на основі дескриптора [3].

Серед найбільш вживаних детекторів ключових точок слід відмітити такі як FAST, Oriented FAST, Accelerated KAZE, SIFT, SURF. Дескриптори – BRIEF, Rotated BRIEF, BRISK, KAZE, M-LDB [5]. Розглянемо основні комбінації детекторів та дескрипторів ключових точок.

ORB - Oriental FAST and Rotated BRIEF. Основою даного алгоритму є комбінація детектора FAST (Features Accelerated Segment Test) [5] та

дескриптора BRIEF (Binary Robust Impedant Elementary Features)[6] з деякими модифікаціями.

Детектор даного алгоритму базується на пошуку кутових точок об'єкта. Для цього розглядаються коло в 16 пікселів відносно кожного пікселя p .

Точка p вважається потенціально ключовою, якщо існує N пікселів в колі, яскравість яких перевищує значення $I_p + t$, або навпаки менша за значення $I_p - t$, де I_p - яскравість пікселя p , а t - фіксоване порогове значення. При виконанні цієї умови проводиться дослідження значень яскравості в пікселях з номерами 1,5,9,13 (рис.1.5). Якщо для трьох пікселів з чотирьох виконується умова $I_i < I_p - t$ або $I_i > I_p + t, i=1...4$, точка p вважається особливою точкою зображення.

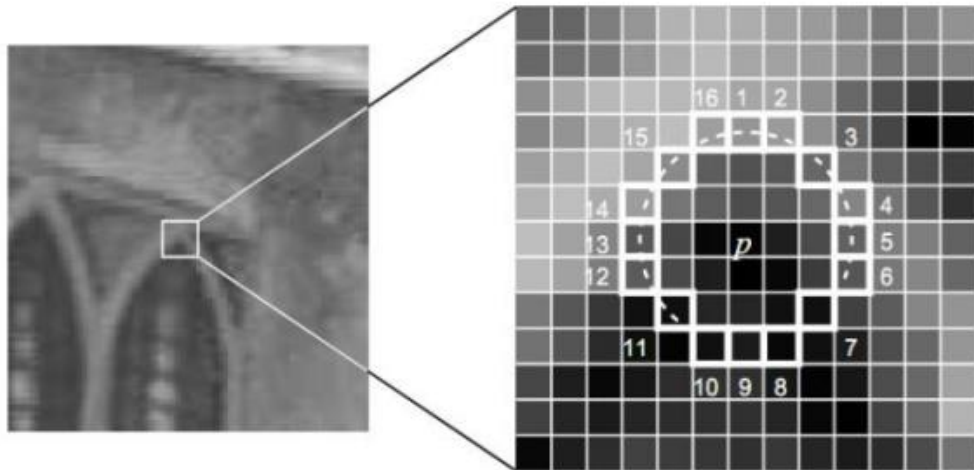


Рис.1.5. Приклад роботи детектора ключових точок FAST

Такий підхід дозволяє дуже швидко виділити ключові точки зображення, проте в деяких випадках можливе визначення різних особливостей в межах одного кола.

Алгоритм ORB дозволяє опрацьовувати 500 ключових точок, в разі більшої кількості застосовується детектор кутів Харріса[13] для виключення найменш контрастних.

Для інваріантності до масштабування використовується вищенаведений алгоритм на піраміді Гауса, октавами якої c_i є початкове зображення c_0 , стинуте з лінійним кроком.

Введення параметру кутової орієнтації дозволяє отримати стійке детектування КТ при обертанні об'єкта. Цей параметр засновано на обчисленні градієнта яскравості відносно центра КТ, при якому напрямок найбільшого градієнта призначається орієнтацією КТ θ

Дескриптор алгоритму BRIEF представлено у вигляді вектора довжиною 256, який складається з результатів бінарних тестів навколо КТ. В околиці точки розміром 31×31 піксель порівнюються середні значення яскравості між x та y , де x, y – області 5×5 пікселів:

$$\tau(I; x, y) = \begin{cases} 1, I_x < I_y \\ 0, I_x > I_y \end{cases} \quad (1.18)$$

, де I – середня яскравість обраної області. Для досягнення інваріантності до обертання область обчислення дескриптора орієнтується відносно θ ключової точки.

Всі 256 наборів x_i, y_i формують матрицю S розмірністю $2 \times n$. Далі S за допомогою матриці напрямляючих косинусів R_θ орієнтується відносно кута θ ключової точки:

$$S_\theta = R_\theta S \quad (1.19)$$

, а сам вектор дескриптора записується в наступному вигляді:

$$g_n(I, \theta) = f_n(I) | (x_i, y_i) \in S_\theta \quad (1.20)$$

,де

$$f_n(I) = \sum_{i=1}^n 2^{i-1} \tau(I; x_i, y_i) \quad (1.21)$$

Даний метод використовується в системах оптико-електронного позиціонування на малорозмірних ЛА, габарити яких не дозволяють розмістити

повноцінну обчислювальну систему і до яких не висувається вимога одночасного супроводу кількох об'єктів.

BRISK – Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. Даний метод працює аналогічно з попереднім, але для досягнення інваріантності до масштабування об'єктів запропоновано обрати ключову точку в чотирьохоктавній піраміді Гауса з максимальним значенням інтенсивності [5]. На рис. 1.6. наведено приклад пошуку ключової точки в піраміді, що складається з чотирьох основних октав c_i та чотирьох внутрішніх октав d_i , $i=0..3$. Октави формуються стисканням вхідного зображення c_0 в 2^i рази. Внутрішні октави розташовані між c_i та c_{i+1} і отримуються шляхом стискання c_0 в $\frac{2}{3}2^i$ рази. Пошук особливих точок здійснюється за допомогою детектора FAST.

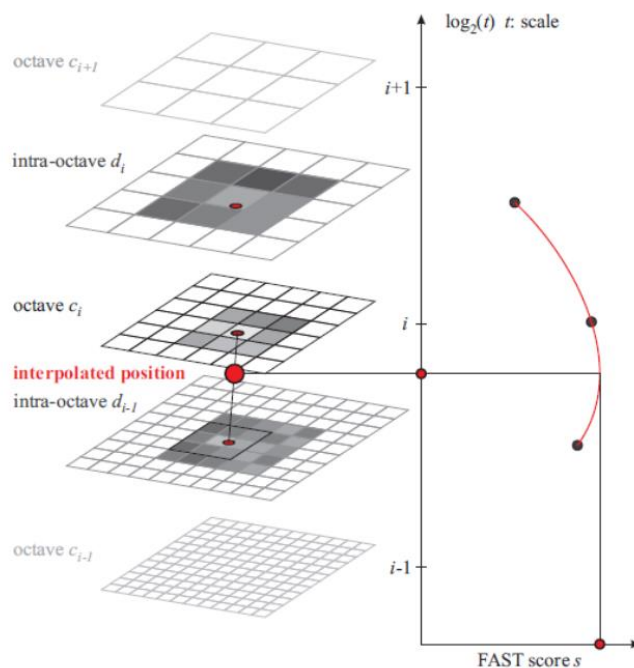


Рис 1.6. Приклад пошуку КТ з найбільшою інтенсивністю в методі BRISK

Дескриптор цього методу розбиває область навколо КТ на 60 ділянок p (рис.1.7). Множина A ділянок записується в наступному вигляді:

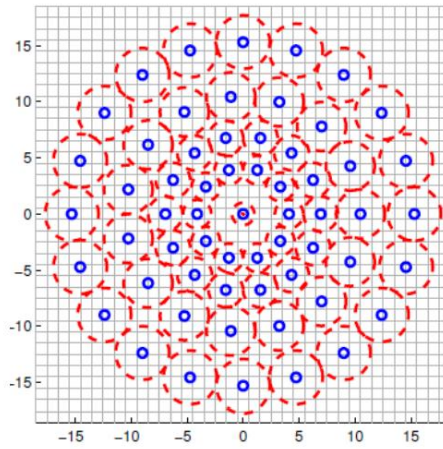
$$A = \{(p_i, p_j) \in R^2 \times R^2 \mid i < N \wedge j < i \wedge i, j \in N\} \quad (1.22)$$

Множина A розбивається на дві підмножини:

$$\begin{aligned} S &= \{(p_i, p_j) \in A \mid \|p_j - p_i\| < \delta_{\max}\} \subseteq A \\ L &= \{(p_i, p_j) \in A \mid \|p_j - p_i\| > \delta_{\min}\} \subseteq A \end{aligned} \quad (1.23)$$

,де $\delta_{\min} = 13,67t$, $\delta_{\max} = 9,75t$, t - розмір ключової точки.

Рис.1.7. Область обчислення дескриптора BRISK



Наступним кроком обчислюється значення градієнта множини L :

$$g = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \end{pmatrix} = \frac{1}{|L|} \sum_{p_i, p_j \in L} \left[(p_j - p_i) \frac{I(p_j, \sigma_j) - I(p_i, \sigma_i)}{\|p_j - p_i\|^2} \right] \quad (1.24)$$

Дескриптор складається з бінарної строки довжиною 512, яка заповнюється результатами бінарних тестів, проведених в множині S :

$$b = \begin{cases} 1, I(p_j^\alpha, \sigma_j) > I(p_i^\alpha, \sigma_i) \\ 0, I(p_j^\alpha, \sigma_j) < I(p_i^\alpha, \sigma_i) \end{cases} \quad (1.25)$$

,де $I(p_i^\alpha, \sigma_i)$ - інтенсивність околиці радіуса σ_i точки p_i , $\alpha = \arctg\left(\frac{g_y}{g_x}\right)$ - кут напрямку градієнта.

Вищенаведений метод дає більшу стійкість супроводу відносно попереднього, особливо на паралельних курсах ЛА та об'єкту супроводу, однак потребує більших обчислювальних потужностей.

AKAZE – Accelerated-KAZE. При розробці цього методу найбільшу увагу приділяли швидкості роботи як детектора, так і дескриптора. При цьому КТ та їх дескриптори мали задовільняти високим показникам точності при порівнянні зображень.

Застосування алгоритму FED – Fast Explicit Diffusion [12] відносно пірамідальної схеми дозволяє побудувати нелінійну багатомасштабну піраміду. Використання нелінійного масштабування дозволяє пришвидчити знаходження потрібної КТ відносно Гаусової піраміди.

Обчислення коефіцієнту масштабування базується на зміні яскравості при стисканні зображення [6]. Для побудови детектора для кожної октави L^i в піраміді обчислюється визначник Гессіана:

$$L_{Hessian}^i = \sigma_{i,norm}^2 (L_{xx}^i L_{yy}^i - L_{xy}^i L_{yx}^i) \quad (1.26)$$

, де $\sigma_{i,norm} = \frac{\sigma_i}{2^{\sigma_i}}$ - нормований відносно масштаба коефіцієнт з урахуванням розміру октави σ_i .

Похідні другого порядку обчислюються за допомогою фільтра Шарпа [12]. Такий підхід дозволяє врахувати орієнтацію ключових точок. Таким чином знаходяться такі точки в октаві, значення фільтра яких вище певного порогу та є найбільшим в околиці точки 3×3 пікселя.

Після цього для кожної точки з потенціальних максимумів порівнюється її значення з результатами найближчих октав. Розташування ключової точки оцінюється з субпіксельною точністю відповідно до квадратичної функції Гессіана в області 3×3 пікселя для пошуку максимуму.

Цей метод вважається одним з найбільш точних і швидких. З недоліків методу необхідно відмітити слабку стійкість до абераційних викривлень при переході КТ на периферійну частину кадру в умовах інтенсивного маневрування носія системи оптико-електронного позиціонування.

1.3. Оптико-електронні методи вимірювання дальності та швидкості об'єктів

Окрім завдання визначення кутового положення об'єкту супроводу (пеленгування) , необхідним є знаходження відстані до об'єкту та в ряді випадків його швидкості. Знання початкових координат та вектору швидкості дозволяє розраховувати положення об'єкту у наступні моменти часу [10], що дозволить спрогнозувати переміщення області супроводу в разі короткочасної втрати візуального контакту.

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 [1].

Блок-схема активного оптико-електронного локатора, що використовує імпульсний метод наведена на рис. 1.8. Цифрами позначені: 1 – призма; 2 – модулятор; 3 – напівпрозоре дзеркало; 4 – світлоділльник; 5 – приймально-передаюча 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.

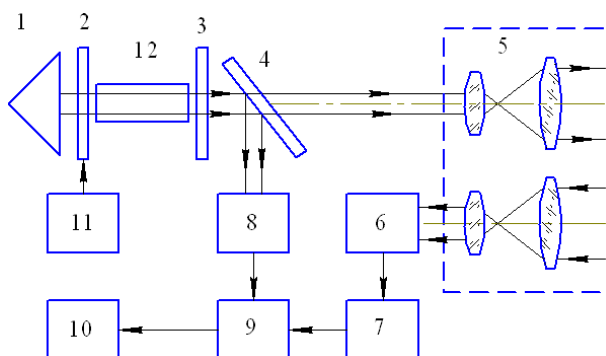


Рис.1.8. Блок-схема лазерного локатора з використанням імпульсного методу вимірювання дальності.

В разі використання імпульсного оптичного локатора, вираз для визначення дальності має наступний вигляд:

$$l = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (1.27)$$

Похибка визначення дальності описується наступним співвідношенням:

$$\Delta l = \frac{\Delta c \cdot \Delta t}{2} + \frac{c}{2} \delta(\Delta t) \quad (1.28)$$

, де l - відстань, що вимірюється, Δt - час проходження сигналу, $\delta(\Delta t)$ - похибка вимірювання часового проміжку. Точність пристроїв вимірювання дальності такого типу в значній мірі залежить від синхронізації елементів схеми, стабільності опорного генератора, масштабу та способу відліку. На сьогоднішній день імпульсні оптичні системи майже не використовуються.

Активні оптико-електронні системи, що вимірюють відстань фазовим методом знайшли більш широке застосування. Блок-схема оптико-електронного локатора з фазовим методом визначення дальності наведена на рис.1.9. Цифрами на рисунку позначені: 1 – когерентний генератор; 2 – модулятор; 3 – оптична система; 4 – фотоелектронний підсилювач; 5 – підсилювач; 6 – фазометр; 7 – генератор модулятора; 8 – індикатор дальності; 9 – індикатор швидкості. Відбитий від цілі сигнал потрапляє на приймально – передаючий пристрій оптичного дальноміра і перетворюється в електричний сигнал:

$$u_2 = u_{m2} \sin[\omega_M(t - t_L) + \varphi_{01} - \varphi_D - \varphi_{OT}] \quad (1.29)$$

, де φ_{OT} - кут зсуву фази масштабного коливання, що виникає при відбитті від об'єкта складної форми, φ_D - запізнення фази масштабного коливання в колах оптичного дальноміру, ω_M - частота модуляції.

Відстань до об'єкту розраховується за співвідношенням:

$$l = \frac{c}{2\omega_M} (\varphi_p - \varphi_D - \varphi_{OT}) \quad (1.30)$$

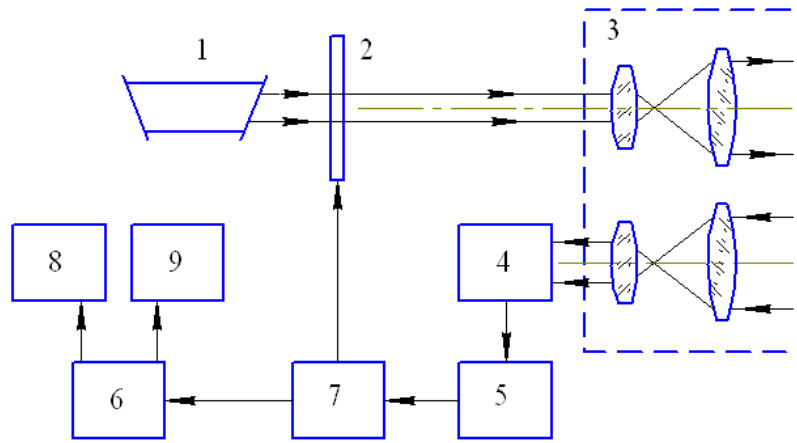


Рис.1.9. Блок-схема лазерного локатора з використанням фазового методу вимірювання дальності.

Системи визначення дальності з використанням стереовідеопотоку базуються на визначенні різниці кутів потрапляння об'єкту в об'єктиви камер, що утворюють стереопару. Такий спосіб вимірювання дальності є пасивним, а отже має переваги відносно вищенаведених, але потребує значних обчислювальних витрат.

Структурну схему оптико-електронного вимірювача швидкості на ефекті Доплера наведено на рис.1.2. Визначення швидкості цілі проводиться за співвідношенням:

$$\Delta \nu = \frac{2\nu V}{c} \quad (1.31)$$

, де $\Delta \nu$ - величина доплеровського зсуву частоти.

1.4. Метод визначення відстаней до множини об'єктів за допомогою аналізу горизонтальних та вертикальних стереопар.

Метод визначення відстані до об'єктів за зображеннями, отриманими за допомогою стереозору, є одним з найперспективніших варіантів багатоканального вимірювання дальності [8]. У випадку двох ідентичних камер з паралельними оптичними вісями, відстань до точки визначається за співвідношенням (1.32):

$$r_i = \frac{fd}{x_1 - x_2} \quad (1.32)$$

, де f - фокусна відстань камери, d - відстань між камерами (база), x_1, x_2 - координати проєкцій на лівому та правому зображенні відповідно. Для більшої зручності, співвідношення (1.32) можна представити в наступному вигляді:

$$r_i = \frac{dH}{\operatorname{tg}\alpha(x_1 - x_2)} \quad (1.33)$$

, де H - горизонтальна роздільна здатність, α - кут огляду камери. В разі використання формули (1.33) вважається, що зображення з лівої та правої камери ректифіковані, що накладає суттєві технологічні обмеження на взаємне розташування камер або вузла оптичного розділення. На рис.1.10 наведено залежність відстані до об'єкта вимірювання від різниці зображень, отриманих зі стереокамер.

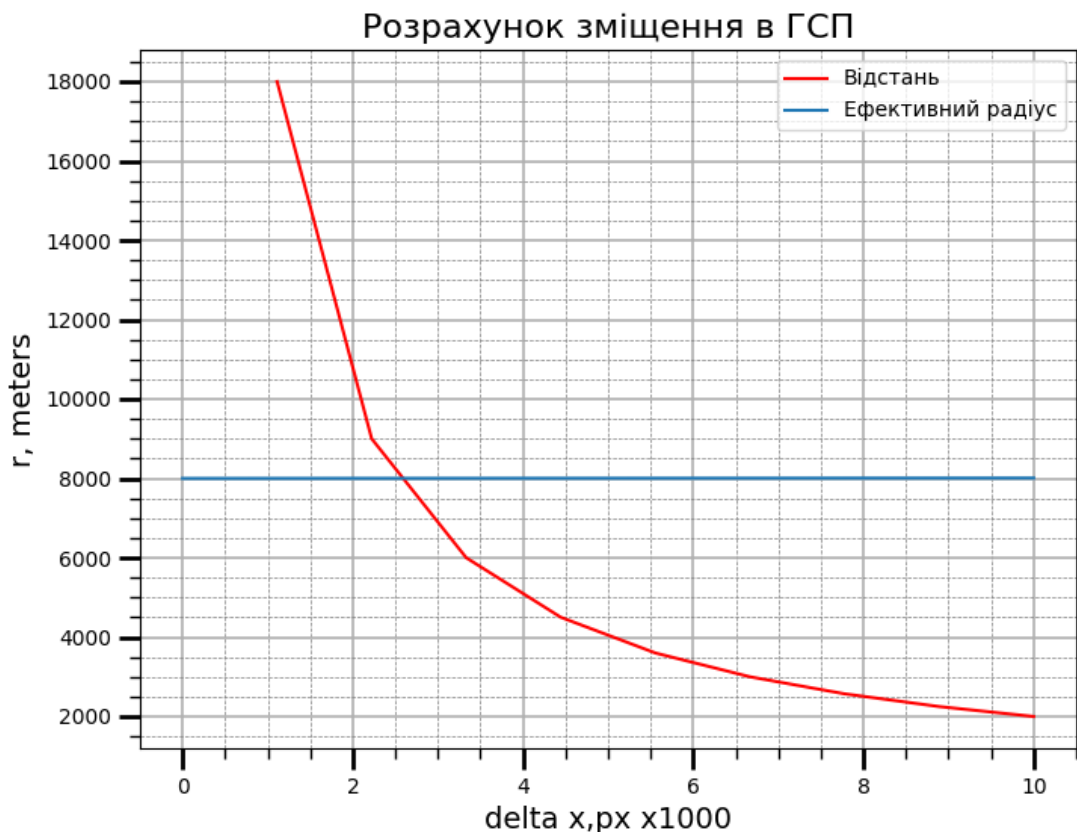


Рис.1.10. Залежність відстані, що вимірюється від різниці координат ціли в правому і лівому кадрах стереопари.

Додатково, похибка вимірювання відстані в стереопарі залежить від геометричних розмірів об'єкту супроводу. Приклад такої залежності наведено на рис. 1.11.

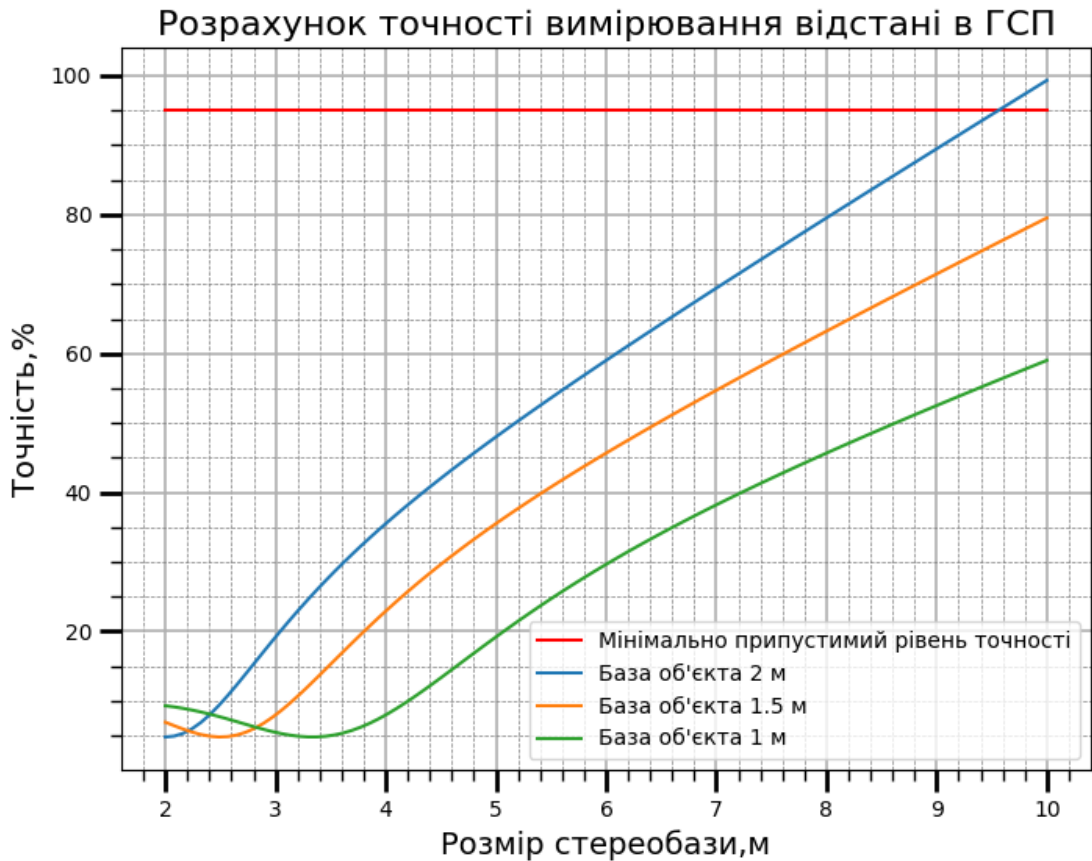


Рис.1.11. Залежність похибки методу стереозору від розміру бази до об'єкту для різних розмірів об'єктів при роботі на межі ефективного радіуса.

З наведеної на рис.1.11. залежності видно, що забезпечення необхідних характеристик точності при позиціонуванні об'єктів за допомогою класичного стереоскопічного методу в ефективному радіусі дії потребує розміру стереобазису порядку 9,8 м, що при використанні таких систем в складі бортової апаратури малорозмірних БПЛА є неможливим.

Альтернативним способом створення стереопари є використання власного переміщення літального апарату. Такий спосіб забезпечує необхідну стереобазу при переміщеннях ЛА у висотній та курсовій площинах та наявності в складі бортової апаратури високопрецизійних датчиків кутових та

лінійних швидкостей, за допомогою яких компенсується кутове зміщення оптичної вісі камери та обчислюється розмір стереобазис між двома відібраними кадрами, надає можливість ефективно проводити реконструкцію карти глибини стереопари.

Підсумовуючи вищезазначене, можна стверджувати що метод визначення дальності за допомогою аналізу стереозображень є перспективним, забезпечує пасивне вимірювання відстані до багатьох об'єктів супроводу, однак потребує доопрацювання в частині обробки кадрів стереопари з метою підвищення стійкості до кутового розугодження та неоднозначності знаходження максимуму функції відгуку.

Одним зі шляхів вирішення проблеми знаходження карти глибини в неректифікованих стереопарах є використання методу оптичного потоку. Метод дозволяє оцінювати зсув кожної точки зображення (для повного ОП) або ключових точок зображення (для вибіркового ОП) на проективній площині, що забезпечує можливість роботи в умовах неповної ректифікації кадрів стереопари з внесенням відповідних поправок в результат обчислення. Єдиним суттєвим недоліком всіх методів розрахунку ОП є великий обсяг обчислювальних витрат, що призводить до уповільнення роботи системи в цілому. Але оскільки метод забезпечує найбільш коректні результати при обчисленні карти глибини зображень і є завадостійким, доцільно розглянути шляхи удосконалення саме для пристроїв оптико-електронного позиціонування, алгоритми роботи яких засновані на аналізі оптичного потоку.

Висновки до розділу 1

1. Проведено дослідження відомих систем оптико-електронного наведення. В результаті дослідження встановлено, що система оптико-електронного нпозиціонування повинна забезпечувати ефективний радіус роботи не менше за 8 км, вимірювання дальності, азимуту та кута місця із похибкою не більше 5% м за каналом вимірювання відстані та $0,2^\circ$ пеленгом, роздільну здатність 20

м за дальністю та $0,1^\circ$ за азимутом. Проте, відомі системи та комплекси ОЕП не в повній мірі задовольняють вимогам які висувають до бортових систем оптико-електронного позиціонування.

2. Усі засоби оптико-електронного позиціонування мають два режими роботи: пасивний та активний. В пасивному режимі встановлення просторового положення об'єкту супроводу може відбуватися фото- та термоконтрастним способами, способами контурного аналізу, за допомогою адаптивних (самонавчальних) алгоритмів супроводу.

3. Встановлено, що кожен з цих способів має певні недоліки, для усунення яких необхідно розглядати комбіновані методи позиціонування, які дозволять збільшити ймовірність сталого супроводу об'єктів, автоматизувати процес початкової ініціалізації алгоритмів супроводу та знизити інформаційну навантаженість оператора системи ОЕН.

4. Для визначення дальності об'єктів відомо три основні групи методи: фазові, імпульсні та пасивні стереометричні. На сьогоднішній день найбільшу точність мають фазові методи, але недоліки, пов'язані з принциповими та конструктивними особливостями подібних пристроїв обумовлюють необхідність переходу до багатоканальних пасивних методів вимірювання дальності.

5. Розглянутий стереоскопічний метод отримання карти глибини може забезпечувати необхідну точність вимірювань лише за умови великої стереобазиса. Оскільки технічна реалізація рознесення камер на відстань порядку десяти метрів на борту малорозмірного ЛА неможлива, було розглянуто метод створення стереобазиса за рахунок власного переміщення ЛА. Для уникнення необхідності ректифікації стереопари було вирішено використовувати метод отримання карти глибини за допомогою розрахунку оптичного потоку.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТА ОЦІНЮВАННЯ МЕТОДІВ СУПРОВОДУ ОБ'ЄКТІВ, ЗАСНОВАНИХ НА ОБЧИСЛЕННІ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ.

Завданням систем оптико-електронного позиціонування є визначення пеленгу, дальності та швидкості об'єктів, їх ідентифікація та супровід. Згідно вимог, що пред'являються до сучасних систем ОЕП, необхідно підвищувати точність, швидкість обробки, роздільну здатність вимірювань з одночасною мінімізацією обчислювальних витрат.

Класичні методи ОЕП, такі як фото- та термоконтрастний, метод контурного порівняння, метод визначення положення об'єктів за ключовими точками не в повній мірі відповідають вимогам до сучасних комплексів та потребують додаткового обладнання для вимірювання відстані. Отже, існує необхідність введення комбінованого методу, який би дозволив проводити супровід об'єктів в тривимірній системі координат за результатами обробки стереозображення, використовуючи при цьому базу, утворену за рахунок переміщення ЛА-носія системи.

Такий метод можна побудувати на основі відомих методів розрахунку оптичного потоку, доповнюючи їх інформацією щодо переміщення камери в просторі. Також інформація щодо зміни кутового положення камери може бути використана для компенсації кутових зсувів кадру та зменшення піраміди масштабів кадру.

Додатково існує необхідність розглянути випадок, коли наближення літального апарату до об'єкту спостереження носить суто зустрічний характер (наприклад, при використанні стабілізованої камери в стабільних атмосферних умовах), що ускладнює отримання необхідного паралаксу для побудови карти глибини з необхідною точністю.

Таким чином, завданням даного розділу є розвиток обраного методу комбінованого оптико-електронного наведення, вивчення факторів, впливаючих на сталість супроводу об'єктів і створення методу кількісного

оцінювання систем оптико-електронного позиціонування, алгоритми роботи яких засновані на обчисленні оптичного потоку.

2.1. Вибір методів побудови оптичного потоку для визначення просторового положення об'єктів в системах оптико-електронного позиціонування.

Для комплексного вирішення задачі оптико-електронного позиціонування на сьогоднішній день розроблено велику кількість алгоритмів супроводу (трекінгу) рухомих об'єктів. Оскільки використання того чи іншого способу обумовлено характером як об'єкту, так і фону, в контексті даного розділу буде розглянуто чотири алгоритми супроводу на базі оптичного потоку, які можуть бути використані для трекінгу як рухомих, так і стаціонарних об'єктів та використовують однаковий набір вхідних даних, що дозволяє реалізовувати їх на базі одного фізичного пристрою.

Метод Farneback – засновано на апроксимації інтенсивності в околицях пікселя за допомогою квадратичної форми [10] (2.1):

$$I = xAx + bx + c \quad (2.1)$$

Апроксимація проводиться з симетричною матрицею A (такий тип апроксимації має більш високу точність відносно лінійної). У випадку, якщо зображення в сегменті наступного кадру має зсув в межах околиці:

$$I_2(x) = I_1(x - d) \quad (2.2)$$

,тоді:

$$A_2 = A_1, b_2 = b_1 - 2A_1d, c_2 = d^T A_1d - b_1^T d + c_1 \quad (2.3)$$

b - вектор зсуву, c - скаляр ОП. Обчисливши значення A, b, c в обох кадрах, отримаємо систему рівнянь, надлишкову відносно d . Вектор d оптичного потоку знаходиться за співвідношенням (2.4):

$$d = -\frac{1}{2A}(b_2 - b_1) \quad (2.4)$$

В наступній ітерації знаходиться нова апроксимація:

$$A = \frac{1}{2}(A_1 + A_2) \quad (2.5)$$

Метод має додатковий алгоритм компенсації шумів при обчисленні, що дає змогу отримати коректні результати при зміщенні сегмента зображення порядку 1..3 пікселя. Для більших зсувів використовується масштабна піраміда, що надає змогу збільшити достовірність результатів, але призводить до уповільнення розрахунку оптичного потоку.

Метод SimpleFlow – засновано на пошуку максимуму функції відгуку у двовимірному вікні стеження. Для вирішення неоднозначностей в методі прийнято вважати ОП безперервним, а зсув околиці точки розрахунку рівномірним. Математично, метод заснований на знаходженні значення (dx, dy) , які мінімізують функцію (2.6):

$$E(x_0, y_0, dx, dy) = \sum (E(x, y, dx, dy) e^{-\frac{|(x,y)-(x_0,y_0)|^2}{2S_d}} e^{-\frac{|F_1(x,y)-F_1(x_0,y_0)|^2}{2S_c}}) \quad (2.6)$$

, де

$$e(x, y, dx, dy) = |F_1(x, y) - F_2(x + dx, y + dy)|^2 \quad (2.7)$$

Метод має найбільшу швидкість обробки, оскільки, на відміну від інших, розглядає інтенсивність пікселя та околиці напряму, без знаходження похідних. Але в силу наведених припущень, використання методу обмежене об'єктами, проекція яких на кожен вісь складає не менше 12 пікселів.

Метод Horn-Schunke – заснований на вирішенні рівняння (2.8):

$$I_x dx + I_y dy + I_t dt = 0 \quad (2.8)$$

, базується на припущенні гладкості оптичного потоку на всьому зображенні. Результат отримується для кожного пікселя зображення вирішенням системи рівнянь:

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= u_n - I_x(I_x u_n + I_y v_n + I_t) / (I_x^2 + I_y^2 + \alpha^2) \\ u_{n+1} &= v_n - I_y(I_x u_n + I_y v_n + I_t) / (I_x^2 + I_y^2 + \alpha^2) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Метод використовується переважно з попередньою фільтрацією зображення медіанними, білетральними або Гаусовими фільтрами.

Метод Лукаса-Канаде [9] – засновано на дифференціальному обчисленні оптичного потоку за допомогою аналізу пікселів (передбачається, що оптичний потік є однаковим для пікселів, які розташовані в околиці центру вікна стеження), при цьому зміщення пікселів між сусідніми кадрами має бути незначним. Вектор оптичного потоку відносно точки центру вікна стеження (V_x, V_y) має бути вирішенням системи рівнянь:

$$\begin{cases} I_x(q_1)V_x + I_y(q_1)V_y = -I_t(q_1) \\ I_x(q_2)V_x + I_y(q_2)V_y = -I_t(q_2) \\ \dots \\ I_x(q_n)V_x + I_y(q_n)V_y = -I_t(q_n) \end{cases} \quad (2.10)$$

, де q_1, q_2, \dots, q_n - пікселі всередині вікна, $I_x(q_i), I_y(q_i), I_t(q_i)$ - частинні похідні зображення за координатами x, y та часом t , обчисленні в точці q_i

Цей метод добре працює для супроводу наземних об'єктів при попередньому летекуванні особливих точок за допомогою методик, наведених в попередньому розділі.

Для зручності порівняння методів за ступенем автоматизації (при координатному завданні початкового положення об'єкта спостереження) дані щодо автоматичного навчання та автоініціалізації зведено в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1.

Ступень автоматизації алгоритмів супроводу цілей

Алгоритм	Автоматичне навчання	Автоініціалізація
SimpleFlow	-	+
Farneback	-	+
Horn-Schunke	-	-
Лукаса-Канаде	+	-

В процесі дослідження зазначені алгоритми було перевірено на стійкість до негативних факторів, які виникають в процесі експлуатації систем оптико-електронного позиціонування в складі бортових систем ЛА. Наведені дані

характерні для систем з механічною стабілізацією камери за каналами крена і тангажа в умовах супроводу одного об'єкту без втрати візуального контакту. Результати перевірки наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Вплив негативних факторів на роботу алгоритмів супроводу об'єктів, заснованих на обчисленні оптичного потоку

Алгоритм	Фактор впливу			
	Дуже швидкий рух об'єкта	Об'єкт слабо відрізняється від фону	Велика швидкість руху фону	Масштабування розмірів об'єкта
SimpleFlow	-	-	+	+
Farneback	+	-	+	+
Horn-Schunck	-	-	+	-
Лукаса-Канаде	+	+	+	-

Виходячи з даних порівняння стійкості алгоритмів розрахунку оптичного потоку до ключових факторів впливу, а саме до швидкого руху фону та об'єкту супроводу, для подальшого розгляду було обрано методи SimpleFlow, Farneback та Лукаса-Канаде.

2.2. Розробка комплексного показника ефективності систем оптико-електронного позиціонування.

Проведене попереднє порівняння методів оптико-електронного позиціонування на базі обчислення оптичного потоку носить якісний характер. Для подальшого оцінювання методів необхідно ввести кількісний показник, який надасть можливість порівняти ефективність методів позиціонування на етапі побудови алгоритмів програмного забезпечення комплексу ОЕП з урахуванням особливостей маневрових характеристик ЛА, конструктивних параметрів оптичної системи та умов застосування комплексу.

Метою застосування оптичного потоку в алгоритмах оптико-електронного позиціонування є знаходження поля швидкостей з подальшим виділенням рухомих об'єктів, для яких під час сегментації вектори оптичних потоків кожного з пікселів мають напрямок, відмінний від напрямку оптичного потоку фону (у випадку паралельних курсів напрямки векторів співпадають, але є суттєва відмінність у модулях векторів). У виділеному сегменті будується трекер (проводиться пошук КТ з подальшим дескриптуванням), який передається в наступну ітерацію циклу супроводу.

Отже, основним критерієм роботи алгоритма розрахунку оптичного потоку є кількість вірно захоплених ключових точок в сегменті зображення, на якому присутній об'єкт супроводу. Але при зміні ракурсу спостереження має місце втрата ключових точок та захоплення нових. При цьому, якщо в математичну модель для порівняння ввести масив з тривимірними координатами ключових точок об'єкту, отриманими на однорідному фоні, результат буде залежити від переміщення вікна проекції і може суттєво відрізнятись від експериментальних даних.

Для усунення неоднозначності результату пропонується введення комплексного показника ефективності, який записується у вигляді (2.11):

$$K_e = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{S_i^{gt} \cap S_i^e}{S_i^{gt} \cup S_i^e} \quad (2.11)$$

,де K_e - комплексний показник ефективності, k - кількість кутових переміщень вікна проекції S_i^{gt} - площа мінімального прямокутника, що обмежує істинні ключові точки в поточній проективній площині, S_i^e - площа мінімального прямокутника, що обмежує ключові точки, отримані в сегменті зображення, виділеному при обчисленні оптичного потоку в поточній проективній площині.

Для обчисленого таким способом комплексного показника ефективності системи оптико-електронного позиціонування емпірично встановлена нижня

межа $K_e^{\min} = 0.37$, при досягненні якої помилкове захоплення ключових точок фону призводить до руйнування дескриптора та зриву супроводу.

2.2. Розробка методу оцінювання ефективності систем оптико-електронного наведення.

Для оптимізації системи оптико-електронного позиціонування відносно комплексного показника ефективності на етапі розробки алгоритма програмного забезпечення постала необхідність розробити математичну модель, яка в якості вхідних параметрів приймає граничні швидкісні та маневрові характеристики ЛА, характеристики оптичної системи та матриці камери, надає можливість гнучкої зміни параметрів функцій обчислення оптичного потоку, комбінування методів попередньої та постобробки. Вихідним параметром моделі є комплексний показник ефективності системи.

Отже, вхідними параметрами моделі є: кути огляду об'єктиву (широке та вузьке поле) - $\theta_{vh}, \theta_{hh}, \theta_{vl}, \theta_{hl}$, динамічний діапазон камери D_{EV} , матриця висот

рельєфу для імітації шумів фону $H = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \dots & h_{mn} \end{pmatrix}$, де $h_{ik} \in (0, 2^{32})$, текстурна

матриця в градаціях сірого $T = \begin{pmatrix} t_{11} & \dots & t_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & \dots & t_{mn} \end{pmatrix}$, де $t_{ik} \in (0, 2^{24})$, масиви ключових

точок об'єктів супроводу $obj_i = [x, y, z, c]$, просторове положення точки ініціалізації алгоритму $(x_c, y_c, z_c, \alpha_{yaw}, \alpha_{pitch}, \alpha_{roll})$, граничні кутові і лінійні швидкості пересування носія системи $(\vec{v}, \omega_y, \omega_p, \omega_r)$, матриця коефіцієнтів камери

$A = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, коефіцієнти викривлення оптичної системи

$$distC = (k_1, k_2, p_1, p_2, [k_3..k_d]). [15]$$

Для максимального наближення до реальних умов роботи комплексу оптико-електронного позиціонування матриці висот рельєфу і текстурна матриця беруться з обраних фрагментів SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) та геореференційованого растру GeoTIFF відповідно [13]. Типовий приклад адаптованого для моделювання фрагменту SRTM файлу наведено на рис.2.1.

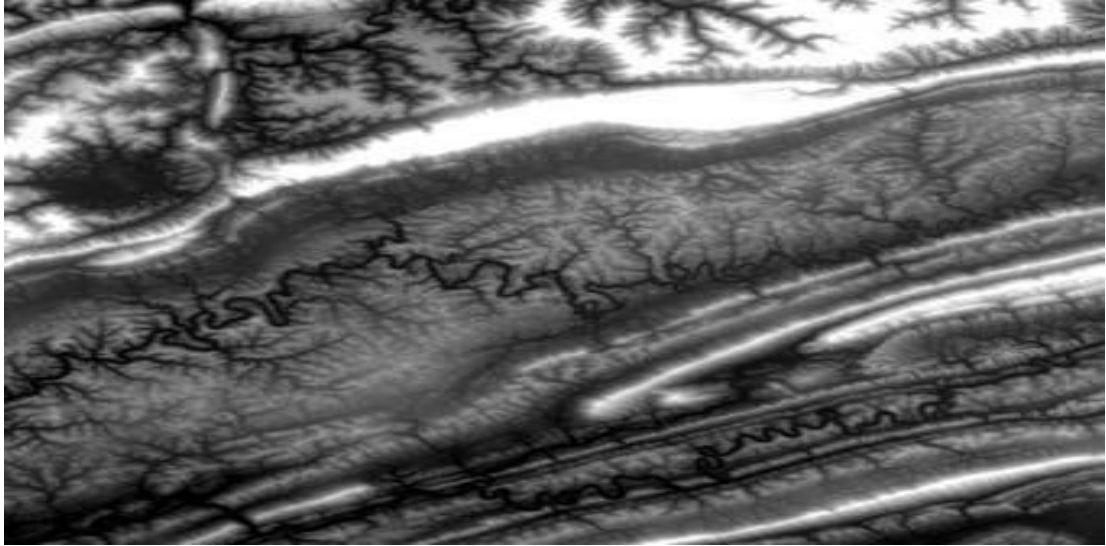


Рис.2.1. Візуалізація фрагменту матриці висот рельєфу для опрацювання в моделі.

Першим кроком обчислюється поточна проекція «вікна» огляду широкопольного об'єктиву на площини висотної та текстурної матриць. Для цього використовуються наступні співвідношення [22,23]:

$$x_{1,2} = z_c \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{pitch} + \frac{\theta_{vh}}{2}\right), x_{3,4} = z_c \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{pitch} - \frac{\theta_{vh}}{2}\right) \quad (2.12)$$

$$y_1 = y_c - x_{1,2} \operatorname{tg} \frac{\theta_{hh}}{2}, y_2 = y_c + x_{1,2} \operatorname{tg} \frac{\theta_{hh}}{2} \quad (2.13)$$

$$y_3 = y_c - x_{3,4} \operatorname{tg} \frac{\theta_{hh}}{2}, y_4 = y_c + x_{3,4} \operatorname{tg} \frac{\theta_{hh}}{2} \quad (2.14)$$

$$M(\alpha_{yaw}) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{yaw} & \sin \alpha_{yaw} \\ -\sin \alpha_{yaw} & \cos \alpha_{yaw} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{pmatrix} M(\alpha_{yaw}) \quad (2.15)$$

$$\begin{pmatrix} x_{ij}^{pr} \\ y_{ij}^{pr} \\ z_{ij} \\ 1 \end{pmatrix}_p = \begin{pmatrix} \frac{1}{as \cdot tg(\frac{\theta_{vh}}{2})} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{tg(\frac{\theta_{hh}}{2})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-NearZ - FarZ}{NearZ - FarZ} & \frac{2FarZ - NearZ}{NearZ - FarZ} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Для визначення елементів матриць, що потрапляють в вікно проєкції та підлягають перспективному перетворенню (2.16) використовується метод перетину проєкційного променя.

Результатом вищенаведених перетворень є масив даних розмірністю ($H_{res} \times V_{res} \times 3$), який відтворює наближений до реальних умов кадр. Для імітації швидкісного розмиття кадру в реальних умовах використовується фільтр Гауса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.17)$$

Вертикальна і горизонтальна компоненти фільтра мають наступний вигляд:

$$x_{gauss} = (0, 0, 0.02 \frac{\omega_p}{v_{exp}}), y_{gauss} = (0, 0.03 \frac{\omega_y}{v_{exp}}, 0) \quad (2.18)$$

, де v_{exp} - приведений показник експозиції, який визначається швидкістю затвору камери.

Для введення засвічування, обумовленого наявністю локальних джерел з координатами $(x_i^{pr}, y_i^{pr}, z_i^{pr})$ сусідні елементи текстурної матриці замінюються на елементи з максимальним значенням, а елементи вихідного масиву в околицях спроектованої точки розмиваються за трьома векторами з кутами 120° з коефіцієнтами відповідно до індикатриси ПСС джерела випромінювання, враховуючи наступне співвідношення:

$$(k_0, k_{120}, k_{240}) = (\frac{y_i^1}{1,732}, \frac{y_i^2}{2,766}, \frac{1,44y_i^1 + 1,44y_i^2}{2,943}) \quad (2.19)$$

, де y_i^1, y_i^2 - лівий і правий створи індикатрис ПСС відповідно.

Масив об'єкта спостереження вводиться за співвідношеннями (2.12)-(2.16) відповідно до обчислених координат об'єкта в поточному кадрі.

Для визначення найбільш сталих методів попередньої та постобробки зображень в моделі передбачено використання наступних додаткових алгоритмів та операторів:

1. Локальне порогове перетворення (бінарізація), реалізоване за співвідношеннями (1.4) – (1.6);

2. Ерозія з ітераційним числом 1..16. Введення цього оператора обумовлене наявністю високочастотних шумів на бінарізованому зображенні. Оператор дозволяє виключити з подальшого аналізу об'єкти, які за розміром значно менші за ціль [16]. Оператор в загальному вигляді описується наступним співвідношенням:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (2.20)$$

3. Дилатація з ітераційним числом 1..32. Процедура дилатації є зворотньою відносно ерозії. В сукупності послідовність виконання даних операторів дозволяє провести фільтрацію високочастотних шумів та об'єктів малого розміру без розмиття зображення, до якого призводять медіанний фільтр та фільтр Гауса[17]. Оператор дилатації в загальному вигляді записується співвідношенням :

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (2.21)$$

Приклад послідовного виконання операторів відносно N-каналу



Рис.2.4. Фільтрація карти глибини зображення за допомогою операторів ерозії і ділатації

отриманої карти глибини зображення наведено на рис. 2.4.

4. Оператор Собеля введено з метою виділення градієнтів зображення для подальшого знаходження меж та контурного аналізу. Розглядається два підходи: додавання виділеної оператором маски в інфрачервоному діапазоні до зображення з телевізійної системи та додавання меж, виділених в видимому діапазоні до інфрачервоного зображення цілі. Математичний вираз оператора Собеля [17,18] наведено в (2.22).

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * A, G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 3 \end{bmatrix} * A, G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2.22)$$

5. Детектор меж Канні. Введений в модель з метою вивчення можливості підвищення інформативності зображення за допомогою додаткового виділення меж, що підвищує ймовірність сталого супроводу об'єктів з незначною кольоровою відмінністю від фону [19]. Приклад комбінованого зображення наведено на рис. 2.5.



Рис.2.5. Приклад підвищення інформативності зображення за допомогою детектора меж Канні

На основі залежностей (2.1)-(2.22), алгоритмів, розглянутих в розділі 2.1. та додаткових операторів, було створено пакет прикладного програмного забезпечення в середовищі Python 3.4 для вивчення поведінки основних та

комбінованих засобів оптико-електронного наведення. Лістинг програми наведено в додатку 2.

2.3. Дослідження ефективності позиціонування за допомогою основних методів побудови оптичного потоку.

Як було зазначено в розділі 2.1 для подальшого розгляду було обрано методи побудови оптичних потоків SimpleFlow, Farneback та метод Лукаса-Канаде.

В першу чергу досліджувалися алгоритм Лукаса-Канаде (оскільки його характерною особливістю є обчислення дискретного оптичного потоку для сталих ключових точок зображення, що зменшує ймовірність виникнення помилки I роду - втрати фокусування на об'єкті спостереження) та алгоритм Farneback, оскільки він забезпечує більшу точність побудови суцільного оптичного потоку, ніж SimpleFlow. Характерний випадок виникнення помилки I роду в алгоритмі Лукаса-Канаде наведено на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Виникнення помилки I роду в алгоритмі Лукаса-Канаде при наявності сильного кольорового градієнту. а – початковий масив КТ, б – втрата фокусу при маневруванні з пере захопленням КТ фону.

В ході моделювання виявлено, що для методу Лукаса-Канаде ймовірність виникнення помилки зростає у випадку наявності у вікні пошуку

різких кольорових градієнтів а також при високоінтенсивному маневруванні камери.

Отже, одним з шляхів подальшого удосконалення є компенсація рухів камери з малою амплітудою та високими кутовими швидкостями на основі даних інерційної системи. Більш детальний розгляд впливу максимальної кутової швидкості камери в каналах крену і тангажа на комплексний показник ефективності при незмінній кількості шарів масштабної піраміди наведено на рис. 2.7.

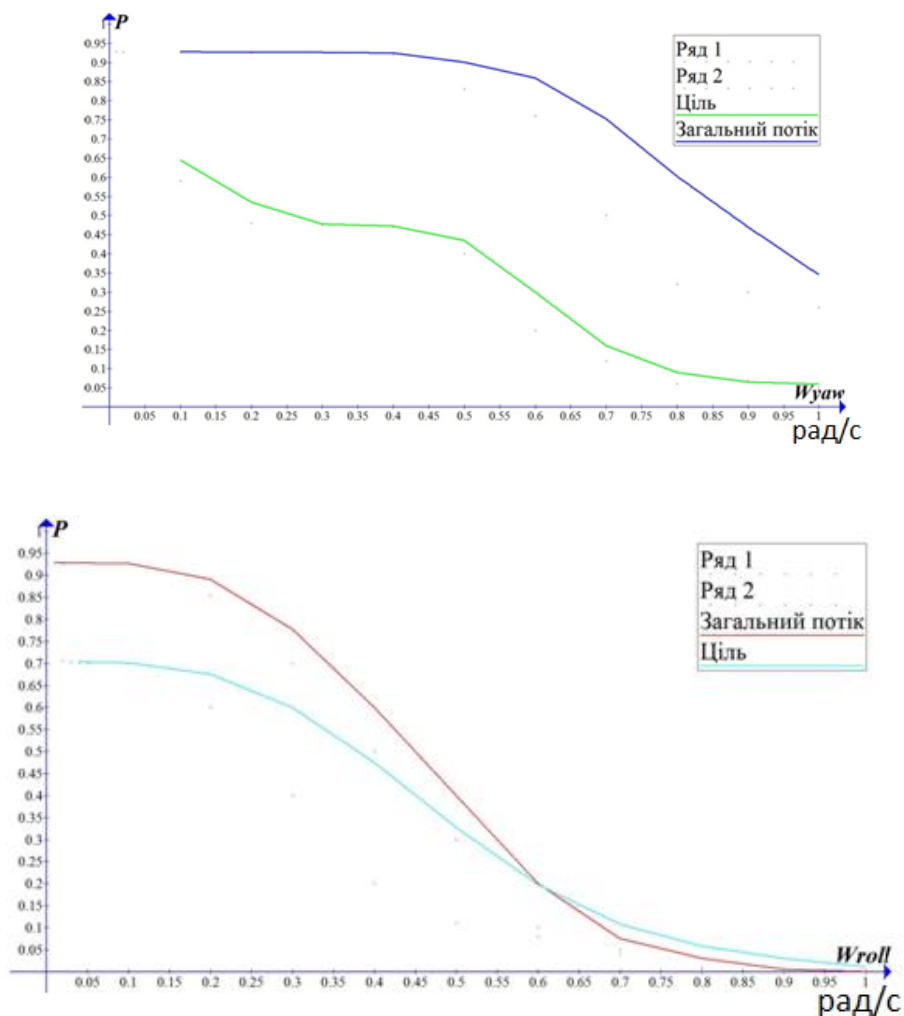


Рис.2.7. Залежність комплексного показника ефективності системи оптико-електронного позиціонування від граничних кутових швидкостей маневрування ЛА.

Також було розглянуто вплив максимальної лінійного переміщення при зустрічному курсі на комплексний показник ефективності. Результати наведено на рис. 2.8.

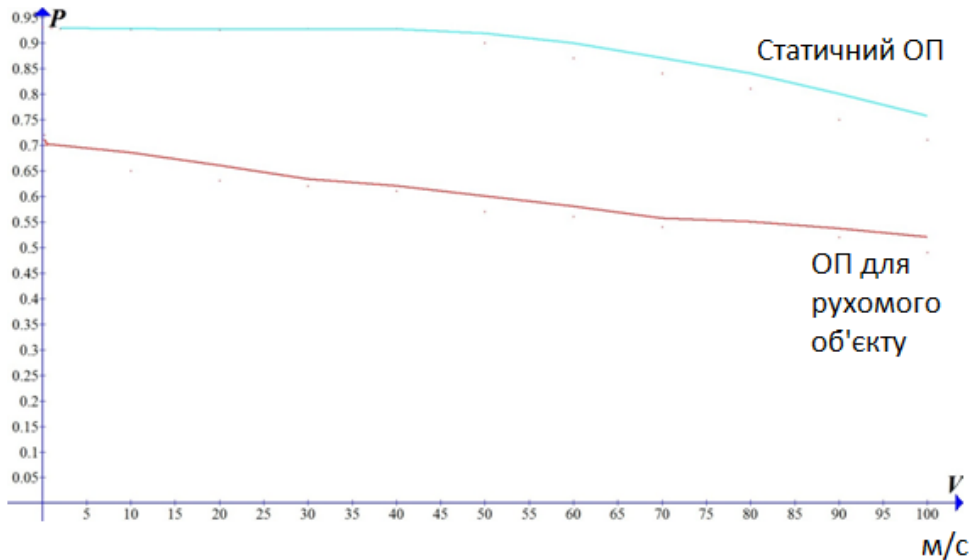


Рис.2.8. Залежність комплексного показника ефективності для методу Лукаса-Канаде від граничної швидкості наближення до об'єкту супроводу.

Для метода Farneback залежності ідентичні, отже шляхи удосконалення методів побудови оптичного потоку є універсальними для обох методів.

Додатково було проаналізовано вплив кількості шарів піраміди масштабів малого кроку на ймовірність виникнення помилки I роду в алгоритмах Лукаса-Канаде та Farneback.

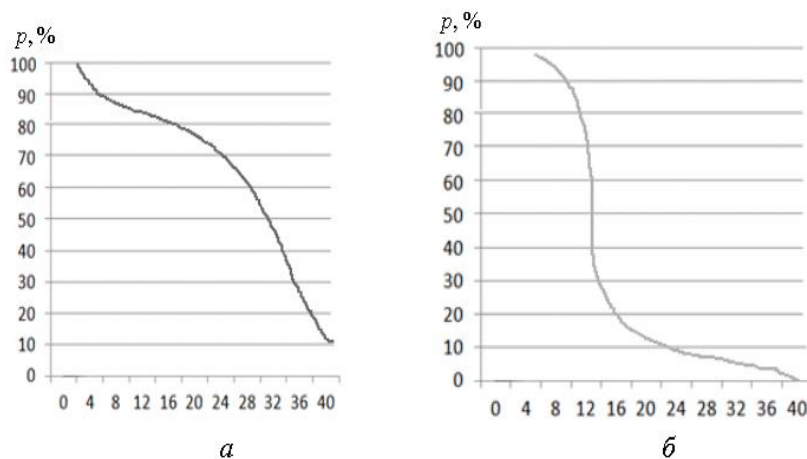


Рис.2.9. Ймовірності виникнення помилки I роду для алгоритмів Лукаса-Канаде (а) та Farneback (б)

Як видно з графіків, алгоритм Farneback програє алгоритму Лукаса-Канаде в умовах відстежування об'єкту з малою кількістю шарів масштабної піраміди, проте цей недолік може бути вирішений попередньою сегментацією зображення за допомогою оптичного потоку Лукаса-Канаде з подальшим уточненням в кожному сегменті за допомогою методу Farneback.

Розрахункові дані моделі показують що максимальний розрахований комплексний показник ефективності при оптимально підібраних масштабних коефіцієнтах для вищерозглянутих алгоритмів супроводу становить 0,64 для Farneback та 0,71 для Лукаса-Канаде. Результати моделювання базових методів побудови оптичного потоку наведені в додатку 3.

Висновки до розділу 2.

1. Вперше розроблено кількісний показник ефективності систем оптико-електронного позиціонування на основі аналізу оптичного потоку з урахуванням природних факторів впливу, маневрових характеристик носія системи, маневрових характеристик цілей та штучних перешкод. Завдяки цьому забезпечується моделювання роботи систем оптико-електронного позиціонування в умовах реального польоту, оцінюється достовірність результатів супроводу ключових точок рухомих об'єктів та вимірювання дальності до них у стереопарах. Досліджено вплив маневрових характеристик системи ОЕП на ефективність процесу розрахунку оптичного потоку.

2. Визначено шляхи вдосконалення процесу розрахунку оптичного потоку для роботи систем ОЕП при високих кутових та лінійних швидкостях пересування носія систем.

3. Створено математичну модель та пакет прикладного програмного забезпечення для дослідження впливу параметрів розрахунку оптичного потоку, параметрів попередньої та постобробки на ефективність систем оптико-електронного позиціонування.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ

3.1. Удосконалення методу побудови оптичного потоку Лукаса-Канаде

Для удосконалення методів обчислення потоку в першу чергу необхідно визначити причину виникнення неоднозначності розрахунку оптичного потоку. На рис.2.6 було наведено типову ситуацію з пере захопленням ключових точок в потоці Лукаса-Канаде. Недолік викликаний малим розміром вікна проєкції, в якому за співвідношенням (2.10) обчислюється потік. Збільшення вікна призводить до значного зростання обсягу розрахунків та, відповідно, уповільнює роботи системи. Достовірне обчислення оптичного потоку, загалом, має місце лише при зміщенні зображення порядку одного пікселя (що характерно і для потоку Фарнебека). Альтернативним способом є побудова піраміди масштабів з заданим фіксованим масштабним коефіцієнтом, де розрахунок оптичного потоку ведеться від верхнього шару з урахуванням зміщення, отриманого в попередніх ітераціях. Проте, точність результату досягається при використанні великої кількості шарів з малим масштабним коефіцієнтом, що також призводить до збільшення обсягу обчислень.

Для усунення вищезазначених недоліків пропонується наступна методика:

Першим етапом розраховується статичний потік в горизонтальній стереопарі одного кадру. На цій стадії формується карта глибини зображення в першому наближенні. Для отримання достовірного результату необхідно забезпечити зсув точки побудови оптичного потоку не більше одного пікселя зображення, тож необхідним є використання піраміди масштабів. Необхідна точність результатів забезпечується при масштабному коефіцієнті 2. Для кожної пари точок розраховується модуль і напрямок вектора оптичного потоку:

$$|\vec{p}| = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (3.1)$$

$$\alpha_p = \arctg\left(\frac{y-y'}{x-x'}\right) \quad (3.2)$$

, при цьому відкидаються всі точки, для яких $\alpha_p \neq \alpha_k$, де α_k задається конструкційними параметрами стереокамери. Візуалізація першого етапу наведена на рис.3.1.



Рис.3.1. Розрахунок оптичного потоку в стереопарі

На другому етапі проводиться сегментація зображень відносно шарів піраміди масштабів, в яких було отримано ненульові значення векторів оптичного потоку. Для карти глибини застосовується певна кількість ітерацій операторів ерозії і дилатації (визначається емпірично та залежить від розузгодження стереопари). Візуалізація процесу наведена на рис.3.2.

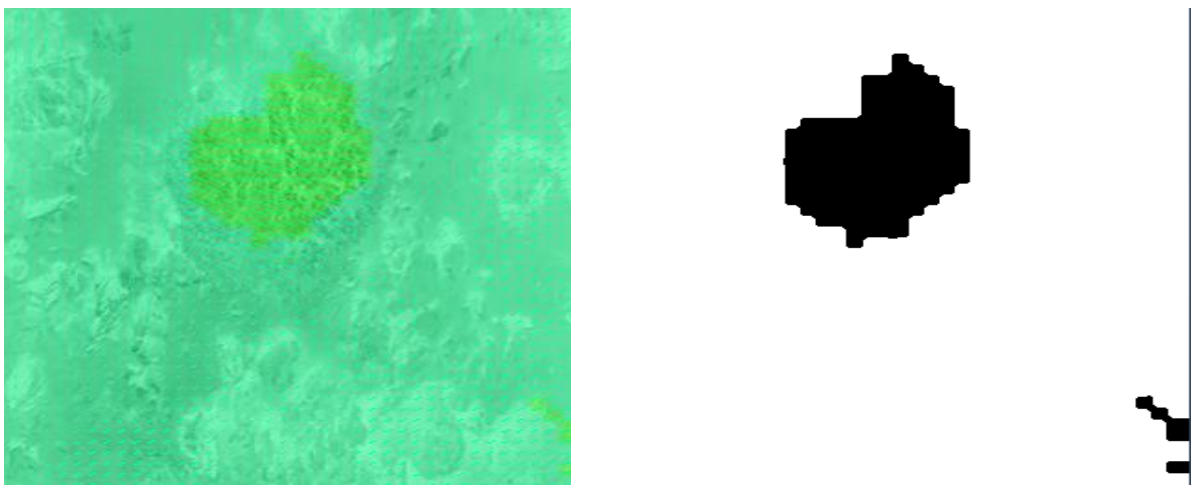


Рис.3.2. Сегментація карти глибини зображення.

На третьому етапі розраховується проекція вектору переміщення камери на основі даних, які отримується з гіроскопічних датчиків.

$$\Delta x = \frac{f}{4} \operatorname{tg} \theta_{yaw} \frac{L_x}{M_x}, \Delta y = \frac{f}{4} \operatorname{tg} \theta_{pitch} \frac{L_y}{M_y} \quad (3.3)$$

, де f - фокусна відстань камери, $\theta_{yaw}, \theta_{pitch}$ - кути курсу та тангажа відповідно, L, M - геометричний розмір та роздільна здатність камери за відповідною проективною віссю відповідно. Для кожного сегмента розраховується зсув зображення за співвідношенням (3.4):

$$\Delta x_{seg} = \frac{\Delta x}{2n_p}, \Delta y_{seg} = \frac{\Delta y}{2n_p} \quad (3.4)$$

На цьому ж етапі проводиться побудова карти швидкостей з подвійною пороговою бінарізацією з метою виявлення рухомих об'єктів. Візуалізація процесу наведена на рис.3.3.



Рис.3.3. Візуалізація процесу виділення рухомих об'єктів за допомогою бінарізації карти швидкостей.

Четвертим етапом є побудова оптичного потоку з пірамідою масштабів малого кроку в межах коефіцієнту масштабування $k_s = (1..2)$. На цьому етапі проводиться уточнення відстані до нерухомих об'єктів за співвідношенням (3.1) та детектування рухомих об'єктів за середнім вектором потоку (3.5):

$$\alpha_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \alpha_p^i}{n} \quad (3.5)$$

Визначення кутових координат об'єкту стеження відбувається наступним чином: для скупчення точок, що утворюють неоднорідність потоку відносно середнього вектору, знаходиться положення центроїду:

$$C_x = \frac{\sum C_{ix} A_i}{\sum A_i}, C_y = \frac{\sum C_{iy} A_i}{\sum A_i} \quad (3.6)$$

Дані щодо кутових координат об'єкта використовуються в подальших ітераціях для обмеження області розрахунку оптичного потоку.

Візуалізація результату роботи удосконаленого методу розрахунку оптичного потоку наведена на рис. 3.4



Рис.3.4. Візуалізація результату роботи удосконаленого методу побудови оптичного потоку.

Запропонований метод дає можливість скоротити втрати ключових точок при маневруванні до 6% та збільшити показник ефективності системи оптико-електронного позиціонування до 0.51..0.63. При цьому проміжні дані у вигляді кадрів з локальними інтенсивностями пропорційними до модулів векторів потоку використовуються для побудова карти глибини зображення. Результати порівняльного дослідження відносно швидкості обробки кадру наведено на рис. 3.5.

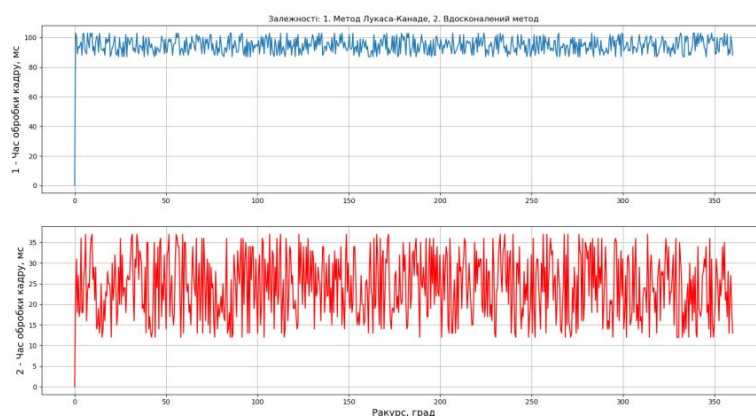


Рис.3.5. Порівняння швидкості обробки кадру методом Лукаса-Канаде та удосконаленим методом.

Порівняно з класичним методом, який базується на знаходженні максимуму функції відгуку, метод побудови карти глибини на основі оптичного потоку забезпечує на 170% більшу швидкість обробки і є більш стійким до високочастотних шумів зображення. Збільшення швидкості обробки обумовлено в першу чергу зменшенням кількості шарів піраміди масштабів та

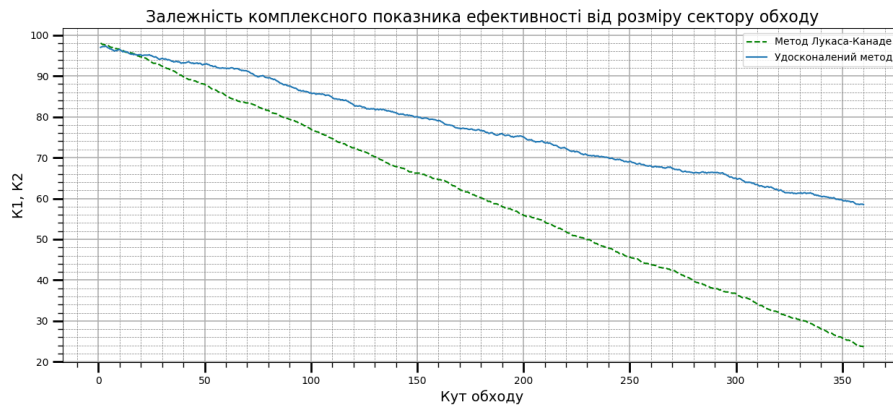


Рис.3.6. Результати моделювання системи оптико-електронного позиціонування при використанні методу Лукаса-Канаде та запропонованого методу відносно комплексного показника ефективності.

застосуванням корекції абераційних викривлень до множини стабільних ключових точок, на відміну від відомих методів, де корекція проводиться відносно всього масиву зображення. Більша амплітуда коливань часу обробки кадру для удосконаленого методу обумовлена різною кількістю стабільних ключових точок в стереопарі кадру. Результати моделювання удосконаленого методу побудови оптичного потоку відносно комплексного показника ефективності наведені на рис.3.6. Моделювання проводилось за умови використання додаткового програмного потоку обробки асинхронних даних, обчислення ОП проводилось з паралельним розділенням процесів як для базових методів, так і для удосконаленого методу побудови потоку. Результати моделювання для серії відеопослідовностей представлені у вигляді графіків залежності поточного коефіцієнту ефективності системи ОЕП від кількості опрацьованих ракурсів та швидкості обробки кадру від роздільної здатності віртуальної камери та наведені в додатку 2.

3.2. Розробка методу побудови карти глибини зображення в умовах зустрічно-курсого наближення.

Для створення карти глибини в умовах суто лінійного пересування (наприклад, при використанні стабілізованих камер) неможливо забезпечити необхідну стереобазу для отримання карти глибини в паралельній стереопарі [48]. Тому розроблено метод побудови карти глибини за рахунок розмиття оптичного потоку відносно вектору руху ЛА (рис. 3.7).

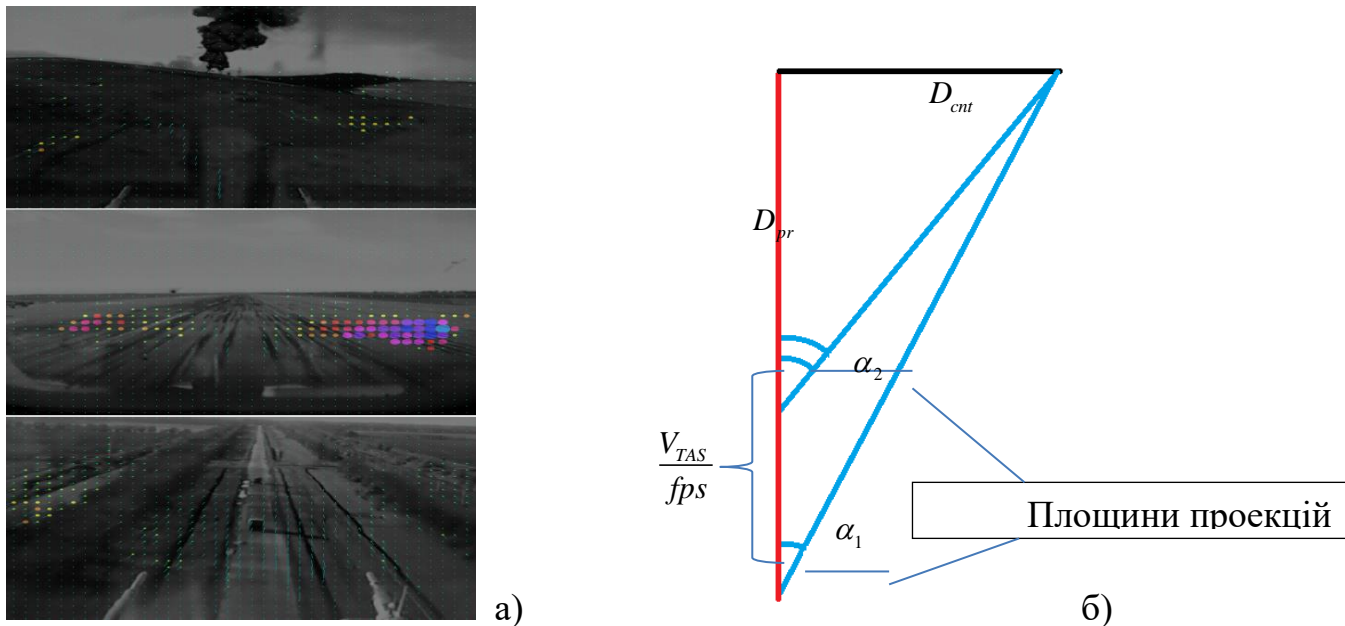


Рис.3.7 Утворення швидкісного розмиття оптичного потоку

Схема утворення такого викривлення потоку наведена на рис. 3.5,б і обумовлена масштабуванням об'єктів в проєктивній площині при наближенні їх до камери.

Розрахунок оптичного потоку в даному випадку з метою підвищення точності проводиться в скомпенсованому зображенні відповідно до співвідношень (3.7) [20]:

$$\begin{aligned}
 x' &= x \frac{1+k_1 r^2+k_2 r^4+k_3 r^6}{1+k_4 r^2+k_5 r^4+k_6 r^6} + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\
 y' &= y \frac{1+k_1 r^2+k_2 r^4+k_3 r^6}{1+k_4 r^2+k_5 r^4+k_6 r^6} + p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \\
 r^2 &= x^2 + y^2
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

При відсутності можливості використання даних щодо переміщення ЛА відносно поверхні (наприклад, в разі відмови супутникової системи навігації) для подальшого розрахунку обчислюється істина повітряна швидкість літального апарату за показниками датчиків диференційного тиску за співвідношенням (18) [57]:

$$V_{TAS} = \sqrt{\frac{2K}{K-1} gRT_H \left[\left(\frac{q}{P_{стq}} + 1 \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right]} \quad (3.8)$$

Абсолютна відстань до пікселя зображення знаходиться як вирішення системи рівнянь (3.9) та записується у вигляді (3.10).

$$D_{cnt} = D_{pr} tg \alpha_2 \quad (3.9)$$

$$D_{cnt} = \left(D_{pr} + \frac{V_{TAS}}{fps} \right) tg \alpha_1$$

$$D_{pr} = \frac{V_{TAS}}{fps(tg(\sqrt{(x_p \beta_x)^2 + (y_p \beta_y)^2}) - tg(\sqrt{(x'_p \beta_x)^2 + (y'_p \beta_y)^2})} \quad (3.10)$$

Візуалізація методу наведена на рис.3.8.

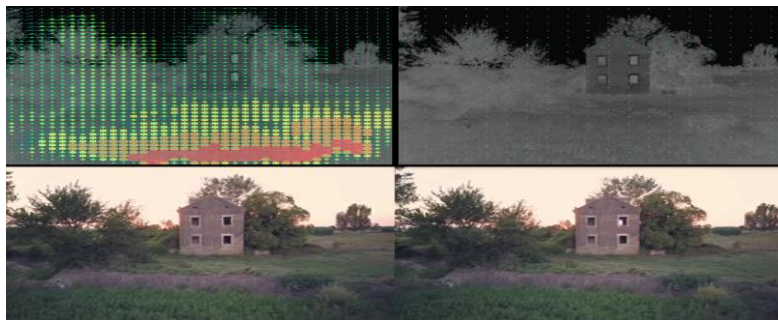


Рис.3.8. Візуалізація методу обчислення карти глибини при зустрічному курсі.

3.3. Адаптація методу побудови карти глибини в умовах зустрічно-курсого наближення до роботи в бортових системах літальних апаратів.

Отримане в попередньому підрозділі співвідношення для обчислення відстані до довільного елементу зображення справедливе для випадку, коли вектор руху ЛА співпадає з оптичною віссю камери. Оскільки в реальних

системах вектор руху переважно має суттєве відхилення від оптичної вісі, існує необхідність введення обчислення вектора руху з перерахунком його орієнтації в зміщення пікселів на проєктивній площині.

Проекція елеваційного кута вектора руху обчислюється за співвідношенням 3.11:

$$y_{fpa} = \arctg \frac{v_{vsi}}{v_{gs}} \beta_y \quad (3.11)$$

, де y_{fpa} - зміщення у пікселях відносно вертикальної вісі кадру, v_{vsi} - вертикальна швидкість ЛА, v_{gs} - швидкість ЛА відносно поверхні, β_y - роздільна здатність камери.

Для систем з високим ступенем автономності, використання супутникових систем навігації в яких обмежено, розрахунок проводиться відносно істинної повітряної швидкості:

$$y_{fpa} = \arcsin \frac{v_{vsi}}{V_{TAS}} \beta_y \quad (3.12)$$

Горизонтальне зміщення розраховується як різниця між курсовим кутом на кутом орієнтації продольної вісі ЛА:

$$x_{fpa} = (\theta_{fp} - \theta_{yaw}) \beta_x \quad (3.13)$$

Для систем з наявністю супутникових навігаційних модулів та курсових магнетометрів співвідношення (3.13) переписується у вигляді:

$$x_{fpa} = (\theta_{fp} - \theta_{hdg} + \theta_{md}) \beta_x \quad (3.14)$$

, де θ_{md} - магнітне нахилення для поточного положення ЛА, θ_{hdg} - магнітний курс ЛА, θ_{fp} - курсовий кут ЛА.

Для ЛА з високим ступенем автономності горизонтальне зміщення розраховується за співвідношенням:

$$x_{fpa} = \gamma_{slp} \beta_x \quad (3.15)$$

, де γ_{slp} - кут аеродинамічного ковзання, який отримується за допомогою інерційного інклєнометра або симетричної системи датчиків диференційного тиску.

Отримані за допомогою вищевикладених співвідношень зміщення x_{fpa}, y_{fpa} додаються до координат центра кадру, відповідно в співвідношенні (3.10) x_p, y_p перераховуються відносно нового центра розмиття оптичного потоку.

Додатково для верифікації розрахунку оптичного потоку для точки з проєктивними координатами (x_1, y_1) , яка переходить в точку з координатами (x_2, y_2) , а також виділення потенційних рухомих об'єктів може бути використано критерій:

$$(x_{cent} - x_{fp})^2 + \left(\left(\frac{(y_2 - y_1)(x_{cent} - x_{fp} - x_2)}{x_2 - x_1} + y_2 \right) + y_{cent} - y_{fp} \right)^2 < R_{valid}^2 \quad (3.16)$$

, де R_{valid} задається на етапі проєктування системи як максимальна похибка методу вимірювання кутових відхилень, переведена в проєктивні координати з урахуванням роздільної здатності камери.

Всі характерні точки зображення, для яких оптичний потік відповідає критерію (3.16) переводяться до масиву, за яким будується карта глибини зображення, інші переводяться до масиву карти швидкостей.

Висновки до розділу 3.

1. Удосконалено методи побудови оптичного потоку за рахунок зменшення піраміди масштабів. Запропонований метод відрізняється від відомих введенням в математичну модель обробки інерційних та висотно-швидкісних даних носія системи оптико-електронного позиціонування. Завдяки цьому забезпечується стійкість метода під час активного маневрування літального апарату без збільшення обсягу обчислень, що надає змогу обробляти відеопослідовності з частотою до 90 кадрів на секунду в режимі реального часу.

При цьому показник ефективності системи відносно класичних методів розрахунку оптичного потоку збільшується на 25..28%

2. Розроблено метод багатоканального пасивного вимірювання дальності на основі оптичного потоку в стереоскопічному зображенні в некаліброваних стереопарах. На відміну від існуючих методів, які базуються на знаходженні максимумів функцій відгуку в горизонтальних або вертикальних стереопарах та потребують обов'язкової компенсації абераційних викривлень та кутових відхилень оптичних вісей камер, запропонований метод дозволяє будувати відносну карту глибини та знаходити абсолютні відстані до об'єктів без проведення попередньої обробки, що збільшує швидкість обробки відеоінформації на 170% та розширює діапазон вимірювання відстані в 4.3 рази для паралельних стереопар.

3. Розроблено та адаптовано до використання в складі бортових систем ЛА метод побудови стереопари в умовах зустрічно-курсowego руху з урахуванням проєкції вектору руху ЛА на екранну площину.

4. Розроблено критерій перевірки адекватності розрахунку оптичного потоку в умовах зустрічного пересування ЛА та об'єкту.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ

4.1 Розробка функціональної схеми комплексу оптико-електронного позиціонування на основі аналізу оптичного потоку.

Виходячи з обраного варіанту реалізації методу оптико-електронного позиціонування, необхідно розробити функціональну схему пристрою ОЕП, який би забезпечував введення всіх необхідних даних для адекватної роботи моделі, обробку інформації з необхідним розподілом потоків, візуалізацію вихідних даних у зручному форматі та видачу сигналів керування ЛА

З урахуванням конструктивних та маневрових особливостей носіїв систем оптико-електронного прозиціонування, необхідно розглянути два варіанти функціональних схем системи: для наземного виконання та для встановлення на літальний апарат. Функціональна схема системи для наземних носіїв наведена на рис.4.1.

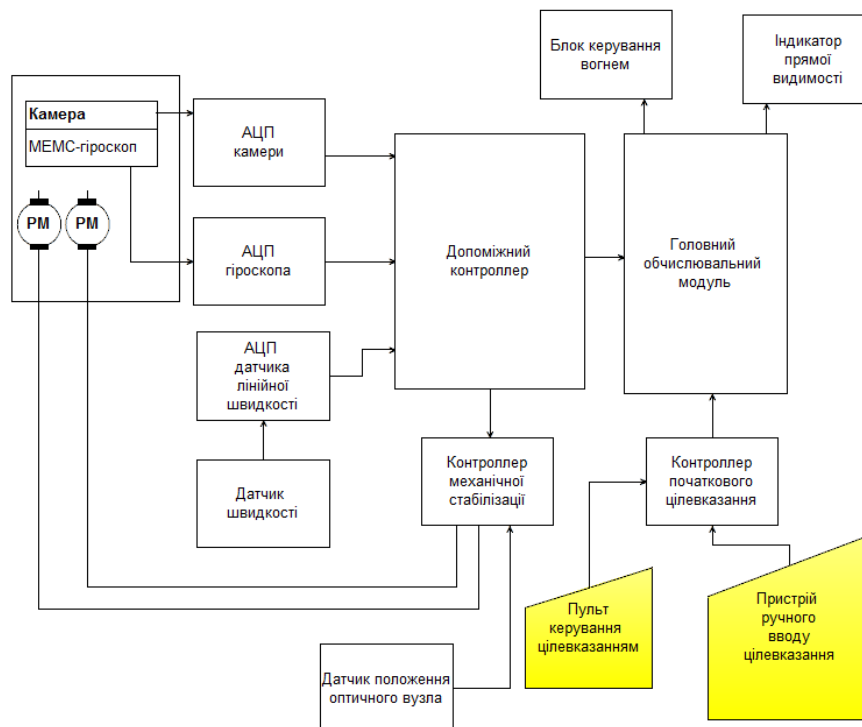


Рис. 4.1 Функціональна схема пристрою оптико-електронного позиціонування для наземних засобів.

В такому варіанті виконання системи ОЕП пристрій введення відеоінформації (стереокамера) конструктивно об'єднується з датчиком кутових прискорень (мікромеханічних гіроскопом) та встановлюється на рухому платформу, яка забезпечує стабілізацію положення вузла відносно продольної вісі в діапазоні кутів $\pm 30^\circ$ і $\pm 45^\circ$ відносно поперечної вісі. Курсовий канал не стабілізується. Для керування сервоприводами платформи використовується додатковий контроллер з метою розвантаження основного обчислювального модуля. Дані від камери та датчика кутових прискорень оцифровуються за допомогою відповідних аналого-цифрових перетворювачів та надходять до допоміжного контроллера, завданням якого є при надходженні кадрового синхроімпульсу камери виявити поточну абсолютну орієнтацію відеовузла, видати інформацію до основного обчислювального модуля та контролера механічної стабілізації у вигляді структури $(\theta_{yaw}, \theta_{pitch}, \theta_{roll})$ з точністю, регламентованою роздільною здатністю та кутом поля зору об'єктиву камери. Завданням контроллеру початкового цілевказання є обробка сигналів, що надходять з пристроїв вводу цілевказання та передача в головний обчислювальний модуль інформації щодо вікна пошуку у вигляді структури $(x, y, \Delta x, \Delta y)$, де x, y - координати верхнього лівого кута вікна пошуку на проєктивній площині, $\Delta x, \Delta y$ - розміри відповідних сторін вікна пошуку з урахуванням роздільної здатності камери та кутових характеристик об'єктиву. Головний обчислювальний модуль реалізує наступні функції:

- Фільтрація шумів зображення
- Виділення меж
- Пошук контурів
- Розрахунок оптичного потоку в стереопарі
- Фільтрація оптичного потоку в стереопарі
- Розрахунок оптичного потоку в часі
- Пошук сталих ключових точок
- Побудова карти глибини

- Побудова карти швидкостей
- Фільтрація об'єктів за розміром та швидкістю
- Візуалізація отриманих даних

В якості пристроя візуалізації використовується індикатор прямої видимості, що дозволяє додатково оцінити точність наведення та прийняти рішення щодо продовження супроводу об'єкту. Видача цілевказання в блок керування вогнем проводиться у вигляді структури, яка описую поточний азимут та елевацію об'єкту $(\theta_{az}, \theta_{el})$. Додатково генерується сигнал входу в зону супроводу.

Функціональна схема пристрою ОЕП для роботи на борту ЛА наведена на рис. 4.2.

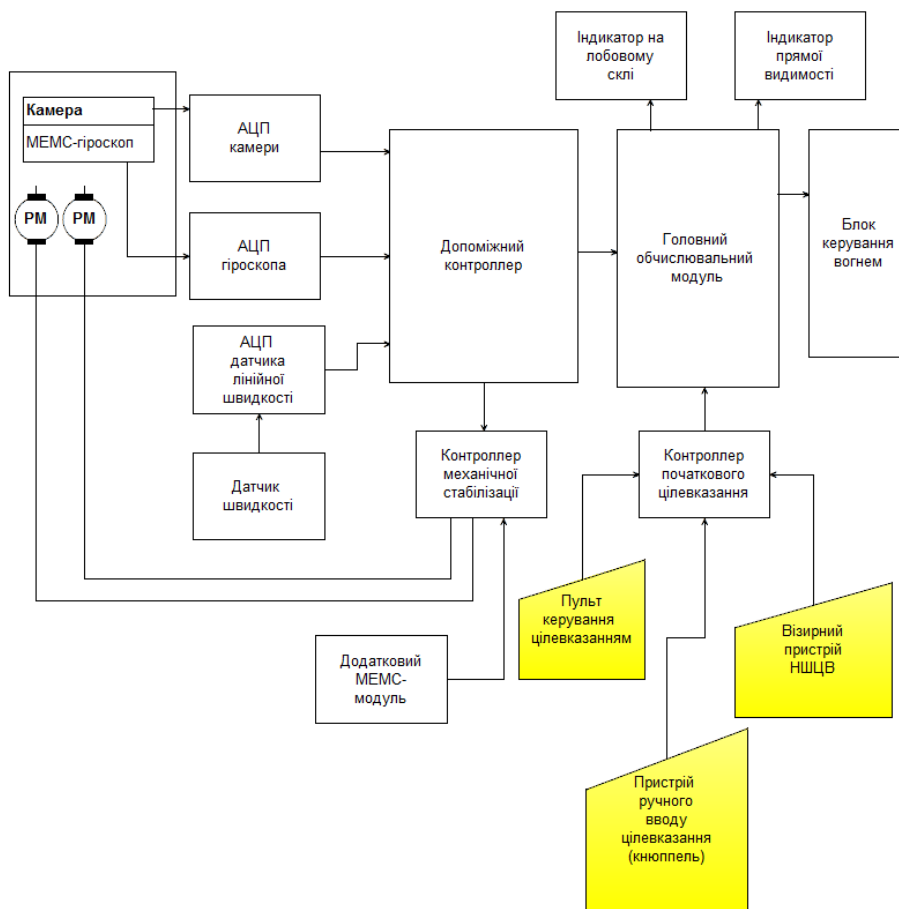


Рис. 4.2. Функціональна схема пристрою оптико-електронного позиціонування для ЛА

Функціональні відмінності вищенаведеної схеми обумовлені характером руху носія оптико-електронної системи і необхідністю одночасного контролю за переміщеннями об'єкта супроводу та керуванням ЛА.

Пристрій введення відеоінформації відрізняється від попередньо розглянутого розширеним діапазоном стабілізації кутів ($\pm 90^\circ$ за поперечним і продольним каналами) та наявністю додаткового датчика кутових прискорень, який надає дані відносно поточного положення ЛА. Контроллер механічної стабілізації в сукупності з сервоприводами забезпечує положення камери відповідно до усередненого положення продольної вісі ЛА, що дає змогу усунути викривлення, обумовлені вібраціями та незначними коливаннями конструкції, при цьому зберігаючи орієнтацію вузла. Оскільки отримання прямих даних щодо швидкості ЛА відносно поверхні без допомоги доплерівського вимірювача швидкості або супутникової системи навігації неможливо, опорні дані беруться з датчика повітряної швидкості (приймача повітряного тиску) і обчислюються в допоміжному контроллері. Для введення початкового цілевказання додатково використовується нашоломна система цілевказання, яка забезпечує визначення орієнтації голови оператора і виведення на нашоломний коліimatorний індикатор мітки об'єкта, шкали вимірювання дальності та основних пілотажних параметрів. Для психологічного розвантаження оператора розширена інформація виводиться додатково на індикатор на лобовому склі, який забезпечує представлення колімованої мнемонічної інформації на фоні закабінного простору. В окремих випадках функціональна схема може доповнюватись пристроєм автоматичного доведення на об'єкт, який забезпечує зв'язок системи з електродистанційною системою керування ЛА з метою підвищення ефективності супроводу об'єкта

Подальша розробка алгоритмів роботи систем ОЕН буде проводитись саме для схеми, наведеної на рис.4.2., оскільки подібні системи переважно використовуються в складі авіаційних комплексів.

4.2. Розробка алгоритму роботи комплексу оптико-електронного позиціонування.

Оскільки математичні операції попередньої та остаточної обробки даних розподілені між функціональними елементами схеми, для коректної розробки програмного забезпечення необхідно в першу чергу визначити розподіл функцій між основними блоками а також визначити послідовність обробки інформації, розподіл потоків та пріоритети обробки для асинхронних даних. Розподіл математичних операцій між блоками системи наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

. Розподіл математичних операцій

Головний обчислювальний модуль	Допоміжний контроллер	Контроллер механічної стабілізації	Контроллер початкового цілевказання
Введення відеоданих та конвертація їх в RGB-масив	Введення даних з датчиків кутових прискорень	Введення та фільтрація даних від додаткового гіроскопа	Обчислення положення реперних випромінювачів для правого і лівого оптичних датчиків
Деаберация даних	Введення даних з ППТ		
Перетворення кольорового зображення в градації сірого	Фільтрація даних гіроскопу	Введення даних від допоміжного контроллера	Триангуляція показників датчиків
ВЧ-фільтрація зображення	Фільтрація даних ППТ		
Детектування меж	Розрахунок орієнтації ЛА	Розрахунок переміщення платформи	Перерахунок вектора початкового цілевказання в проективну площину
Порогова бінарізація	Розрахунок швидкості і висоти		
Виділення контурів	Видача даних в контроллер стабілізації	Генерація керуючих імпульсів для сервоприводів	Обробка даних з ручного пристрою введення цілевказання
Розрахунок оптичного потоку стереопари	Видача даних в головний модуль за фронтом кадрового синхроімпульса		
Розрахунок опорного вектора зміщення в проективній площині			Видача цілевказання в головний модуль

Головний обчислювальний модуль	Допоміжний контроллер	Контроллер механічної стабілізації	Контроллер початкового цілевказання
Фільтрація оптичного потоку відповідно до опорного вектора			
Побудова карти зміщень стереопари (карти глибини зображення)			
Розрахунок оптичного потоку послідовності кадрів			
Побудова карти швидкостей			
Розрахунок азимута та елевації, видача цілевказання			

Розробку алгоритму роботи системи почнемо з доповнення математичної моделі фільтрацією показників МЕМС-датчиків для забезпечення системи точними даними відносно просторової орієнтації ЛА та стабілізації зображення з метою уникнення додаткових обчислювальних витрат на програмну корекцію. Оскільки оцифрований сигнал МЕМС-модуля має достатньо великий коефіцієнт шумів, який обумовлений власними шумами гіроскопу та шумами АЦП, а кутова орієнтація визначається сумуванням кутових переміщень модуля і носить накопичувальний характер, прості фільтри на зразок рухомого середнього будуть вносити значні похибки в результати вимірювань. Тому для отримання величин кутової орієнтації використовуємо фільтрацію Калмана [64]. Для кожного каналу будемо використовувати окремий фільтр, відповідно стан системи в каналі буде представлений однією змінною. Тоді математичний вираз для очікуваного результату буде виглядати наступним чином:

$$\hat{x}_k^- = F\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}, P_k^- = FP_{k-1}F + Q \quad (4.1)$$

Вираз для коригування записується в наступному вигляді:

$$K_k = \frac{P_k^- H}{HP_k^- H + R},$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-), \quad (4.2)$$

$$P_k = (1 - K_k H)P_k^-$$

Значення змінної, що характеризує динаміку системи F у зв'язку з неможливістю передбачення маневрування, беремо за 1, значення змінної керуючого впливу B беремо нульовим, масштабний коефіцієнт H вважаємо для спрощення одиничним. R та Q – похибка вимірювання та шум процесу в першому наближенні обираються відповідно до характеристик, наведених у супровідній документації на МЕМС-пристрій та АЦП, додатково підбираються емпірично для кожного пристрою окремо. Додатково, математичний апарат системи оптико-електронного позиціонування доповнюється виразом для обчислення істинної повітряної швидкості в надзвуковому режимі[57]:

$$\frac{q}{P_{CT}} = \left(\frac{K+1}{2}\right)^{\frac{K+1}{K-1}} \left(\frac{2}{K-1}\right)^{\frac{1}{K-1}} \frac{\left(\frac{v^2}{KgRT_H}\right)^{\frac{K}{K-1}}}{\left(\frac{2K}{K-1} \frac{v^2}{KgT_H} - 1\right)^{\frac{1}{K-1}}} - 1 \quad (4.3)$$

, де q - повний тиск, P_{CT} - статичний тиск, T_H - абсолютна температура повітря, k - відношення питомої теплоємності повітря при сталому тиску до його питомої теплоємності при сталому об'ємі.

Оскільки датчики тиску і АЦП також мають власні шуми, необхідно ввести в процес обчислень фільтрацію їх показників.

$$y(n) = \sum_{i=0}^P b_i x(n-i) \quad (4.4)$$

, де $\sum_{i=0}^P b_i = 1$ Коефіцієнти та розмір виборки підбираються індивідуально.

Оскільки переферія переважної більшості сучасних контролерів має в своєму складі аналого-цифрові перетворювачі, пріоритети вводу даних можна визначити за допомогою внутрішнього вектора переривань. Фільтрацію даних введемо в процедуру обробки відповідних переривань, а розрахунки залишаємо в тілі основного циклу. Послідовність обробки даних наведена в табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Послідовність вводу, виводу та обробки даних в допоміжному контролері

№	Операція	Тип звернення	Пріоритет (для переривань)	Порядковий номер (для основного алгоритму)
1	Видача даних за фронтом кадрового синхроімпульсу	Перер. зовнішнє	0	
2	Прийом даних з АЦП гіроскопу	Перер. внутрішнє	1	
3	Прийом даних з АЦП датчику диференційного тиску	Перер. внутрішнє	2	
4	Прийом даних з АЦП датчику абсолютного тиску	Перер. внутрішнє	3	
5	Обчислення коефіцієнтів фільтра Калмана	Лінійне		0
6	Обчислення середніх значень кутових швидкостей	Лінійне		1
7	Обчислення величини динамічного тиску	Лінійне		2
8	Обчислення величини статичного тиску	Лінійне		3
9	Обчислення істинної швидкості польоту	Лінійне		4
10	Обчислення проекції вектору кутового переміщення	Лінійне		5
11	Зведення даних в кортеж та встановлення флагу готовності даних	Лінійне		6

Блок-схема алгоритму програмного забезпечення, що реалізує дану послідовність обробки наведена на рис. 4.3.

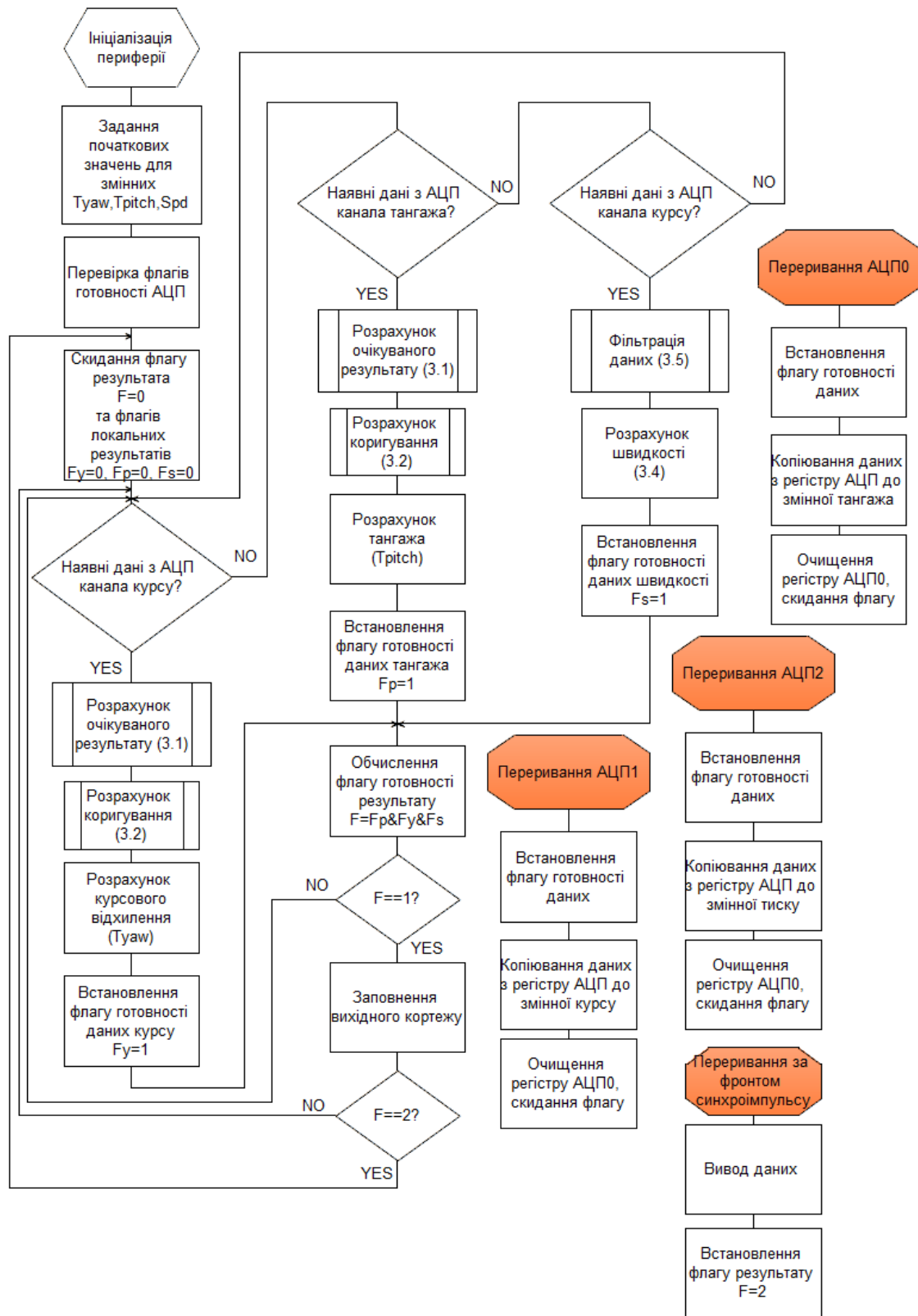


Рис. 4.3. Блок-схема алгоритму роботи допоміжного контролера

Наведений алгоритм забезпечує повну синхронізацію потоків даних від датчиків фізичних величин з відеопослідовністю, що дозволяє мінімізувати похибки в головному обчислювальному модулі і виключити можливість втрати даних при супроводі об'єкту.

Наступним етапом розробки алгоритму програмного забезпечення системи розглянемо роботу пристрою введення початкового цілевказання. Пристрій початкового цілевказання повинен забезпечувати ввід та обробку даних з ручного пристрою переміщення лінії візування та нашоломної системи цілевказання. Зупинимось на варіанті реалізації системи, який дозволяє визначити положення голови на основі положення реперних джерел випромінювання, розташованих на шоломі та оснащеному тензорезистивним кньюпелем для ручного зміщення лінії візування. Для вирішення задачі знаходження положення та орієнтації реперного вузла нашоломної системи необхідно провести наступне перетворення (perspective-n-point):

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

, де f_x, f_y - масштабовані фокусні відстані, R, T - матриці повороту та трансляції відповідно.

Оскільки конструктивно доцільно використовувати три реперних джерела, вирішення системи рівнянь є неоднозначним, тому доцільно використовувати пару оптичних датчиків, що дозволить отримати однозначний вектор орієнтації площини реперних джерел. Водночас, крім основної функції стеження за лінією візування прицільної мітки, підсистема початкового цілевказання має виконувати додаткові індикаторні функції:

- Візуалізація положення об'єкта під час супроводу;
- Контроль польоту: оскільки в системі наявні дані просторової орієнтації ЛА та висотно-швидкісні параметри, доцільно вивести їх на комбінер

нашоломного індикатора для більш оперативного сприйняття пілотажної інформації;

- Штучний зір: для ЛА, які можуть працювати безпосередньо біля поверхні доцільно виводити на нашоломний індикатор зображення, отримане з ІЧ камер або синтезоване з використанням матриць висот рельєфу.

Пріоритети та послідовності виконання операції для підсистеми початкового цілевказання наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3.

Пріоритети операцій в контролері попереднього цілевказання

№	Операція	Тип звернення	Пріоритет (для переривань)	Порядковий номер (для лінійних)
1	Захоплення КСІ	Зовн. перер.	0	
2	Захоплення ССІ	Зовн. перер.	1	
3	Аналоговий компаратор	Зовн. перер.	2	
4	Обчислення проєктивних координат	Проводиться при перериванні 2	–	–
5	Обчислення матриць R,T	Лінійне		0
6	Ввід даних висоти, швидкості, кутової орієнтації	Переривання внутрішнє (готовність АЦП)	3	
7	Формування зображення на індикаторі	Лінійне		1
8	Видача зображення в буфер дисплею	DMA, за готовністю	–	–
9	Ввід даних з АЦП тензодатчиків	Лінійне		0*

*додатково забороняються зовнішні переривання.

На основі вищенаведеної послідовності обчислення розроблено блок-схему алгоритму програмного забезпечення контролера початкового цілевказання. Додатково, до процесора контролера на етапі розробки фізичного пристрою висувуються наступні вимоги: частота повного опитування всіх каналів АЦП та аналогових компараторів повинна бути не нижча як $FPS \times X_{res} \times Y_{res}$, розрядність АЦП – не менша 10 біт, наявність FSMC DMA (інтерфейс, що дозволяє використовувати оперативну пам'ять дисплею в якості власної пам'яті процесора з прямим доступом. Блок-схема алгоритму програмного забезпечення контролера попереднього цілевказання наведена на рис. 4.4.

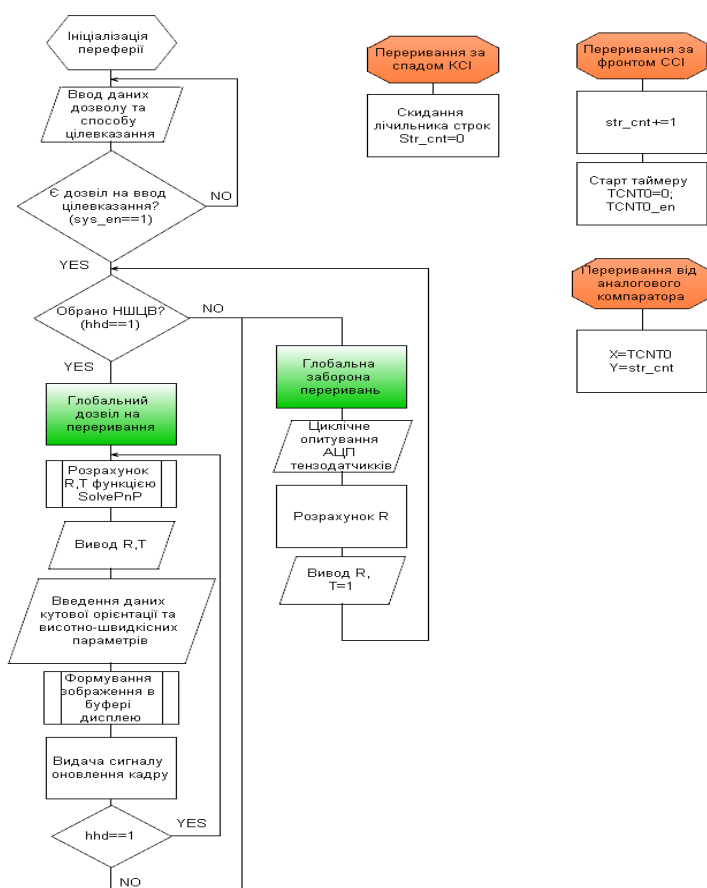


Рис.4.4. Блок-схема алгоритму програмного забезпечення модуля попереднього цілевказання

Видача інформації від підсистеми попереднього цілевказання ведеться асинхронно, тому для коректного вводу даних від неї в алгоритмі роботи

головного обчислювального модуля доводиться виділяти для цього окремий паралельний процес. Передача даних щодо попереднього азимуту та елевації об'єкту ведеться у вигляді матриці повороту та трансляції, оскільки в подальших розрахунках зручніше використовувати саме таке представлення інформації.

Окремі процедури перетворення числової інформації в графічну а також режими роботи FSMC і DMA в межах даного розділу не розглядаються, оскільки є стандартизованими для кожного типу процесорів.

Наступним кроком розглядається алгоритм роботи модуля механічної стабілізації. Він є стандартизованим рішенням і представляє собою двоканальний ПД-регулятор зі змінною впливу, пропорційною до алгебраїчної різниці поточного кутового положення камери та усередненого значення кутового положення ЛА.

Усереднення значення показників бортового МЕМС-пристрою ведеться за допомогою Калмановської фільтрації (4.1-4.2) та фільтром рухомого середнього (4.5) з таким розрахунком, щоб довжина вибірки відповідала часовому проміжку 0.3..0.5 сек. ПД-функція реалізується у дискретному вигляді [66]:

$$\begin{aligned}u(t) &= P(t) + I(t) + D(t) \\P(t) &= K_p e(t) \\I(t) &= I(t-1) + K_i e(t) \\D(t) &= K_d [e(t) - e(t-1)]\end{aligned}\tag{4.8}$$

, де I, P, D інтегральна, пропорційна та диференційна складові, K_i, K_p, K_d -їх відповідні коефіцієнти. Генерація керуючих сигналів проводиться за допомогою ШІМ і обробляється спеціалізованими драйверами сервоприводів.

Всі операції вводу, обчислення та виводу інформації є лінійними, для захисту від переповнення вхідного буфера передбачене його очищення після кожної ітерації циклу. Блок-схема алгоритму наведена на рис.4.5.

Розробку алгоритму програмного забезпечення головного обчислювального модуля слід проводити з урахуванням максимального використання багатоядерності центрального процесора та можливості розподілу операцій обробки зображення між головним та графічним процесорами. Для більшості одноплатних комп'юерних модулів, графічний процесор підтримує апаратне декодування інформації з CSI-відеопристроїв, матричні процедури, процедури переводу кольорових моделей, вивід відеоінформації в багат шарові вихідні буфери. Також необхідно максимально ефективно розподілити потоки вводу та обробки інформації між ядрами та периферійними пристроями центрального процесора а також синхронізувати потоки проміжних операцій для усунення можливості конфліктних ситуацій.

Розподіл операцій між центральним та графічним процесорами для мікроархітектури типу ARM v8 наведено в таблиці 3.4. При цьому розмежування оперативної пам'яті становить 3.5 Гб для основного процесора та 512 Мб для графічного. Введення відеоданих здійснюється за стандартом MIPI-4.

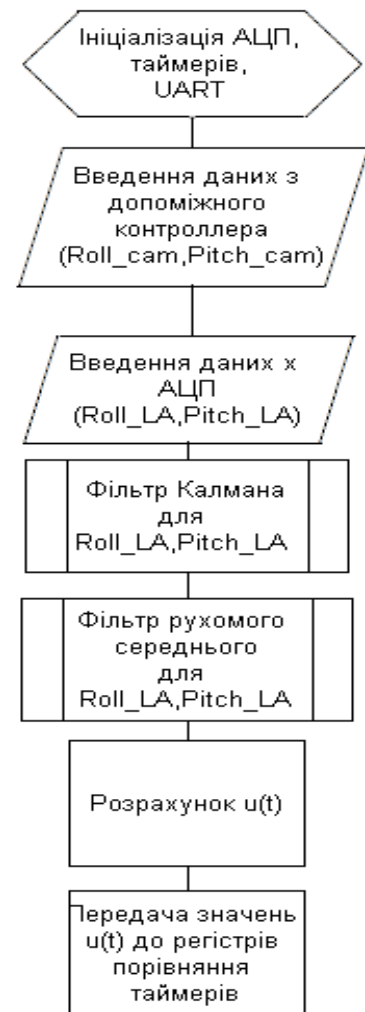


Рис.4.5. Блок-схема алгоритму роботи модуля механічної стабілізації камери

Таблиця 3.4.

Розподіл операцій між головним і графічним процесорами для ВСМ2711

Центральний процесор	Графічний процесор
Виділення меж	Введення відеоінформації до вхідного буфера
Обчислення контурів	Перетворення зображення в формат RGB
Фільтрація (фільтр Гауса, ерозія, ділатація)	Вивод відеоінформації до вихідного буфера
Розрахунок оптичного потоку в стереопарі	Вивод мнемонічних індикаторів та маркерів до багат шарового вихідного буфера
Розрахунок оптичного потоку в послідовності	Деаберація зображення
Фільтрація оптичних потоків	Утворення стереопари
Побудова катри глибини	
Побудова карти швидкостей	
Розрахунок цілевказання	

Розподіл обчислювальних потоків ведеться з урахуванням середньої тривалості операцій з мінімальним перекриттям структур даних. Доцільним є виділення в окремі потоки операції з асинхронним вводом даних, попередньої обробки відеопослідовності, остаточної обробки та безпосереднього розрахунку цілевказання. Також слід передбачити розділення операцій в потоках таким чином, щоб оновлення даних в глобальних змінних відбувалось в межах одного потоку, що дозволить уникнути необхідності блокування змінних в процесі перезавантаження даних та створення додаткових буферних масивів. Розподіл операцій обробки наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5.

Потоковий розподіл операцій в центральному процесорі системи.

Thread_1	Thread_2	Thread_3	Thread_4
Введення даних з асинхронного приймача, приведення даних до відповідних типів, заповнення структур.	Фільтрація вхідного зображення	Розрахунок оптичного потоку в стереопарі	Розрахунок цілевказання
	Ерозія, ділатація	Розрахунок оптичного потоку в послідовності	Генерація символіки для індикатора прямої видимості
	Фільтрація карт швидкості та глибини	Фільтрація стереопотоку	Переструктурування графічної інформації для виведення в буфер графічної пам'яті
		Фільтрація послідовного потоку	
		Побудова карти глибини	
		Побудова карти швидкості	

При розробці алгоритму програмного забезпечення в лінійній частині блок-схеми залишимо операції вводу відеокадру, перетворення кольорових моделей та корекцію абераційних викривлень. Узгодження потоків буде задаватися відповідними чергами та за допомогою флагів готовності даних. Блок-схема алгоритму програмного забезпечення для головного обчислювального модуля наведена на рис. 4.6.

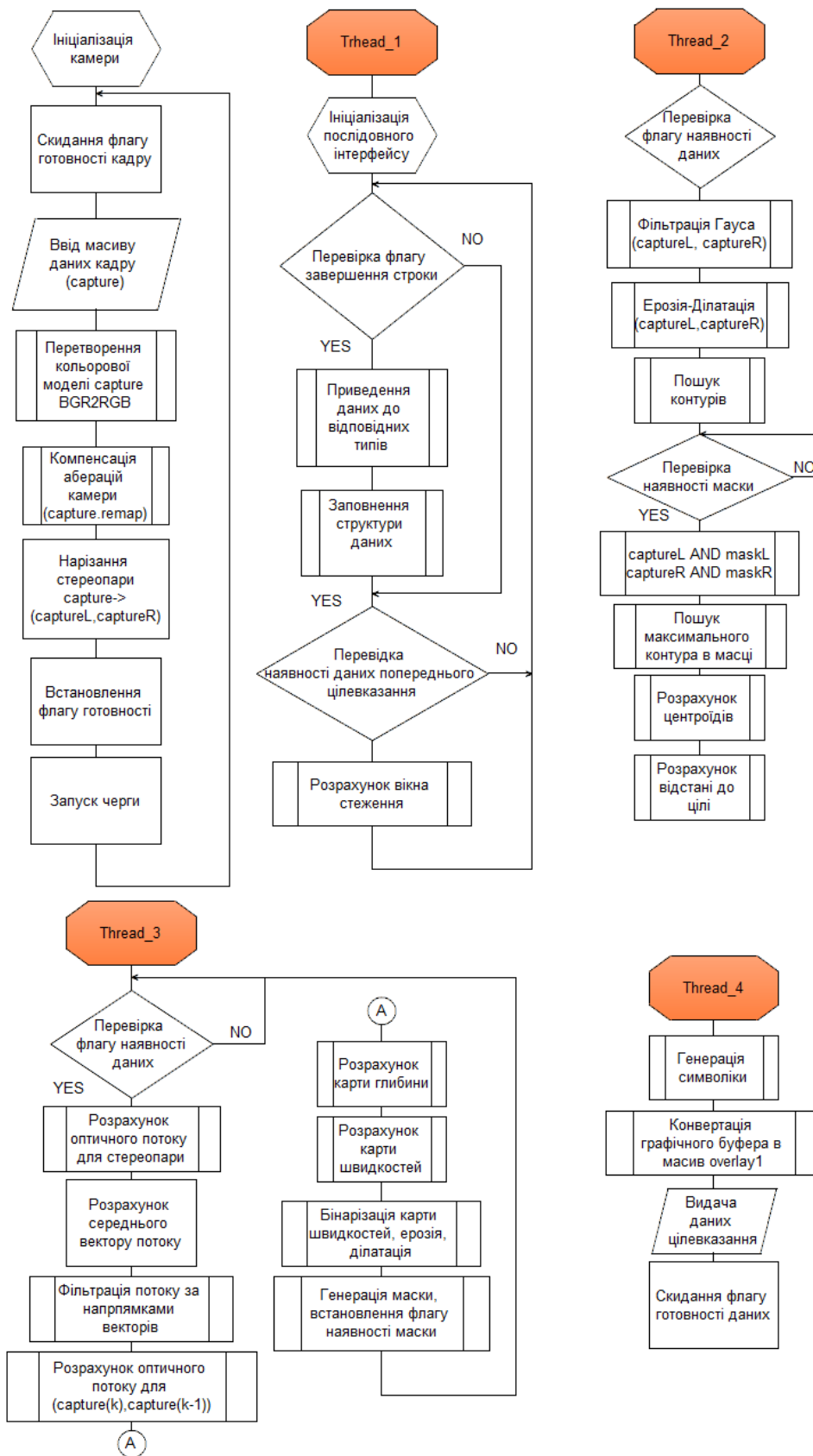


Рис. 4.6. Блок-схема алгоритму роботи головного обчислювального модуля.

4.3 Розробка структури програмного забезпечення для головного обчислювального модуля системи оптико-електронного позиціонування.

В рамках оптимізації процесу обчислення оптичного потоку та постобробки результатів розрахунків існує необхідність розробити структуру програмного забезпечення з метою оцінювання в першому наближенні швидкості обробки відеопослідовностей в залежності від можливостей обчислювального модуля та роздільної здатності камери. Особливу увагу слід зосередити на спрощенні аналітичних виразів, отриманих в попередніх розділах для прискорення розрахунків. Методики спрощення аналітичних виразів отримано на основі аналізу [67-95].

Оскільки первинна обробка відеоінформації здійснюється апаратно-залежними методами, розподіл функцій між центральним та графічним процесорами проводиться автоматично. Лінійно виконуються наступні операції початкової ініціалізації:

- Завдання фундаментальної матриці камери;
- Ініціалізація відеопристрою;
- Завдання параметрів (ядра) фільтра Гауса для карти глибини (при її візуалізації);
- Завдання початкової структури детектора меж Канні;
- Завдання ядер операторів ерозії та ділатації для генерації маски карти швидкостей;
- Завдання параметрів ерозії та ділатації для попередньої обробки кадру;
- Завдання параметрів детектора контурів (метод пакування, режим групування, зсув);
- Завдання параметрів розрахунку оптичного потоку Лукаса-Канаде (однакові для варіанту стереопотоку та послідовних кадрів) – розміру сітки, мінімальний та максимальний пороги, критерій зупинення ітераційного пошуку, розмір вікна;

- Завдання масштабного коефіцієнту опорного вектора для побудови карти глибини;
- Завдання масштабного коефіцієнту вектора швидкості (для селекції цілей за швидкісним фактором. Може змінюватись в процесі виконання програми).

Решта обчислювальних операцій проводиться в підпорядкованих потоках, які викликаються на початку основного циклу програми за допомогою зовнішнього модуля multiprocessing.

Так, функція для виконання першого потоку відповідає за зчитування з асинхронного приймача та приведення даних до встановлених типів. Оскільки робота функції базується на апаратному перериванні при отриманні байту від допоміжного контролера і передає дані в основний потік після завершення інформаційного кадру, оптимізація може проводитись виключно групуванням даних з інерційної та висотно-швидкісної підсистем з метою збільшення частоти оновлення даних щодо кутової орієнтації літального апарату: Графік, який ілюструє практичне дослідження впливу співвідношення між інформаційними кадрами на сталість детектування ключових точок наведено на рис. 4.7.



Рис.4.7. Вплив співвідношення між інформаційними кадрами на втрати КТ при аналізі відеопотоку.

Додатково проведено аналіз впливу співвідношення інформаційних кадрів на точність побудови карти глибини зображення в умовах зустрічного наближення. Результати наведені в графіку на рис. 4.8.

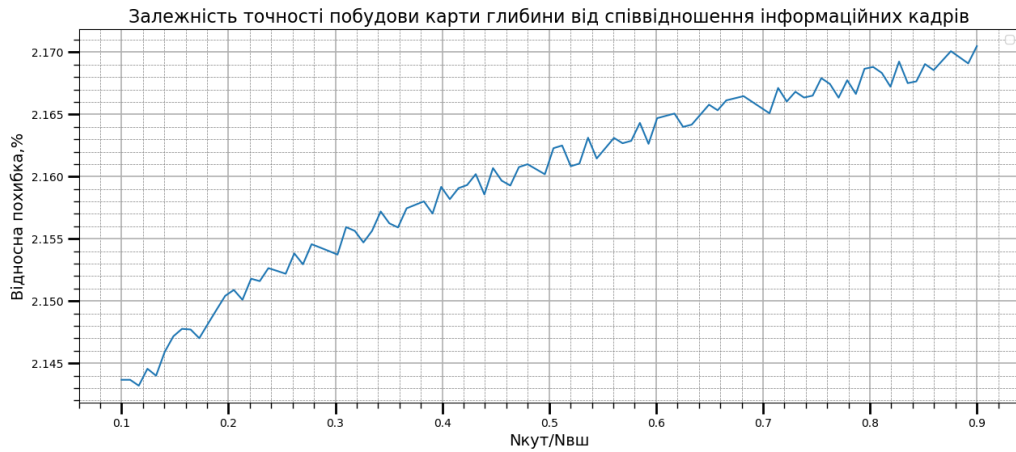


Рис.4.8. Вплив співвідношення між інформаційними кадрами на похибку при побудові карти глибини зображення

З графіку видно, що зміна частоти оновлення швидкісної та висотної інформації не вносить суттєвої похибки в обчислення карти глибини переважно за рахунок інертності літальних апаратів. Отже для подальшого використання при розробці програмного забезпечення обрано співвідношення інформаційних кадрів інерційної та висотно-швидкісної системи 8:2.

Для оптимізації попередньої обробки кадру та розрахунку оптичного потоку необхідно провести порівняння швидкості обробки у випадку примусового розподілу операцій згідно з табл. 4.5. та автоматичним розподілом. Також доцільно провести порівняння швидкості передачі інформації між функціями з включенням блокування даних в обох випадках. На рис. 4.9. наведено порівняльні характеристики швидкості попередньої обробки відеопослідовності в залежності від роздільної здатності кадрів відеопотоку та обраного типу розподілу.

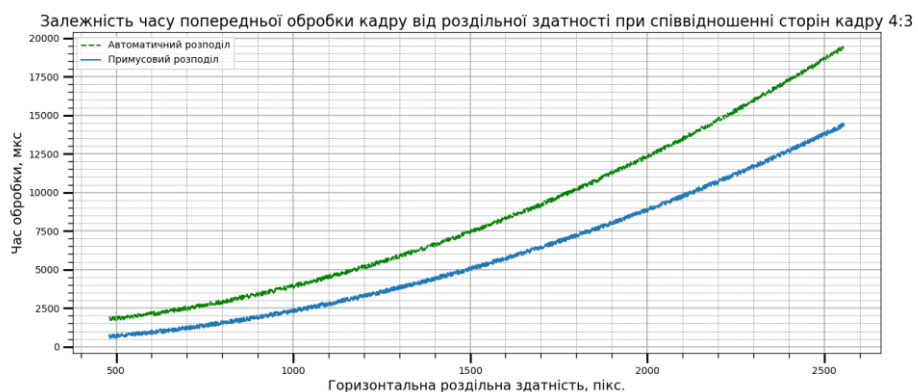


Рис.4.9. Порівняння швидкості попередньої обробки відеоінформації

Так само проводиться порівняння швидкості побудови оптичного потоку для випадку суцільного потоку Фарнебека. Результати розрахунку для кількості шарів масштабної піраміди $n=10$ наведено на рис.4.10.



Рис.4.10. Порівняння швидкості побудови оптичного потоку при $n=10$ для різних варіантів розподілу операцій між потоками.

Для оцінювання можливості обробки в режимі реального часу відеоданих з великою кількістю масштабних шарів було проведено додатковий розрахунок при $n=100$. В руальній системі з використанням широкопольного об'єктиву (35x26 град.) така кількість шарів забезпечує побудову карти глибини зображення в ефективному радіусі 15000м. при роздільній здатності 1920*1080. Результати наведено на рис. 4.11.

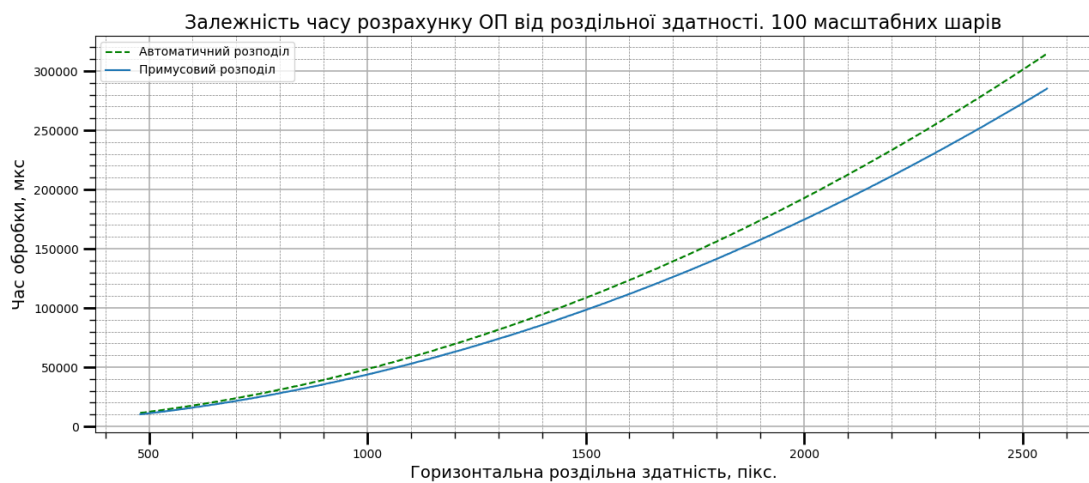


Рис.4.11. Порівняння швидкості побудови ОП при $n=100$.

Додатково було досліджено швидкість передачі даних між функціями при автоматичному та ручному розподілі інформаційних потоків. Результати зведено до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6.

Результати швидкісних тестів передачі даних між потоками.

Тип розподілу	Дані ІНС	Кольоровий кадр	Масив векторів ОП	Бінарне зображення	Одноканальне зображення
Автоматичний	23 мкс	417 мкс	98 мкс	93 мкс	156 мкс
Примусовий	23 мкс	207 мкс	96 мкс	74 мкс	91 мкс

Загальний приріст швидкості при використанні примусового розподілу операцій в головному обчислювальному модулі становить 15%, що необхідно враховувати при створенні програмного забезпечення систем оптико-електронного позиціонування.

Четвертий потік обробки забезпечує візуалізацію отриманої інформації, видачу її у вигляді структури азимут-елевація в інтерфейсні пристрої.

Визначення положення динамічної марки супроводу в пристроях візуалізації проводиться шляхом пошуку центроїда старшого контура після застосування маски. Додатково, для полегшення прийняття рішення щодо маневрування, до індикатора вводиться лінія прогнозування руху цілі, яка розраховується як дотична в поточній парі проєктивних координат до дуги, проведеної через три точки попередньо обчислених координат цілі. Також для психологічного розвантаження операторі на пристрій індикації виводяться допоміжні дані: кути крена та тангажа, прискорення, висота тощо. Оскільки основне навантаження в потоці приходиться на вивод графічної інформації, було проведено порівняння двох основних варіантів виводу графіки: DirectMMAL та NativeCV. Результати порівняння наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7.

Порівняння швидкості виводу графічної інформації для основних методів

Метод	640x480	720x560	1280x800	1920x1080
DirectMMAL	6.3мс	10.1мс	12мс	15мс
NativeCV	11 мс	11.7мс	17.8мс	22мс

Виходячі з даних порівняння, для виводу інформації було обрано платформу DirectMMAL, оскільки вона забезпечує меншу інертність інформаційного титру. Приклад візуалізації прицільних даних наведено на рис. 4.12.



Рис.4.12 Візуалізація даних цілевказання.

4.4. Дослідження роботи алгоритмів програмного забезпечення головного модуля системи оптико-електронного позиціонування.

Для знаходження значень коефіцієнтів фільтрів, ітераційних чисел операторів ерозії та ділатації, розмірності розрахункової сітки функції Лукаса-Канаде та інших параметрів, необхідно провести моделювання роботи розробленого програмного забезпечення. Використання тестових

послідовностей, отриманих без відповідних показників кутової орієнтації літального апарату дає лише приблизне уявлення щодо ефективності обчислення оптичного потоку. Отже, для моделювання роботи відеовузла було прийнято рішення створити відповідне програмне забезпечення, початковими даними якого були б матриці висот та текстур рельєфу, полігональні та текстурні масиви цілей; проміжними – швидкість, висота та кутове положення ЛА; вихідними – кадри відеопослідовності з прив'язкою до проміжних даних. Математична модель такого програмного забезпечення розглянута в другому розділі, лістинг програми наведено в додатку 2. Програмне забезпечення для спрощення було написано з допомогою макрообгортки OpenGL P3D. Для оцінки адекватності генерації відеопослідовності в оболонку додана візуалізація кадрів з виведенням даних щодо поточної орієнтації ЛА. Приклад роботи програми наведено на рис. 4.13.

Оператори попередньої обробки аналізуються за допомогою тестових відеопослідовностей, оскільки не мають прив'язки до просторового положення ЛА.

Аналізуючи вплив операторів попередньої обробки на результативність супроводу було встановлено, що найбільший вплив на точність вимірювання має оператор ерозії. При цьому розмірність ядра та ітераційне число впливають не лише на точність, а й на швидкість обчислення. Такий ефект викликаний кількістю дрібних контурів та ключових точок, які залишаються в розгляді в межах маски

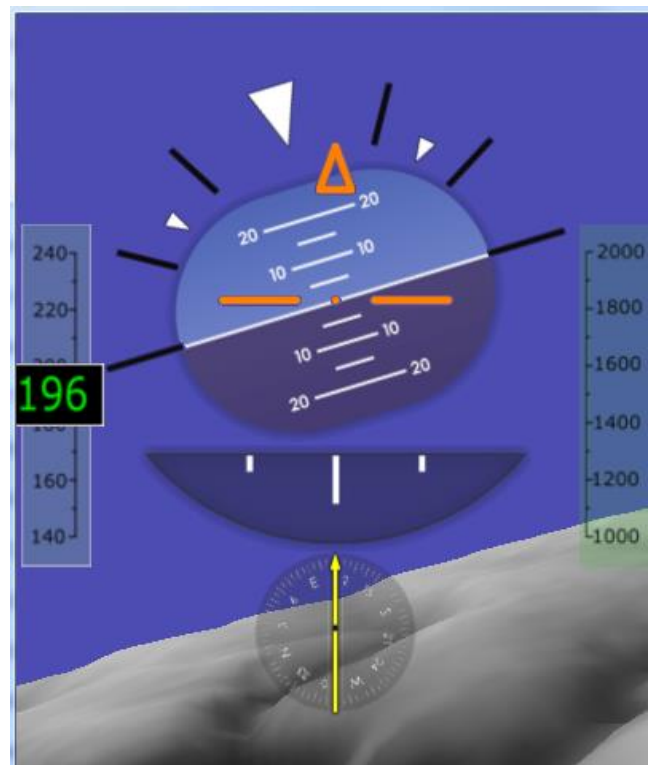


Рис.4.13. Вікно програми генерації тестової відеопослідовності.

і підлягають порівнянню. Для прикладу на рис. 4.14. наведено порівняння детектора контурів та детектора ключових точок для ерозії з ітераційним числом 2 (зліва) та 5 (зправа).



Рис.4.14. Вплив ітераційного числа оператора ерозії на детектори контурів та ключових точок.

Було також розглянуто способи підтвердження точності цілевказання порівнянням контурів та порівнянням дескрипторів ключових точок. Для зручності, основні отримані результати зведено в таблицю 4.8.

Таблиця 4.8.

Результати порівняння способів підтвердження цілевказання.

Параметр	Значення для контурного порівняння	Значення для порівняння дескрипторів КТ
Час обробки	3 мс	6 мс
Кількість кадрів сталого супроводу на догонному курсі без перезаповнення масиву	478	819
Кількість кадрів сталого супроводу на перетинаючому курсі	214	308
Кількість кадрів сталого супроводу при активному маневруванні цілі	43	278

Аналізуючи дані таблиці в якості підтверджуючого фактора було обрано порівняння дескрипторів ключових точок з перезавантаженням масиву КТ кожні 15 кадрів.

Основним фактором впливу для розрахунку оптичного потоку є розмір вікна. Відповідно, розглядаючи відеопослідовності, згенеровані за допомогою розробленого програмного забезпечення, було отримано результати, наведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9.

Вплив розміру вікна стеження на точність супроводу та час обробки.

minEigThreshold	maxLevel	winSize	Помилка	Час обробки, с
0.1	1	3	157,4285000	0,0014998
0.1	1	5	141,2771300	0,0015417
0.1	1	7	65,5367240	0,0015830
0.1	1	9	31,4928630	0,0015702
0.1	1	11	24,5364290	0,0016121
0.1	1	13	21,0288450	0,0016513
0.1	1	15	26,4307920	0,0016966
0.1	1	17	11,8516820	0,0017262
0.1	1	19	12,0752020	0,0017485

Відповідно до отриманих даних, обрано розмір вікна стеження 15X15, що дозволяє проводити розрахунок оптичного потоку в реальному часі із задовільною точністю при кадровій частоті 30 fps.

Висновки до розділу 4.

5. В ході роботи над розділом було створено функціональну схему системи оптико-електронного позиціонування, яка базується на методі аналізу оптичного потоку та проведено її адаптацію до повітряних і наземних носіїв;
6. Для обраної функціональної схеми було розроблено блок-схеми алгоритмів роботи програмного забезпечення основного та допоміжних обчислювальних модулів;
7. Було проведено доповнення та уточнення математичної моделі системи ОЕП з урахуванням особливостей роботи реальних систем. До моделі включено розрахунки кутової орієнтації та лінійної носія системи ОЕН, фільтрацію показників датчиків фізичних величин, обчислення попереднього цілевказання з використанням нашоломної системи та ручного вводу.
8. Було створено структуру міжплатформового програмного забезпечення для основного модуля системи з урахуванням розподілу інформаційних та обчислювальних потоків. При розробці структури програмного забезпечення було проведено адаптацію розрахунків з урахуванням особливостей роботи сучасних процесорів для прискорення обробки вхідних даних.
9. Було створено пакет прикладного програмного забезпечення для оцінки впливу параметрів окремих функцій попередньої та потокової обробки відеопослідовності, визначено в першому наближенні показники фільтрів та проведено коригування програмного забезпечення головного обчислювального модуля.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ КОМПЛЕКСА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТА ІХ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для застосування розробленого принципу оптико-електронного позиціонування необхідно реалізувати фізичний пристрій відповідно до функціональної схеми, наведеної в третьому розділі. Пристрій має задовільняти вимогам ДСТУ 3589-97 та ДСТУ 3271-95 для можливості проведення стендових та льотних випробувань.

Дослідна система складається з наступних блоків: основний обчислювально-індикаторний блок (включає в себе головний обчислювальний модуль, індикатор прямої видимості, допоміжний контроллер, контроллер системи початкового цілевказання, датчики диференційного та абсолютного тиску, датчик просторової орієнтації ЛА, контроллер механічної стабілізації камери); стереокамера з пристроєм механічної стабілізації та інтегрованим мікромеханічним датчиком кутових прискорень; індикатор на лобовому склі (включає в себе проєкційний пристрій, голографічний комбінер, сервісний контроллер, пульт керування режимами роботи, оптичні датчики нашоломної системи початкового цілевказання); нашоломна система індикації та цілевказання (включає в себе реперний пристрій, коліматорний індикатор, інтерфейсний блок); пристрій ручного цілевказання (мультифункціональна ручка керування літальним апаратом).

Завданням даного розділу є розробка схеми електричної принципової та конструкції блоків системи оптико-електронного наведення з урахуванням діючих стандартів до бортових комплексів радіоелектронної апаратури, проведення стендових та льотних випробувань та обробка отриманих результатів.

5.1. Розробка дослідного комплексу оптико-електронного позиціонування.

5.1.1. Розробка принципової схеми комплексу.

Розробку схеми електричної принципової доцільно розпочати зі складання розгорнутих функціональних схем для кожного блоку системи. При цьому необхідно зосередити окрему увагу на фізичній реалізації протоколів обміну між елементами схеми з урахуванням відстаней між блоками та діючими електромагнітними перешкодами. Розробку розширеної функціональної схеми головного блоку розпочнемо з вибору елементної бази. В якості головного обчислювального модуля після порівняльного аналізу наявних на ринку модульних комп'ютерів було обрано Raspberry Compute module 3+. Він відповідає регламентованим вимогам до кліматичного виконання, вібро- та ударостійкості, забезпечує апаратну підтримку CSI графічним процесором, має об'єм оперативної пам'яті 2 Гб з можливістю довільного розподілу адресного простору між відеобуфером та основним банком. Центральний процесор включає 4 ядра архітектури ARM-V8; інтерфейси вводу/виводу даних UART, I2C, SPI, USB2.0. [108]

Допоміжний контроллер будується на базі процесора STM32F407WGT, який забезпечує необхідну кількість каналів АЦП та зовнішніх переривань, має відповідні апаратні інтерфейси, які не потребують узгодження TTL рівнів з головним модулем. Тактова частота процесора 86 МГц, об'єм флеш-пам'яті 1 Мб, оперативна пам'ять 192 кб, інтерфейси 2xI2C, 6xUART, SPI, CAN, архітектура 32-bit ARM-cortex-M4 [109]. Процесор також відповідає вимогам до кліматичного виконання та вібростійкості. Оскільки робота дослідного комплексу передбачається в діапазоні швидкостей 100...800 км/год та в діапазоні висот 0...4000 м, в якості датчиків диференційного та абсолютного тисків було обрано датчики виробництва NXP MPX5010DP та MPX4115AP відповідно. Вони забезпечують достатню роздільну здатність у всьому діапазоні висот та швидкостей – 3 м для вимірювання висоти та 0.8 м/с для вимірювання повітряної швидкості. Для визначення просторової орієнтації

використовується датчик BOSN BNO055[110]. До переваг даного датчику відносяться: наявність вбудованого мікроконтролера, який реалізує фільтрацію власних шумів гіроскопу, що розвантажує основний контролер; наявність трьохвісьового акселерометру, що дозволяє коригувати значення кутових відхилень при дії лінійних прискорень; наявність магнетометра, який дозволяє отримати дані щодо істинного курсу ЛА та скоригувати значення абсолютної орієнтації відносно магнітного поля землі; вивод інформації в цифровому вигляді за допомогою інтерфейсів UART та I2C, що дозволяє звільнити додаткові АЦП контролера.

Оскільки розміщення в носовій частині ЛА цифрової CSI камери є неможливим, додатково в схему введено конвертаційну пару 1080p-HDMI-CSI. Для цього використовуються серійні модулі V101-38156 та X11355. Для можливості керування режимами відображення ІПВ та вводу параметрів цілі в схему додано клавіатуру та два інкрементальних енкодера.

Для зв'язку між модулями системи використовується асинхронний послідовний інтерфейс з параметрами 115200Bod, 3.3V TTL, 1Sb. В якості контролера механічної стабілізації обрано AtMega328p. Сервоприводи – XRotor 2405 2250K зі швидкістю відгуку 3 мс. Система початкового цілевказання для обробки сигналів з датчиків використовує AtMega8, розрахунки проводяться модулем на базі Atmega2560, для формування зображення на нашоломному індикаторі використовується зв'язка AtMega328p – ST7735. Для додаткового аналізу система оснащується GPS-модулем uBlox-N8MN. Це дозволяє отримувати дані щодо поточного положення ЛА відносно поверхні та розраховувати коригований супровід відносно SRTM масиву.

В індикаторі на лобовому склі використовується проективна транспарентна DLP-матриця LS055R1SX03 з роздільною здатністю 2560x1440, додатково ІЛС оснащено індикатором режиму, який виконано на зв'язці AtMega2560-PS035MLH04-02.

Розширена функціональна схема головного блоку системи наведена на рис.5.1.

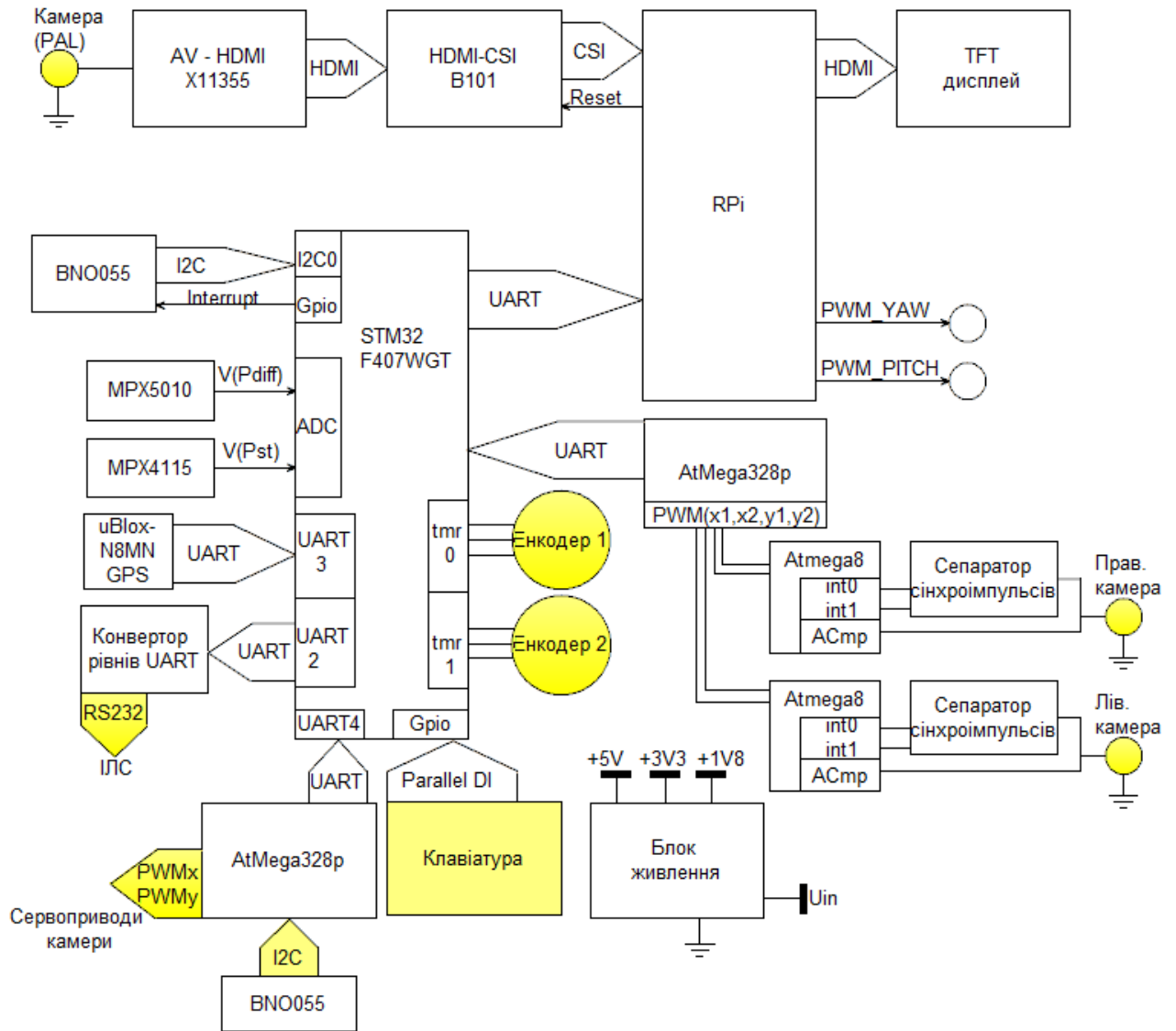


Рис.5.1. Розширена функціональна схема головного блоку системи ОЕП

Розробку принципової схеми проведено в декілька етапів. Першим етапом було розроблено секцію допоміжного контроллера. Принципова схема секції наведена в додатку 4. Схему побудовано на основі рекомендацій виробника [109], додатково для підвищення завадостійкості системи реалізована гальванічна розв'язка елементів схеми від зовнішніх пристроїв керування (клавіатури та кнопуля), для обробки сигналів інкрементальних

енкодерів використовуються відповідні лінії вводу/виводу таймерів TIM1 і TIM0, які дозволяють в фоновому режимі змінювати значення регістрів лічильників. Для виключення явища «дребезгу контактів» використано релаксаційні кола. Оскільки схемою передбачено зв'язок блоку з індикатором на лобовому склі за послідовним асинхронним інтерфейсом, в пристрій введено конвертор рівнів UART-RS232 для підвищення надійності передачі даних. При цьому лінії DTR CTR не задіюються. Датчики абсолютного та диференційного тисків в якості вихідного сигналу видають напругу в діапазоні 0..3.3В, пропорційну до тисків, що вимірюються. Згідно з документацією датчики містять в своєму складі компенсатори температурного дрейфу, відповідно додаткових мір з термокомпенсації не потребують[111].

Секція початкового цілевказання будується на трьох окремих контролерах. Таке ускладнення виправдано необхідністю обробки даних від несинхронізованих оптичних датчиків. В якості оптичних датчиків використовуються ПЗЗ-камери з вихідним форматом 576і, що забезпечує точність позиціонування 0.017мРад. Камери додатково оснащуються ІЧ-фільтром з нижнім порогом пропускання 920нм для початкової селекції сигналів реперних світловипромінювачів. Сигнал з камери одночасно потрапляє на сепаратор синхроімпульсів LM1881 і на верхнє плече аналогового компаратора контролера AtMega8. Сигнали кадрової та строчної синхронізації потрапляють на входи переривань контролера Int0 та Int1 відповідно. Вихідні дані передаються: за координатою x – з вихода регістру порівняння таймера0, за координатою y – з виходу регістру порівняння таймера1. Пакети даних координат реперних випромінювачів обробляються в контролері AtMega328 за співвідношеннями, розглянутими в розділі 3 і видаються у вигляді матриці повороту через послідовний інтерфейс в допоміжний контролер. Принципова схема секції початкового цілевказання наведена в додатку 4.

Схема секції контролера механічної стабілізації наведена в додатку 4. Ввод даних кутової орієнтації ЛА з допоміжного контролера здійснюється за допомогою асинхронного послідовного інтерфейса, ввод даних з гіросопа камери здійснюється за допомогою шини i2c з зовнішнього модуля кутової орієнтації. Сигнали керування драйверами сервоприводів генеруються на виходах цифрових компараторів таймерів OC0 та OC1A.

Розширена функціональна схема індикатора на лобовому склі наведена на рис. 5.2. Обчислювальна частина побудована на модулі, VAR-SOM-OM37, також до складу схеми входить контролер AtMega2560, який обслуговує індикатор додаткових параметрів і периферію керування режимами.

DLP-матриця LS055R1SX03 обрана з міркувань високого контрасту (15000:1), відсутності поляризатора та великої роздільної здатності, що дозволяє отримати на індикаторі зображення, яке за характеристиками не поступається CRT- пристроям. Оскільки вихідний сигнал

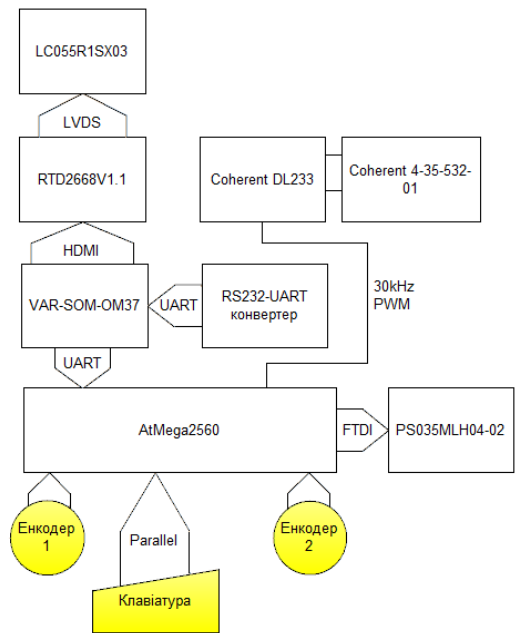


Рис.5.2. Розширена функціональна схема індикатора на лобовому склі.

обчислювального модуля передається в інтерфейс HDMI, додатково в схему введено серійний модуль RTD2668V1.1, який виконує перетворення HDMI-LVDS. В якості монохроматичного джерела світла обрано лазерний модуль Coherent 4-35-532-01, який забезпечує яскравість 2500 нт. Обмін даними з голоним модулем здійснюється за протоколом RS232 з відповідним перетворенням в UART TTL 3V3. Схема електрична принципова індикатора на лобовому склі наведена в додатку 4.

Функціональна схема модуля нашоломного цілевказання та індикації наведена на рис. 5.3. Контролер AtMega328 виконує роль знакогенератора, керує реперними джерелами та підсвіткою матриці. Підсвітка виконана світлодіодною, загальною потужністю 3 Вт та спектральним максимумом 515нм. Принципова схема пристрою нашоломної індикації наведена в додатку 4.

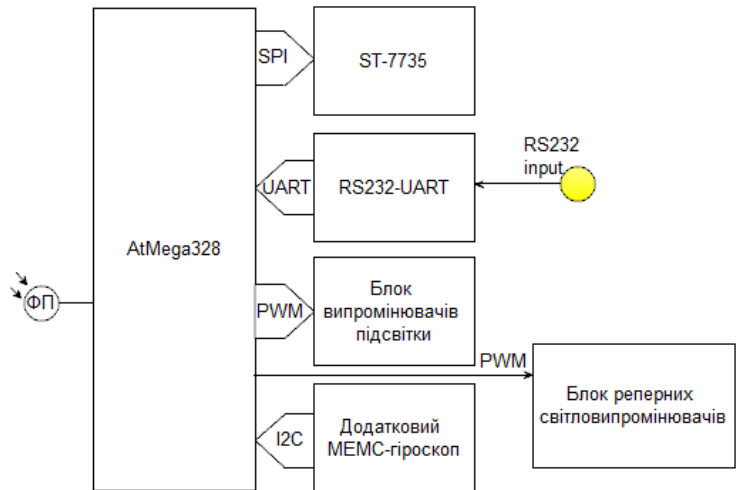


Рис.5.3. Функціональна схема модуля нашоломної індикації та цілевказання.

5.1.2. Розробка конструкції стереокамери

При розробці стереовузла було розглянуто два варіанти виконання: з окремими камерами та з однією камерою, оснащеною дзеркальною системою розділення кадру. Стереовузол з двома окремими камерами було побудовано на базі схеми, наведеної в підрозділі 1.4. Лінійна стереобаза становить 64 мм, кутова – 2 град., апертури об’єктивів – 35 мм (еквівалентні). ПЗЗ-сенсор IMX219 (роздільна здатність – 1920x1080, динамічний діапазон – 67дБ, 30 кадрів/сек, чутливість 680 мВ/лк, горизонтальне та вертикальне поля зору

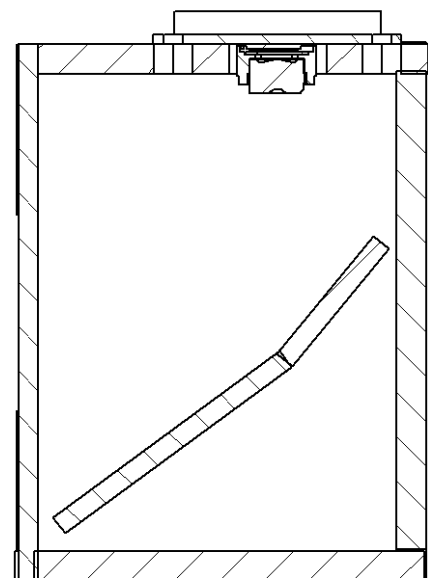


Рис. 5.4. Стереовузол з оптичним розділенням півкадрів

Стереовузол з оптичним розділенням розроблено на базі аналогічного сенсора. Лінійна стереобаза становить 25мм, кутова – 2 град. Загальний вигляд вузла наведено на рис. 5.4.

Порівняння результатів роботи було проведено за кількістю захоплених пар ключових точок при зведенні стереопари в межах вікна оператора Лукаса-Канаде в умовах факторів впливу відносно статичного зображення . Для зручності результати зведено в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1.

Порівняння систем зйому відеоінформації.

Фактор впливу	Система з двома камерами	Система з оптичним розділенням
Зміна освітлення	60%	97%
Вібрації носія	91%	93%
Маневрування цілі	87%	74%
Електромагнітні наводки на лінію передачі даних (смуга частот 20..150 МГц, амплітуда наведених коливань – 10 мВ)	41%	63%
Введення в поле зору камери еквівалента засобу оптико-електронної протидії	36%	41%

Додатково, при виборі конструктивного виконання вузла було враховано наступні чинники:

- При використанні двох камер необхідно проводити окрему калібровку для кожного елемента стереопари за співвідношеннями 2.14., що збільшує час деаберації кадру;
- Вбудований в сенсор сигнальний процесор забезпечує автоматичне та примусове налаштування швидкості затвору для забезпечення роботи матриці в динамічному діапазоні. Робота в автоматичному режимі характеризується

суттєвими розбіжностями в показниках порогів бінарзації зображення, отже необхідно розглядати обидва напівкадри окремо, що також потребує додаткових обчислень. Введення додаткового експонетра для примусового керування швидкістю затвору не збільшує ефективності роботи системи за рахунок неоднорідності ПЗЗ-матриць камер та у випадку різкої зміни освітлення може призвести до «засвічування» напівкадру від більш чутливої камери;

- Розбіжності в геометричних параметрах лінз, які виникають в процесі виготовлення, непаралельності фокальних площин матриць та лінз обумовлюють наявність афінних та масштабних викривлень, які необхідно програмно компенсувати в процесі обробки.

- У випадку використання оптичного розділення розхдільна здатність системи зменшується вдвічі.

Враховуючі всі вищезазначені чинники було обрано остаточний варіант реалізації вузла з оптичним розділенням. Характеристики камери забезпечують ефективну роботу дослідної системи в радіусі 5000 м. для цілей з базою 7м. і більше (в перерахунку 16 пікселів на зображенні).

При конструюванні стабілізатора камери було обрано наступні характеристики: точність позиціонування – 0.03 град.; максимальна швидкість для кожної вісі – 1300 град/сек; обертовий момент сервоприводів – 150 Нм; Максимальні перевантаження - +12..-6 G. Враховуючи зазначені характеристики, в якості сервоприводів були обрані безколекторні двигуни з інкрементальними датчиками положення валів XRotor 2405



Рис. 5.5. Макетний зразок стереовузла

2250К. Для підвищення завадостійкості плата драйверів двигунів розміщена безпосередньо на карданному вузлі. Компенсація вібрацій конструкції забезпечується амортизаційними втулками в діапазоні 30..900 Гц. Д. Фотографія вузла у макетному винонанні наведена на рис. 5.5.

При проведенні льотних випробувань для захисту апаратури від зовнішніх впливів стереовузол закріплюється в контейнері FixDW09-4, при цьому додатково накладаються обмеження обертання за каналом крена $\pm 90^\circ$, за каналом тангажа $+30^\circ - 50^\circ$, за курсовим каналом $\pm 60^\circ$.

5.1.3. Розробка обчислювального блоку з індикатором прямої видимості

При проектуванні блоку основну увагу було зосереджено на індикаторі прямої видимості. Основні характеристики, які обумовлюють зйом візуальної інформації це: форма і розмір індикатора; кути огляду; роздільна здатність; яскравість зображення та розподіл яскравості по поверхні екрану; контрастність зображення; коефіцієнти відбиття; точність відтворення зображення.

Яскравість індикатора обрана за стандартом MIL-L-85762A, який регламентує для кольорових індикаторів норму 343 кд/м^2 . Вищезазначений стандарт рекомендує співвідношення сторін 4:3 з «портретним» розташуванням екрана, але з міркувань виводу проміжних результатів обчислення для аналізу процесу наведення було обрано екран зі співвідношенням 16:9 з горизонтальною орієнтацією. Таким чином, з урахуванням співвідношення сторін напівкадра стереопари (8:9) існує можливість перегляду кінцевого результату роботи комплексу паралельно з будь-яким етапом обробки зображення.

Виходячі з компоновання кабіни ЛА і відстані спостереження 470 мм розрахований рекомендований розмір пікселя матриці становить:

$$S = \frac{tg\alpha}{D} = \frac{tg0,016}{470} = 0.087 \text{ мм}$$

Кути огляду, регламентовані стандартом MIL-L-85762A становлять 120° по горизонталі та 60° по вертикалі.

Виходячи з вищенаведених характеристик в якості пристроя індикації було обрано дисплей Mitsubishi AA070ME01-T1[112].

Для керування режимами прицільної та навігаційної інформації на передній панелі встановлена шестикнопочна клавіатура, введення бази цілі здійснюється за допомогою інкрементального енкодера. Комунікаційні роз'єми розташовані на задній панелі.

Додатково було проведено розрахунок теплового режиму для герметичного корпусу пристроя відносно найбільш критичного елемента – eMMC модуля для висотного діапазону 0...4000м. Розрахунок показує необхідний об'єм повітря в корпусі блоку 0.0094 м^3 , ефективну площу 0.048 м^2 .

5.1.4. Розробка конструкції індикатора на лобовому склі

Введення в загальну схему комплексу блоку індикації на лобовому склі обумовлено двома факторами: необхідністю оперативної реакції оператора системи на маневрування цілей без зниження безпеки польоту та необхідністю отримувати точну прицільно-навігаційну інформацію в умовах підвищених вібрацій [100].

При проектуванні блоку ІЛС було розглянуто два варіанти реалізації конструкції: рефрактивного та катадіоптричного типів. Узагальнені оптичні схеми індикаторів наведені на рис. 5.6. Для рефректорного індикатора цифрами позначені: 1 – проєкційний екран; 2 – дзеркало з зовнішнім напиленням; 3 – коліматор; 4 – напівпрозорий комбайнер. Для катадіоптричного: 1 – проєкційний екран; 2 – об'єктив; 3 – дзеркало; 4 – фокальна поверхня; 5 – силовий комбайнер.

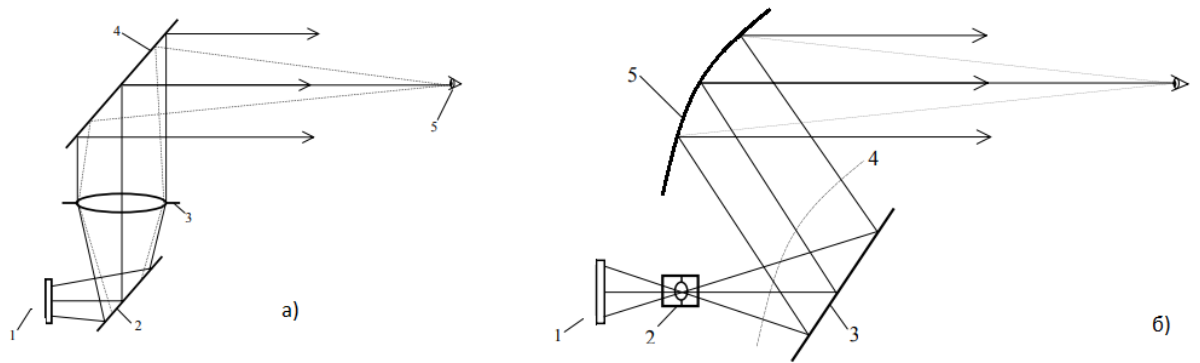


Рис. 5.6. Узагальнені оптичні схеми рефракторного (а) та катадіоптричного (б) індикаторів на лобовому склі.

Оскільки варіант реалізації з силовим комбайнером забезпечує кращі масогабаритні показники при збереженні миттєвого та повного поля огляду, було вирішено зупинитись на катадіоптричній схемі.

При проектуванні вузла було вирішено відмовитись від використання променевої трубки на користь DLP-матриці з високою роздільною здатністю (2560x1440). Оскільки DLP-пристрій є по суті масивом мікродзеркал і не використовує поляризаторів, в якості підсвітки можна використати напівпровідниковий лазерний випромінювач. Такий підхід зменшує продольний габарит конструкції на 60% і не потребує високовольтного живлення при збереженні характеристик контрастності та яскравості зображення.

Особливу увагу при проектуванні було приділено силовому комбайнеру. Задані характеристики миттєвого та повного поля огляду ($\phi 25^\circ, \phi 30^\circ$ відповідно) за умови компоновання кабіни, яке регламентовано стандартом MIL-L-85762A обумовлюють діаметр активної зони комбайнера 196мм, що накладає певні технологічні обмеження та призводить до збільшення маси комбайнера. Для усунення цього недоліку було вирішено виготовити комбайнер у вигляді рефлекторного голографічного оптичного елемента з дифракційною ефективністю не менше 80% для довжини хвилі 515 нм. Для створення голографічного оптичного елемента було обрано схему Денисюка [114], запис голограми проведено розколімованим когерентним лазером з довжиною хвилі

480nm із заповненням проміжку між об'єктом та фотопластиною імерсійним середовищем. Комбайнер має ефективність відбиття в робочому діапазоні 87% та фототиповий коефіцієнт 93%. Зовнішній вигляд виготовленого таким способом комбайнера наведена на рис. 5.7..

Оскільки оптична схема індикатора на лобовому склі не дозволяє подальше зменшення фронтальних габаритів за рахунок наявності дзеркала 3, простір на фронтальній панелі було вирішено використати для індикації додаткових параметрів (бази цілі,

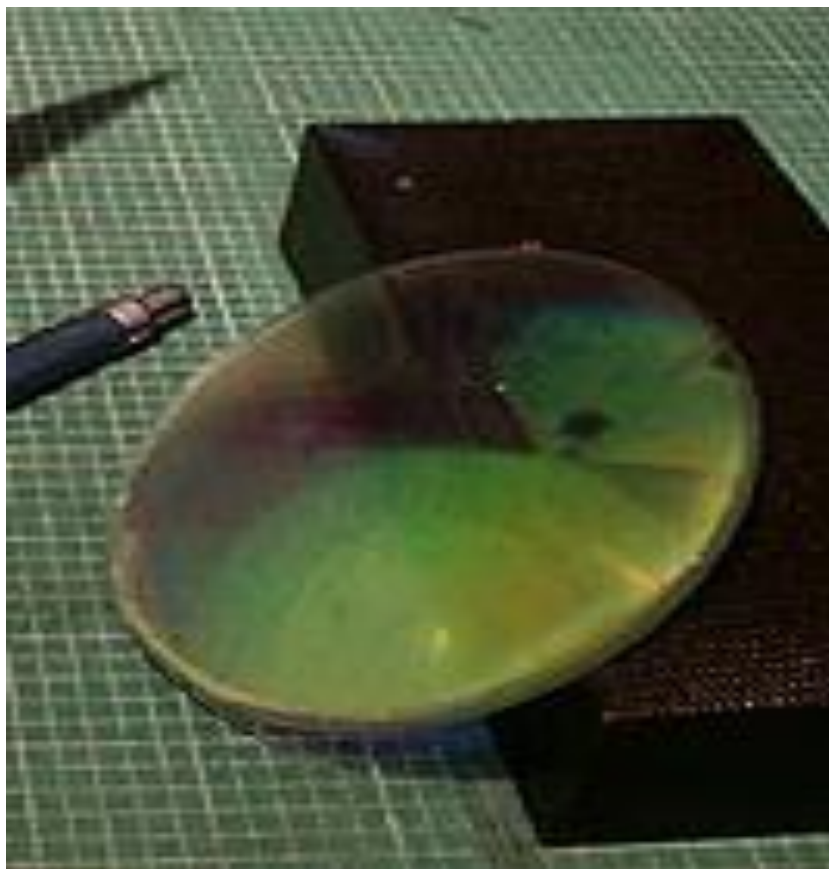


Рис.5.7. Зовнішній вигляд голографічного оптичного елемента силового комбайнера

відстані, режиму роботи індикатора, факторів достовірності супроводу, тощо) та пристроїв вводу початкової інформації (селектор режимів роботи ІЛС, енкодер введення бази цілі, клавіатура керування режимами відображення додаткової інформації).

5.1.5. Розробка конструкції нашоломного індикатора

Оскільки введення попереднього цілевказання за допомогою кнЮпеля з індикацією прицільної марки на ІЛС можливе лише в діапазоні кутів повного поля зору індикатора, що накладає певні експлуатаційні обмеження на систему [101], було вирішено дооснастити дослідний комплекс системою нашоломного цілевказання. Було вирішено також доповнити систему коліматорним

індикатором для відображення основної прицільної і навігаційної інформації. Конструктивно, вузол реперних світловипромінювачів була розроблена аналогічно з нашоломним вузлом системи «Сура-М» КП «Арсенал» для забезпечення сумісності з кронштейном кріплення ЗШ-7АП. Візирна система коліimatorного типу була перероблена з урахуванням принципової схеми пристрою та заданих масогабаритних характеристик.

Для дослідного екземпляра системи було обрано монокулярний варіант візирного вузла з метою уникнення необхідності зведення зображення, яка існує в бінокулярних системах. Типові оптичні схеми нашоломних коліimatorних індикаторів аналогічні зі схемами індикаторів на лобовому склі, але в даному випадку доцільно використовувати рефракторну схему. Вибір схеми обумовлений тим, що з метою підвищення безпеки експлуатації пристрою комбайнер виконано з полікарбонату, що не дозволяє нанесення голографічного покриття. Але з урахуванням апертури вихідного зрачка системи 50 мм габаритні і масові показники не виходять за межі рекомендованих. Нанесення світловідбиваючого шару на комбайнер забезпечує фототиповий коефіцієнт 70% та ефективний коефіцієнт відбиття 30%, це накладає певні обмеження на використанні пристрою в умовах низької освітленості, тому для забезпечення безпеки польоту було обрано варіант реалізації відкидного візиру з фіксацією в обох кінцевих положеннях. Приклад індикації у візирному

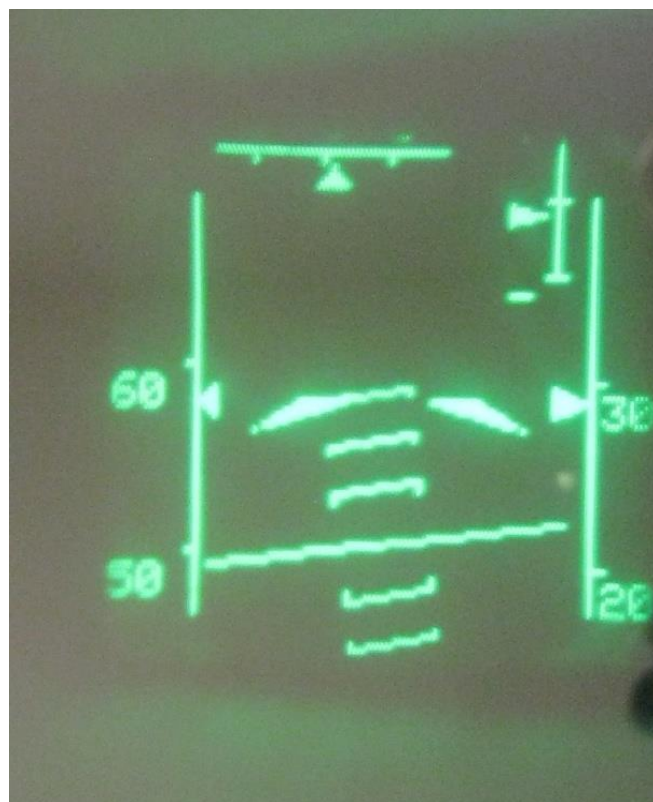


Рис.5.8.Індикація навігаційних параметрів у візирному пристрої

пристрої наведено на рис. 5.8. Для запобігання засліплення оператора в систему додактовано введено фотодатчик освітленості, який дозволяє проводити регулювання яскравості підсвітки в діапазоні 5000:1 з максимумом $6000 \text{ кд} / \text{м}^2$.

Фотоприймачі системи нашоломного цілевказання розташовані безпосередньо на приборній панелі і є серійними вузлами. Стереобаза обирається за конструктивними особливостями компонування кабіни та вводиться в програму при початковій калібровці пристрою. Діапазон цілевказання системи в фотореперному режимі - 37° , в гіроскопічному - 360° . Експериментально отримана точність початкового позиціонування в обох режимах – 0.03°

5.2. Розробка методу адаптивної фільтрації високочастотних шумів зображення на базі аналізу оптичного потоку.

На першому етапі випробувань дослідного комплексу оптико-електронного позиціонування в програмному забезпеченні головного обчислювального модулю фільтрація високочастотних шумів проводилась за допомогою медіанного фільтру та фільтру Гауса. Проте при використанні об'єктиву з вузьким полем зору частина інформації з периферійної області кадру при великих швидкостях наближення до об'єктів втрачається за рахунок надмірно швидкого розмиття оптичного потоку. Приклад кадру з периферійним розмиттям наведено на рис.5.9.



Рис.5.9. Розмиття кадру у вузькому полі системи

Оскільки підвищення швидкості роботи затвору камери призводить до зменшення яскравості зображення в цілому, для фільтрацію зображення було вирішено проводити посегментно.

Для адаптації розмірностей компонент фільтру використовуються значення модулів векторів оптичного потоку, отримані при розрахунку оптичного потоку у широкопольному об'єктиві. Для кожної зони зображення знаходиться середнє відхилення від оптичної вісі камери за співвідношенням (5.1):

$$D_{np} = D_p - \sum_{i=0}^{n_k} T A S_i, | \bar{p} |_{np} = K_{zoom} \sqrt{x_{pix}^2 + y_{pix}^2} atg \frac{D_{np}}{D_{cnt}}. \quad (5.1)$$

Для фільтрації зображення сегментується на прямокутні ділянки. При цьому розмірність матриці фільтру для кожної ділянки розраховується окремо з урахуванням швидкості роботи затвору камери v_{exp} та кута орієнтації вектору оптичного потоку α_{mcl} за співвідношенням (5.2):

$$x_{gauss} = (0, 0, 0.53 \frac{v_{exp}}{\Delta l | \bar{p} |_{np} \sin \alpha_{mcl} / L_{sp}})$$

$$y_{gauss} = (0, 0.53 \frac{v_{exp}}{\Delta l | \bar{p} |_{np} \cos \alpha_{mcl} / L_{sp}}, 0)$$
(5.2)

Приклад використання адаптивного фільтру наведено на рис. 5.10.



Рис.5.10. Результат адаптивної фільтрації при розмитті периферійної частини кадру

Використання адаптивного фільтру дозволило скоротити втрати кількості правильно розпізнаних ключових точок оптичного потоку в маловисотних режимах з 15 до 9% та підвищити загальну інформативність кадру, при цьому експериментальні дослідження показують зменшення залежності кількості правильно захоплених точок цілей від рельєфу місцевості.

5.3. Практичне дослідження методу оптико-електронного наведення на основі аналізу оптичного потоку.

Практичне дослідження проводилось в два етапи. На першому етапі програмне забезпечення було скориговане з метою отримання серії відеопослідовностей з прив'язкою до параметрів просторового положення ЛА. Згодом було проведено післяпольотний аналіз з примусовим початковим цілевказанням об'єктів. На цьому етапі було проведено уточнення базових коефіцієнтів та ітераційних чисел операторів. Також були проведені лабораторні та стендові дослідження, за результатами яких були вироблені рекомендації до конструкції блоків дослідної системи, окреслені в п. 4.1.

Другий етап випробувань було проведено з розміщенням на борту ЛА дослідного екземпляру комплексу. Випробування були проведені в простих і складних метеоумовах зі збереженням видимості в межах ефективної відстані роботи системи. В якості цілей було обрано наземні об'єкти з базою 7, 10, 25 м. та повітряні цілі з базою 15м. Загальна тривалість випробувань – 20 льотних годин.

Час супроводу цілей з повторним перезахопленням становив 30 сек.. 4 хв. В залежності від характеру цілей та швидкості їх входження до зони ураження.

В якості критерія оцінювання остаточного результату роботи системи наведення було обрано відстань марки цілевказання від реального центроїда контура цілі. Виборка результатів проводилась в кожному кадрі послідовності для умов інтенсивного маневрування та в кожному третьому кадрі для умов сталого польоту.

Дані випробувань опрацьовано та порівняно з результатами моделювання. Результати підтверджують теоретичні припущення. Розрахований коефіцієнт ефективності системи в заданому радіусі дії – 0.87, що значно вище за коефіцієнти прийнятих на озброєння систем ОЕН (~0.43) Основним факторами впливу є погодні умови та загальна освітленість, що характерно для пристроїв оптичної локації вцілому, однак при зміщенні частотного діапазону в область 1.4 мкм з конкатацією зображень видимого та ІЧ спектрів діапазон роботи системи суттєво розширюється.

Висновки до розділу 5.

1. В рамках роботи над розділом розроблено схеми електричні принципи дослідного з вибором елементної бази, яка відповідає вимогам до бортової апаратури ЛА, розроблено друковані вузли;
2. Розроблено конструкції основних блоків дослідної системи оптико-електронного позиціонування, розроблено повний комплект конструкторської та технологічної документації;
3. Розроблено програмне забезпечення для сервісних модулів комплексу з урахуванням можливих негативних чинників;
4. Виготовлено дослідну систему ОЕП, проведено попередні лабораторні та стендові випробування з коригуванням конструкції. Було проведено кліматичні та механічні випробування системи для оцінювання можливості її встановлення на ЛА.
5. Запропоновано метод адаптивної фільтрації високочастотних шумів зображення для об'єктів з вузьким полем зору на основі аналізу оптичного потоку.
5. Проведено льотні випробування системи, отримані відеопослідовності та числові результати опрацьовані та наведені у вигляді сімейства графіків;
6. Підтверджено ефективність роботи математичної моделі системи оптико-електронного позиціонування

ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, становить розв'язок науково-прикладного завдання підвищення стійкості алгоритмів обробки вхідної відеоінформації до швидкої зміни ракурсів об'єктів спостереження, власного маневрування літального апарата – носія шляхом розробки завадостійкого методу розрахунку оптичного потоку, який забезпечує стабільне детектування, супровід, вимірювання дальності до об'єктів спостереження.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Вперше запропоновано кількісний показник ефективності систем оптико-електронного позиціонування на основі аналізу оптичного потоку з урахуванням природних факторів впливу, маневрових характеристик носія системи, маневрових характеристик цілей та штучних перешкод. Завдяки цьому забезпечується моделювання роботи систем оптико-електронного позиціонування в умовах реального польоту з можливістю зміни моделей попередньої обробки та розрахунку оптичного потоку, оцінюється достовірність результатів супроводу ключових точок рухомих об'єктів та вимірювання дальності до них у стереопарах.

2. Удосконалено методи побудови оптичного потоку за рахунок зменшення піраміди масштабів. Запропонований метод відрізняється від відомих введенням в математичну модель обробки інерційних та висотно-швидкісних даних носія системи оптико-електронного позиціонування. Завдяки цьому забезпечується стійкість метода під час активного маневрування літального апарату без збільшення обсягу обчислень, що надає змогу обробляти відеопослідовності з частотою до 90 кадрів на секунду в режимі реального часу. При цьому показник ефективності системи відносно класичних методів розрахунку оптичного потоку збільшується на 25..28%.

3. Вперше розроблено метод багатоканального пасивного вимірювання дальності на основі оптичного потоку в стереоскопічному зображенні в

некаліброваних стереопарах. На відміну від існуючих методів, які базуються на знаходженні максимумів функцій відгуку в горизонтальних або вертикальних стереопарах та потребують обов'язкової компенсації абераційних викривлень та кутових відхилень оптичних вісей камер, запропонований метод дозволяє будувати відносну карту глибини та знаходити абсолютні відстані до об'єктів без проведення попередньої обробки, що збільшує швидкість обробки відеоінформації на 170% та розширює діапазон вимірювання відстані в 4.3 рази для паралельних горизонтальних стереопар.

4. Удосконалено метод попередньої обробки зображень завдяки введенню в процес фільтрації високочастотних шумів фільтра Гауса з розмірностями компонент, які змінюються для кожного сегмента зображення в залежності від швидкості носія системи оптико-електронного позиціонування та відстані до об'єктів, розташованих в сегменті. Такий підхід дає змогу ефективно видаляти високочастотні шуми зображення та зменшити втрати ключових точок оптичного потоку на 6% відносно фільтрації Гауса з незмінним ядром. Ефективність методу підтверджено експериментально.

5. Запропоновано алгоритми та пакет прикладного програмного забезпечення, які реалізують удосконалений метод розрахунку оптичного потоку та метод вимірювання дальності для роботи в складі систем оптико-електронного позиціонування.

6. Розроблено комплект конструкторської документації та виготовлено дослідний зразок системи оптико-електронного позиціонування, яка реалізує методи розрахунку оптичного потоку та вимірювання дальності, отримані в результаті дисертаційного дослідження. Проведено коригування програмного забезпечення з урахуванням особливостей схемотехнічної реалізації системи.

7. Проведено стендові та льотні випробування дослідного зразка системи оптико-електронного позиціонування, які підтверджують достовірність результатів, отриманих в ході дисертаційного дослідження.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ДЖЕРЕЛ

1. Тымкул В.М., Тымкул Л.В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета. Учебное пособие. – Новосибирск:СГГА, 2005. – 215с.
2. Крискунов Л.З., Усольцев И.Ф., Инфракрасные системы обнаружения, пеленгации и автоматического сопровождения движущихся объектов. – М.: СР,1968. – 320с.
3. Гонсапес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. - 412 с.
4. Введение в контурный анализ // под ред. Фурмана Я.А. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 592 с.
5. M. Calonder, V. Lepetit, C. Strecha, and P. Fua. BRISK: Binary Robust Independent Elementary Features. //In Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2010.
6. E. Mair, G. D. Hager, D. Burschka, M. Suppa, and G. Hirzinger. Adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test.// In Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2010.
7. D. Jeon, M. B. Henry, Y. Kim, I. Lee, Z. Zhang, D. Blaauw, and D. Sylvester. 2014. An Energy Efficient Full-Frame Feature Extraction Accelerator With Shift-Latch FIFO in 28 nm CMOS. //IEEE Journal of Solid-State Circuits 49, 5 (May 2014), 1271–1284.
8. S. Chan, Y. Wong, and J. Daniel, Dense stereo correspondence based on recursive adaptive size multi-windowing //In Proc. Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ'03), volume 1, 256–260, 2003
9. B.D. Lucas, T. Kanade, "An Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision", in Proceedings of Image Understanding Workshop, 1981, pp. 121-130.
10. P. Viola and M.J. Jones, «Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features», proceedings IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), 2001

11. P. Viola and M.J. Jones, «Robust real-time face detection», International Journal of Computer Vision, vol. 57, no. 2, 2004., pp.137–154
12. М. Шлезингер, В. Главач. Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию // Киев, Наукова думка, 2004. 536 с.
13. Fujisada, H., M. Urai, and A. Iwasaki, 2011, Advanced methodology for ASTER DEM generation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 49, no. 12, p. 5,080-5,091.
14. Справочник конструктора опτικο-механических приборов.: Машиностроение, - 1980. – 347с.
15. Геометрические преобразования в компьютерной графике. Конспект лекций. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2011. – 50 с.
16. Light-scattering flow cytometry for identification and characterization of blood microparticles / Konokhova A.I., Yurkin M.A., Moskalensky A.E. et al// J. Biomed. Opt. –2012.– V. 17.– P. 057006.
17. Визильтер Ю. В. Структурная фильтрация цифровых изображений с использованием проективных морфологий // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 3.С. 18–22.
18. Godbole S., Amin A. Mathematical morphology for edge overlap detection for medical images // Real-Time Imaging. 1995. № 1(3). P. 191–201.
19. В. Jähne, H. Scharr, and S. Körkel. Principles of filter design. In Handbook of Computer Vision and Applications. Academic Press, 1999.
20. J. Paumard, E. Aubourg. Adjusting astronomical images using a censored Hausdorff distance // In: Proc. Internat. Conf Image Process., on 26-29 October 3, 1997, 3, 232-235.
21. Ветров А.Н., Осипова А.А., Гахзар М.А., Артюхин И.Ю. Совмещение изображений датчиков различных частотных диапазонов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.;

22. А. С. Малистов, А.А. Солохин, А.В. Хамухин, «Оценка эффективности алгоритмов в системах видеонаблюдения», XVI Международная Интернетконференция молодых ученых, аспирантов и студентов по современным проблемам машиноведения, тезисы докладов, с. 177, издательство ИМАШ РАН, Москва, 2004..
23. Bouma H., Dijk J. and van Eekeren A.W.M. Precise local blur estimation based on the first-order derivative // SPIE Defense, Security, and Sensing, 839904-839904-8, 2012.
24. Deutsch B., Bajramovic F., Denzler J. A comparative evaluation of template and histogram based 2D tracking algorithms // In DAGM-Symposium, 2005. – P. 269–276.
25. Alhichiri H.S., Kamel. M. Multi-resolution image registration using multi-class Hausdorff fraction // Pattern Recognition Letters 23 (2002), pp. 279-286.
26. Alhichiri H.S., Kamel. M. Virtual circles: a new set of features for fast image registration // Pattern Recognition Letters 24 (2003), pp. 1181 -1190.
27. Yongsheng Gao, Maylor K.H. Leung. Line segment Hausdorff distance on face matching // Pattern Recognition 35 (2002), pp. 361-371.
28. Jingying Chen, Maylor K Leung, Yongsheng Gao. Noisy logo recognition using line segment Hausdorff distance // Pattern Recognition 36 (2003), pp. 943-955.
29. Ioannis Fudos, Leonidas Palios. An efficient shape-based approach to image retrieval // Pattern Recognition Letters 23 (2002), pp. 731-741.
30. Титов В.С., Труфанов М.И., Бугаенко Е.И. Способ калибровки радиальной дисторсии оптической подсистемы системы технического зрения // патент на изобретение RUS 2346326 01.03.2007
31. Arulampalam M. S., Maskell S., Gordon N. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking // IEEE Transactions on Signal Processing. — 2002. — Vol. 50. — Pp. 174–188.

32. Grabner H., Grabner M., Bischof H. Real-time tracking via on-line boosting. — 2006.
33. Isard M., Blake A. Icondensation: Unifying low-level and high-level tracking in a stochastic framework // Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision-Volume I - Volume I. — ECCV '98. — 1998. — Pp. 893–908.
34. Klein D. A., Schulz D., Frintrop S., Cremers A. B. Adaptive real-time video-tracking for arbitrary objects // IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). — Oct 2010. — Pp. 772–777.
35. Maggio E., Cavallaro A. Multi-part target representation for colour tracking // Proc. of IEEE Int. Conference on Image Processing (ICIP). — Genoa, Italy: 11–14 September 2005
36. Sang-Cheol Park, Sung-Hoon Lim, Bong-Kee Sin, Seong-Whan Lee. Tracking non-rigid objects using probabilistic Hausdorff distance matching // Pattern Recognition 38 (2005) pp. 2373-2384.
37. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. — 2001. — Pp. 511–518.
38. Yang C., Duraiswami R., Davis L. Fast multiple object tracking via a hierarchical particle filter // Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1 - Volume 01. — ICCV '05. — 2005. — Pp. 212– 219.
39. Xiaoming Peng, Mingyue Ding, Chengping Zhou, Qian Ma. A practical two-step image registration method for two-dimensional images // Information Fusion 5 (2004) pp. 283-298.
40. Ediz Polat, Mohammed Yeasin, Rajeev Sharma. A 2D/3D model-based object tracking framework // Pattern Recognition 36 (2003) pp. 2127-2141.
41. Peer Stelldinger, Ullrich Kothe. Towards a general sampling theory for shape preservation // Image and Vision Computing 23 (2005) pp. 237-248.

42. Sobel I., Feldman G. A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing. — Never published but presented at a talk at the Stanford Artificial Project.
43. Kalal Z., Matas J., Mikolajczyk K. Online learning of robust object detectors during unstable tracking // In International Conference on Computer Vision. — 2009.
44. Yingjie Wang, Chin-Seng Chua. Face recognition from 2D and 3D images using 3D Gabor filters // Image and Vision Computing 23 (2005) pp. 1018-1028.
45. Yingjie Wang, Chin-Seng Chua. Robust face recognition from 2D and 3D images using structural Hausdorff distance // Image and Vision Computing 24 (2006) pp. 176-185.
46. Chunjiang Zhao, Wenkang Shi, Yong Deng. A new Hausdorff distance for image matching // Pattern Recognition Letters 26 (2005) pp. 581-586.
47. Jindan Zhou, Mohamed Abdel-Mollaleb. A content-based system for human identification based on bitewing dental X-ray images // Pattern Recognition 38 (2005) pp. 2132-2142.
48. Н.И. Казанский, В.В. Мясников, Р.В. Хмелев. Алгоритмы поиска расстояний до объектных пикселей на бинарных изображениях // Компьютерная оптика III 20,2000. с. 128133
49. E. Thiel, A. Montanvert. Chamfer masks: Discrete distance functions, geometric properties and optimization // in Proc. 11th Int. Conf. Pattern Recognition, The Hague, The Netherlands, Apr. 1992, pp. 244-247.
50. D.E. Johnson and E. Cohen. A Framework for Efficient Minimum Distance Computations // In Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics & Automation, Leuven, Belgium, pp. 3678-3684, May 1998.
51. L. Shapiro, J.M. Brady. Feature-based correspondence: an eigenvector approach // Image and Vision Computing 10 (5) (1992), 283-288.

52. Arulampalam M. S., Maskell S., Gordon N. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking // IEEE Transactions on Signal Processing. — 2002. — Vol. 50. — Pp. 174–188.
53. Alireza Bab–Hadiashar, David Suter. Robust Optic Flow Computation. - International Journal of Computer Vision 29(1), с. 59–77. 1998
54. Вычисление оптического потока методом Лукаса-Канаде. Теория // habrahabr.ru. [2013-1014]. Дата обновления: 18.02.2013.
55. Шалабанов А.К., Роганов Д.А. Эконометрика [Электронный ресурс]: учебное пособие / Шалабанов А.К., Роганов Д.А.; Университет управления «ТИСБИ». - Казань: Издательство ТИСБИ, 2004. – 203с.
56. R. E. Kalman and R. W. Коепске, “Optimal Synthesis of Linear Sampling Control Systems Using Generalized Performance Indexes,” TRANS. ASME, vol. 80, 1958, pp. 1820–1826.
57. Черный М.А. Самолетовождение [Текст]/Черный М.А, Кораблин В.И. - Москва: Транспорт, 1973. - 368с.
58. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. — М. : Издво МЭИ, 2004. — 400 с.
59. Ray B.K., Ray K.S. A non-parametric sequential method for polygonal approximation of digital curves // Pattern Recognition Letters, 15: 161-167, 1994.
60. Gritzali E, Papakonstantinou G. A fast piecewise linear approximation algorithm // Signal Processing, 5: 221-227, 1983.
61. Aoyama H., Kawagoe M. A piecewise linear approximation method preserving visual feature points of original figures // Computer Vision, Graphics and Image Process.: Graphical Models and Image Process, 53: 435-446, 1991.
62. Douglas D.H., Peucker T.K. Algorithm for the reduction of the number of points required to represent a line or its caricature // The Canadian Cartographer, 10 (2): 112-122, 1973.
63. Ramer U. An iterative procedure for polygonal approximation of plane curves // Computer Graphics and Image Processing, 1: 244-256, 1972.

64. Hershberger J., Snoeyink J. Speeding up the Douglas-Peucker line simplification algorithm // Proc. 5th Int. Symp. on Spatial Data Handling, 134-143, 1992.
65. Hershberger J., Snoeyink J. An $O(n \log n)$ implementation of the Douglas-Peucker algorithm for line simplification // Proc. 10th Annu. ACM Symp. On Comput. Geom., 383-384, 1994.
66. Leu J.G., Chen L. Polygonal approximation of 2d shapes through boundary merging // Pattern Recognition Letters, 7(4): 231-238, 1988.
67. Latecki L.J., Lakamper R. Convexity rule for shape decomposition based on discrete contour evolution // Computer Vision and Image Understanding, 73: 441-454, 1999.
68. Ku K.M., Chiu K.M. Polygonal approximation of digital curve by graduate iterative merging // Electronics Letters, 31: 444-446, 1995.
69. Fahn C.-S., Wang J.-E, Lee J.-Y. An adaptive reduction procedure for the piecewise linear approximation of digitized curves // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11: 967-973, 1989.
70. Wu J.-S., Leou J.-J. New polygonal approximation schemes for object shape representation // Pattern Recognition, 26: 471-484, 1993.
71. Boxer L., Chang C.-S., Miller R., Rau-Chaplin A. Polygonal approximation by boundary reduction // Pattern Recognition Letters, 14: 111-119, 1993.
72. Visvalingam M., Whyatt J. Line generalization by repeated elimination of points // Cartographic Journal, 30(1): 46-51, 1993.
73. Pikaz A., Dinstein I. An algorithm for polygonal approximation based on iterative point elimination // Pattern Recognition Letters, 16 (6): 557-563, 1995.
74. Wu J.-S., Leou J.-J. New polygonal approximation schemes for object shape representation // Pattern Recognition, 26: 471-484, 1993.
75. Park R.-H., Jee Y.H. Multistep polygonal approximation // J. Electronic Imaging, 3(3): 232-244, 1994.

76. H. Asada and M. Brady. The curvature primal sketch. // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8:2-14, 1986.
77. H.L. Beus and S.S.H. Tiu. An improved corner detection algorithm based on chain-coded plane curves. // Pattern Recognition, 20:291-296, 1987.
78. H. Freeman and L.S. Davis. A corner finding algorithm for chain-coded curves. // IEEE Trans. Computers, 26:297-303, 1977.
79. Vallone U. Bidimensional shapes polygonalization by ACO // Proc. 3rd Int. Workshop on Ants Algorithms, Brussels, Belgium, pp. 296-297, September 2002.
80. Tin P.-Y. Ant colony search algorithms for optimal approximation of plane curve // Pattern Recognition, 36(8): 1783-1797, 2003.
81. Dorigo N. Optimization, Learning, and Natural Algorithms // PhD Thesis, Dip. Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Italia, 1992.
82. Dorigo M., G. Di Caro & L. M. Gambardella. Ant Algorithms for Discrete Optimization // Artificial Life, 1999 5(2): 137-172.
83. Tin P.-Y. Genetic algorithms for polygonal approximation of digital curves, // Int. J. Pattern Recognition and Artificial Intelligence 13:1061-1082, 1999
84. Huang S.-C., Sim Y.-N. Polygonal approximation using genetic algorithms // Pattern Recognition, 32: 1409-1420, 1999.
85. Recatala G., Ihesta J.M. Polygonal approximation through genetic algorithms // Proc. 11th Scandinavian Conf on Image Analysis, pp. 707-714, June 1999.
86. Ho S.-Y., Chen Y.-C. An efficient evolutionary algorithm for accurate polygonal approximation // Pattern Recognition, 34: 2305-2317, 2001.
87. Katsaggelos A.K., Kondi L.P., Meier F.W., Oslerman J., Schuster G.M. MPEG-4 and rate-distortion-based shape-coding techniques // Proc. of IEEE, 86(6): 1126-1154, 1998.
88. Lie, W.N.; Ho, C.C. All-focus Image Fusion and Depth Image Estimation Based on Iterative Splitting Technique for Multi-focus Images. In

Proceedings of the 2015 Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, PSIVT'15, Auckland, New Zealand, 25–27 November 2015.

89. Chen, Y.C.; Wu, Y.C.; Liu, C.H.; Sun, W.C.; Chen, Y.C. Depth Map Generation Based on Depth from Focus. In Proceedings of the 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, 11–14 April 2010; pp. 59–63.

90. Stone H. Approximation of curves by line segments // Math. Comput., 15: 40-47, 1961.

91. Yokota, A.; Yoshida, T.; Kashiya, H.; Hamamoto, T. High speed Sensing System for Depth Estimation Based on Depth from Focus by Using Smart Imager. In Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Kobe, Japan, 23–26 May 2005; Volume 1, pp. 564–567.

92. Кучерявый А. А. Глава 6. Индикация на лобовом стекле // Бортовые информационные системы: Курс лекций / Под ред. В. А. Мишина и Г. И. Ключева. — 2-е изд. перераб. и доп. — Ульяновск: УлГТУ, 2004. — 504 с.

93. Militarily Critical Technologies List–MCTL Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology and Logistics Pentagon, VA, 2014.

94. Голубцов, М.С. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному / М.С. Голубцов, А.В. Кириченко. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004.

95. Огородников И.Н. Микропроцессорная техника : учебник /И. Н. Огородников. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. 380 с.

96. Мартин Т. Микроконтроллеры фирмы STMicroelectronics на базе ядра CortexM3. Серия STM32 /Т. Мартин. М. : Техносфера, 2009. 168 с

97. Мартин Т. Микроконтроллеры фирмы STMicroelectronics на базе ядра CortexM3. Серия STM32 /Т. Мартин. М. : Техносфера, 2009. 168 с

98. Мартин Т. Микроконтроллеры фирмы STMicroelectronics на базе ядра CortexM3. Серия STM32 /Т. Мартин. М. : Техносфера, 2009. 168 с

99. C++ STM32 Development Environment. — URL: <http://andybrown.me.uk/2015/03/22/stm32dev-windows/> (дата обращения: 14.05.2019).
100. Raspberry Pi compute module 3+. Datasheet. Release 1, january, 2019 https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/computemodule/datasheets/rpi_DATA_CM3plus_1p0.pdf. - 20с.
101. ARM Cortex-M4 32bit MCU+FPU STM407F4xx datasheet. D022152 Rev.8 <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf>
102. BNO055. Intelligent 9-axis absolute orientation sensor. Datasheet. Rev.1.2. November, 2014. https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST_BNO055_DS000_12.pdf
103. MPX5010. Integrated Pressure sensor. Datasheet. Rev. 11, january,2007. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5010.pdf>
104. AA070ME01-T1 7.0 inch WVGA Datasheet. Rev. 1.0. March,2017, https://eu.mouser.com/datasheet/2/274/aa070me01--t1_e-1281601.pdf
105. MIL-L-85762A. Military specification. 26 aug. 1988. http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-L/MIL-L-85762A_6500/
106. О.В. Андреева, А.А.Парамонов, Н.В.Андреева. Прикладная голография. Методические материалы к экспериментальному практикуму. – С-П.:2008 – 152с.

ДОДАТОК 1. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Любчик В.Р. Методика проектування комплексів оптико-телевізійного наведення з використанням стереоскопічних оптосистем// Любчик В.Р., Ковалев В.О., Клепиковський А.В. // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький:2016. – № 6. – С. 248–252.

2. Бабій Ю.О. Комплекс оптико-телевізійного наведення з використанням машинного стереозору і адаптивних алгоритмів супроводу // Бабій Ю.О., Клепиковський А.В., Ковалев В.О. //Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – Київ:2017. – № 1. – С. 13-18.

3. Свідоцтво про реєстрацію авторського права №76675 Офіційний бюлетень №48, 2018. «Двodiaпазонний трекер рухомих цілей» Ковалев В.О., Клепиковський А.В.

4. Kovalev V. Increasing the stability of optical flow calculation in unmanned aerial vehicles” // Liubchyk V., Kovalev V., Klepikovskiy A. // Sciences of Europe – VOL.1, №54 (друковане іноземне періодичне видання з напряму, ISSN 3162-2364)

5. Бабій Ю.О. Розробка перспективного ударно-розвідувального безпілотного літального апарату // Бабій Ю.О., Клепиковський А.В., Ковалев В.О. //Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних сил. – Харків:2017. – № 2(51). – С. 69-71.

6. V Liubchyk. Mathematical modelling of distance measuring multifrequency phase method. // V Liubchyk, A Klepikovskiy, Yu Babiy, E Lenkov, V Kovalev// Informatics & Mathematical Methods in Simulation. Vol. 7 Issue 3 p156-169. 14p.(ISSN : 2223-5744)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Любчик В.Р. Модернізація комплексів оптико-телевізійного наведення з використанням біноккулярної системи комп’ютерного зору та алгоритму покадрового зміщення/ Любчик В.Р., Ковалев В.О., Клепиковський А.В. // V міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомукаційних системах», Чернівці, 3-5 листопада 2016 р.:матеріали конференції – Чернівці:2016 – С.86-87.

8. Ковалев В.О. Проектування комплексів оптико-телевізійного наведення з використанням систем комп’ютерного стереобачення / Ковалев

В.О., Любчик В.Р., Клепіковський А.В., Бабій Ю.О. // XIII міжнародна наукова конференція «Новітні технології – для захисту повітряного простору», Харків, 12-13 квітня 2017 р.: матеріали конференції – Харків:2017 – С.161.

9. Клепіковський А.В. Розробка комплексу оптико-телевізійного наведення з використанням адаптивних алгоритмів супроводу / Клепіковський А.В., Бабій Ю.О., Ковалев В.О. // VIII науково-практична конференція Національної академії Національної гвардії України, Харків, 30 березня 2017 р.: матеріали конференції – Харків:2017 – С.141-143.

10. Любчик В.Р. Особливості використання алгоритмів трекінгу рухомих об'єктів в системах оптико-телевізійного наведення/ Любчик В.Р., Клепіковський А.В., Ковалев В.О., Бабій Ю.О. / Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки», Вінниця, 17-19 травня 2017 р.: матеріали конференції – Вінниця: 2017 – С.201-203.

11. Ковалев В.О. Алгоритм пошуку ключових точок цілей у дводіапазонних системах оптико-телевізійного наведення / Ковалев В.О., Клепіковський А.В., Любчик В.Р. // VI міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомукаційних системах», Чернівці, 9-11 листопада 2017 р.: матеріали конференції – Чернівці:2017 – С.68-69.

12. Доценко О.В. Математичне моделювання низькорівневої попередньої обробки відеопослідовностей в комплексах оптико-електронного наведення / Доценко О.В., Ковалев В.О., Макодзєба П.П. // XV міжнародна наукова конференція «Новітні технології – для захисту повітряного простору», Харків, 10-11 квітня 2019 р.: матеріали конференції – Харків:2019 – С.171.

ДОДАТОК 2. ПРОГРАМНИЙ КОД ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КОМПЛЕКСУ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

```
import os
import sys
import cv2
import numpy as np

#Function for adding images with alpha-channel

def adding(back, fore, x, y):
    rows, cols, channels = fore.shape
    trans_indices = fore[...,3] != 0 # Where not transparent
    overlay_copy = back[y:y+rows, x:x+cols]
    overlay_copy[trans_indices] = fore[trans_indices]
    back[y:y+rows, x:x+cols] = overlay_copy
#function for drawing velocity scale
def
draw_velocity(maximum_exceed=600,maximum_maneuvring=400,maximum_flaps=
200,minimum_safe=100,minimum_safe_landing=80,screen_h=600,coefficient=10):
    #values of critical speeds

    mph_const=1.60934

    maximum_exceed_mph=int(maximum_exceed/mph_const)
    maximum_maneuvring_mph=int(maximum_maneuvring/mph_const)
    maximum_flaps_mph=int(maximum_flaps/mph_const)
    minimum_safe_mph=int(minimum_safe/mph_const)
    minimum_safe_landing_mph=int(minimum_safe_landing/mph_const)

    #width of scale
    w=100
    #x_offset for long line
    x_off_l=60
    #x_offset for short line
    x_off_s=80
    #x_offset for flaps
    x_flaps=90
    #kmh per short_line
    kmh_s=5
    #kmh per long_line
    kmh_l=10
```

```

#Text settings
font          = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
fontScale     = 0.8
lineType      = 2

#Colors
white=(255,255,255,255)
green=(0,255,0,255)
red=(0,0,255,255)
yellow=(0,255,222,255)
#ts=cv2.getTextSize(font,
h=coefficient*maximum_exceed+int(screen_h/2)
im=np.zeros((h+int(screen_h/2),w,4))
cv2.rectangle(im,(x_off_s,0),(w,h-(coefficient*maximum_exceed)),red,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*maximum_exceed)),(w,h-
(coefficient*maximum_maneuvring)),yellow,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*maximum_maneuvring)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe)),green,-1)
cv2.rectangle(im,(x_flaps,h-(coefficient*maximum_flaps)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe)),white,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*minimum_safe)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe_landing)),white,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-
(coefficient*minimum_safe_landing)),(w,h),red,-1)
for y in range(h,0,-coefficient*kmh_s):
    cv2.line(im,(x_off_s,y),(w,y),white,3)
for y in range(h,0,-coefficient*kmh_l):
    cv2.line(im,(x_off_l,y),(w,y),white,3)
    tx=str(int((h-y)/coefficient))
    ts=cv2.getTextSize(tx,font,fontScale,1)
    cv2.putText(im,tx,(x_off_l-ts[0][0],y+ts[1]),
font,fontScale,white,lineType)

cv2.imwrite('speed_scale_kmh.png',im)
h=coefficient*maximum_exceed_mph+int(screen_h/2)
im=np.zeros((h+int(screen_h/2),w,4))
cv2.rectangle(im,(x_off_s,0),(w,h-
(coefficient*maximum_exceed_mph)),red,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*maximum_exceed_mph)),(w,h-
(coefficient*maximum_maneuvring_mph)),yellow,-1)

```

```

        cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-
(coefficient*maximum_maneuvring_mph)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe_mph)),green,-1)
        cv2.rectangle(im,(x_flaps,h-(coefficient*maximum_flaps_mph)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe_mph)),white,-1)
        cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*minimum_safe_mph)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe_landing_mph)),white,-1)
        cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-
(coefficient*minimum_safe_landing_mph)),(w,h),red,-1)
        for y in range(h,0,-coefficient*kmh_s):
            cv2.line(im,(x_off_s,y),(w,y),white,3)
        for y in range(h,0,-coefficient*kmh_l):
            cv2.line(im,(x_off_l,y),(w,y),white,3)
            tx=str(int((h-y)/coefficient))
            ts=cv2.getTextSize(tx,font,fontScale,1)
            cv2.putText(im,tx,(x_off_l-ts[0][0],y+ts[1]),
font,fontScale,white,lineType)
        cv2.imwrite('speed_scale_mph.png',im)
#Function for drawing altitude scale
def
drawalt(max_alt=10000,max_o2_alt=4000,minimum_safe_alt=30,screen_h=600,coef
ficient=1):
    ft_const=3.28084

    max_alt_ft=int(max_alt*ft_const)
    max_o2_alt_ft=int(max_o2_alt*ft_const)
    minimum_safe_alt_ft=int(minimum_safe_alt*ft_const)
#width of scale
    w=100
#x_offset for long line
    x_off_l=60
#x_offset for short line
    x_off_s=80

#meters/feets per short_line
    m_s=50
#meters/feets per long_line
    m_l=100
#Text settings
    font          = cv2.FONT_HERSHEY_PLAIN
    fontScale     = 1.1
    lineType      = 2
#Colors

```

```

white=(255,255,255,255)
green=(0,255,0,255)
red=(0,0,255,255)
yellow=(0,255,222,255)
black_alpha=(0,0,0,64)
#ts=cv2.getTextSize(font,
h=coefficient*max_alt+int(screen_h/2)
im=np.zeros((h+int(screen_h/2),w,4))
cv2.rectangle(im,(0,0),(w,h+int(screen_h/2)),black_alpha,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,0),(w,h-(coefficient*max_alt)),red,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*max_alt)),(w,h-
(coefficient*max_o2_alt)),yellow,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*max_o2_alt)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe_alt)),green,-1)
#cv2.rectangle(im,(x_flaps,h-(coefficient*maximum_flaps)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe)),white,-1)
#cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*minimum_safe)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe_landing)),white,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*minimum_safe_alt)),(w,h),red,-1)
for y in range(h,0,-coefficient*m_s):
cv2.line(im,(x_off_s,y),(w,y),white,1)
for y in range(h,0,-coefficient*m_l):
cv2.line(im,(x_off_l,y),(w,y),white,1)
tx=str(int((h-y)/coefficient))
ts=cv2.getTextSize(tx,font,fontScale,1)
cv2.putText(im,tx,(x_off_l-ts[0][0],y+ts[1]),
font,fontScale,white,lineType)

cv2.imwrite('alt_scale_m.png',im)
h=coefficient*max_alt_ft+int(screen_h/2)
im=np.zeros((h+int(screen_h/2),w,4))
cv2.rectangle(im,(0,0),(w,h+int(screen_h/2)),black_alpha,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,0),(w,h-(coefficient*max_alt_ft)),red,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*max_alt_ft)),(w,h-
(coefficient*max_o2_alt_ft)),yellow,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*max_o2_alt_ft)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe_alt_ft)),green,-1)
#cv2.rectangle(im,(x_flaps,h-(coefficient*maximum_flaps)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe)),white,-1)
#cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*minimum_safe)),(w,h-
(coefficient*minimum_safe_landing)),white,-1)
cv2.rectangle(im,(x_off_s,h-(coefficient*minimum_safe_alt_ft)),(w,h),red,-
1)

```



```

for y in range(h,0,-coefficient*m_s):
    cv2.line(im,(x_off_s,y),(w,y),white,1)
for y in range(h,0,-coefficient*m_l):
    cv2.line(im,(x_off_l,y),(w,y),white,1)
    tx=str(int((h-y)/coefficient))
    ts=cv2.getTextSize(tx,font,fontScale,1)
    cv2.putText(im,tx,(x_off_l-ts[0][0],y+ts[1]),
font,fontScale,white,lineType)

cv2.imwrite('alt_scale_ft.png',im)
#Function for velocity bug and scale drawing
def
velocity_drawer(im,scale_kmh,scale_mph,velocity=0,units=0,sc_h=600,coef=10):

    x_off=0

    white=(255,255,255,255)
    green=(0,255,0,255)
    black=(0,0,0,255)

    font            = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
    fontScale       = 2
    thickness        = 6
    lineType         = 2

    smallfontScale  = 0.8
    smallthickness   = 2
    tx=str(velocity)
    ts=cv2.getTextSize(tx,font,fontScale,thickness)
    tss=cv2.getTextSize(tx,font,smallfontScale,smallthickness)
    ts_max=cv2.getTextSize("000",font,fontScale,thickness)
    velo_offset=int(sc_h/2)
    points=np.array([
        [x_off+scale_kmh.shape[1]-10,velo_offset],
        [x_off+scale_kmh.shape[1],velo_offset-10],
        [x_off+scale_kmh.shape[1],velo_offset-ts_max[1]-8],
        [x_off+scale_kmh.shape[1]+ts_max[0][0],velo_offset-ts_max[1]-
8],
[x_off+scale_kmh.shape[1]+ts_max[0][0],velo_offset+ts_max[1]+8],
        [x_off+scale_kmh.shape[1],velo_offset+ts_max[1]+8],
        [x_off+scale_kmh.shape[1],velo_offset+10]],np.int32)
    points2=np.array([

```

```

        [x_off+scale_mph.shape[1]-10,velo_offset],
        [x_off+scale_mph.shape[1],velo_offset-10],
        [x_off+scale_mph.shape[1],velo_offset-ts_max[1]-8],
        [x_off+scale_mph.shape[1]+ts_max[0][0],velo_offset-ts_max[1]-
8],

[x_off+scale_mph.shape[1]+ts_max[0][0],velo_offset+ts_max[1]+8],
        [x_off+scale_mph.shape[1],velo_offset+ts_max[1]+8],
        [x_off+scale_mph.shape[1],velo_offset+10]],np.int32)

    if(units==0):
        velo_pix=scale_kmh.shape[0]-(velocity*coef+velo_offset)
        adding(im,scale_kmh[velo_pix-
int(sc_h/2):velo_pix+int(sc_h/2),0:scale_kmh.shape[1]], x_off, 0)
        cv2.fillConvexPoly(im, points,black)
        cv2.polylines(im,[points],True, white,2)
        cv2.putText(im,tx,(x_off+scale_kmh.shape[1]+(ts_max[0][0]-
ts[0][0]),velo_offset+ts[1]), font,fontScale,green,thickness,lineType)

cv2.putText(im,"km/h",(x_off+scale_kmh.shape[1],velo_offset+ts[1]+12+tss[0][1]),
font,smallfontScale,white,smallthickness,lineType)
    if(units==1):
        velo_pix=scale_mph.shape[0]-(velocity*coef+velo_offset)
        adding(im,scale_mph[velo_pix-
int(sc_h/2):velo_pix+int(sc_h/2),0:scale_mph.shape[1]], x_off, 0)
        cv2.fillConvexPoly(im, points,black)
        cv2.polylines(im,[points],True, white,2)
        cv2.putText(im,tx,(x_off+scale_mph.shape[1]+(ts_max[0][0]-
ts[0][0]),velo_offset+ts[1]), font,fontScale,green,thickness,lineType)

cv2.putText(im,"mph",(x_off+scale_mph.shape[1],velo_offset+ts[1]+12+tss[0][1]),
font,smallfontScale,white,smallthickness,lineType)
    def
altitude_drawer(im,scale_m,scale_ft,altitude=0,units=0,sc_h=600,coef=1,scale_offset
=0):
        white=(255,255,255,255)
        green=(0,255,0,255)
        black=(0,0,0,255)

        font            = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
        fontScale        = 2
        thickness        = 6
        lineType         = 2

```

```

smallfontScale      = 1.2
smallthickness      = 4

altitude_offset=int(sc_h/2)

if(units==0):
    right_x=im.shape[1]-scale_offset-scale_m.shape[1]
    alt_pix=scale_m.shape[0]-(altitude*coef+altitude_offset)
    if(alt_pix<0):
        alt_pix=0
    adding(im,scale_m[alt_pix-
int(sc_h/2):alt_pix+int(sc_h/2),0:scale_m.shape[1]], right_x, 0)
    else:
        right_x=im.shape[1]-scale_offset-scale_ft.shape[1]
        alt_pix=scale_ft.shape[0]-(altitude*coef+altitude_offset)
        if(alt_pix<0):
            alt_pix=0
        adding(im,scale_ft[alt_pix-
int(sc_h/2):alt_pix+int(sc_h/2),0:scale_ft.shape[1]], right_x, 0)
        ts_max=cv2.getTextSize("00",font,smallfontScale,smallthickness)
        ts_max_max=cv2.getTextSize("000",font,fontScale,thickness)
        coef=(ts_max[0][1]+ts_max[1])/10
        imh=(ts_max[0][1]+ts_max[1])*3
        imw=ts_max[0][0]+ts_max_max[0][0]+20
        img=np.zeros((imh,imw,4),dtype=np.uint8)

y_center=int(img.shape[0]/2)
x_counter_offset=img.shape[1]-10-ts_max[0][0]
x_main_offset=x_counter_offset-ts_max_max[0][0]
string_alt=str(altitude).zfill(4)
thous=int(string_alt[:-2])
dec=int(string_alt[-2:-1])*10
offset=int(float(string_alt[-1])*coef)
if(altitude>=0):
    ts_max_max_real=cv2.getTextSize(str(thous),font,fontScale,thickness)
if(altitude<0)and(thous==0):
    ts_max_max_real=cv2.getTextSize("-0",font,fontScale,thickness)
if(altitude<0)and(thous!=0):
    ts_max_max_real=cv2.getTextSize(str(thous),font,fontScale,thickness)
x_main_offset_real=x_counter_offset-ts_max_max_real[0][0]
imc=img.copy()
points=np.array([[x_main_offset_real-10, y_center-ts_max_max[1]-10],

```

```

[x_counter_offset-3, y_center-ts_max_max[1]-10],
[x_counter_offset-3, 1 ],
[img.shape[1]-10, 1 ],
[img.shape[1]-10, y_center-10 ],
[img.shape[1]-2, y_center ],
[img.shape[1]-10, y_center+10 ],
[img.shape[1]-10, img.shape[0]-1 ],
[x_counter_offset-3, img.shape[0]-1 ],
[x_counter_offset-3, y_center+ts_max_max[1]+10],
[x_main_offset_real-10,
y_center+ts_max_max[1]+10]],dtype=np.int32)

```

```

cv2.fillConvexPoly(imc, points,black)

```

```

for k in (dec+20,dec+10,dec,dec-10,dec-20):

```

```

    sd=k
    al=dec-k
    if(thous==0):
        if(k<0)and(altitude-20>0):
            k=100+k
        if(k>=100)and(altitude-20>0):
            k=100-k
    else:
        if(k<0):
            k=100+k
        if(k>=100):
            k=100-k
    if(altitude>=0):
        sig=1
    if(altitude<0):
        sig=-1
    if(k==100):
        k=0
    if(k==110):
        k=10

```

```

cv2.putText(imc,str(abs(k)).zfill(2),(x_counter_offset,y_center+ts_max[1]+sig*offset
+sig*int((al)/10)*(ts_max[0][1]+ts_max[1])),
font,smallfontScale,green,smallthickness,lineType)
    if(sig==1):
        ts_th=cv2.getTextSize(str(thous),font,fontScale,thickness)

```

```

        cv2.putText(imc,str(thous),(x_counter_offset-
ts_th[0][0],y_center+ts_th[1]), font,fontScale,green,thickness,lineType)
        if(sig==-1)and(thous==0):
            ts_th=cv2.getTextSize("-0",font,fontScale,thickness)
            cv2.putText(imc,"-0",(x_counter_offset-ts_th[0][0],y_center+ts_th[1]),
font,fontScale,green,thickness,lineType)
        if(sig==-1)and(thous!=0):
            ts_th=cv2.getTextSize(str(thous),font,fontScale,thickness)
            cv2.putText(imc,str(thous),(x_counter_offset-
ts_th[0][0],y_center+ts_th[1]), font,fontScale,green,thickness,lineType)
            cv2.polylines(imc,[points],True, white,2)
            adding(im,imc, im.shape[1]-10-scale_offset-imc.shape[1], altitude_offset-
y_center)

```

ДОДАТОК 3. ПОРІВНЯЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ





ДОДАТОК 4. СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНІ ПРИНЦИПОВІ ДОСЛІДНОГО ВРЗКА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

АРАН198.87-00533

АРАН198.87-00533

Індикатор на лобовому склі		Лист. 0	Масшт.
Схема електрична		Лист 1	Листов
принципова		НПК*КУРС* Олеса	

Ім'я	Лист	№ докум.	Титл.	Дата	Масшт.
Розроб.	Ковалев	Сторожа			
Пров.	Сторожа				
Н. контр.	Лисенко				
Утв.					

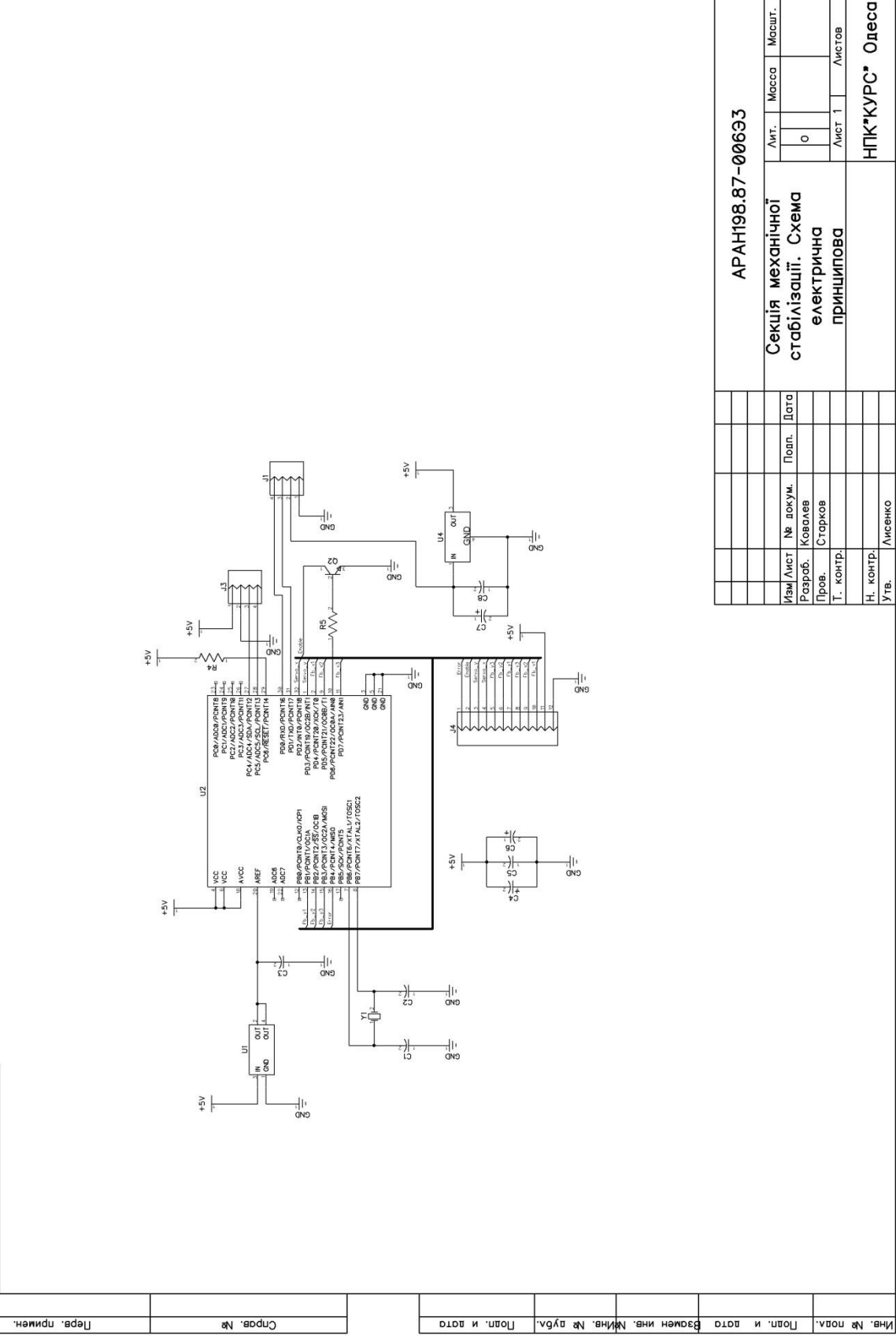
АРАН198.87-00133

Допоміжний контролер.
Схема електрична
принципова

Sheet 1 Листов

НПК*КУРС* Олеса

АРАН198.87-00693



Лист № 0

Листов 1

Масса

Масшт.

Изм/Лист № докум. Попп. Дата

Разраб. Ковалев

Пров. Старков

Т. контр.

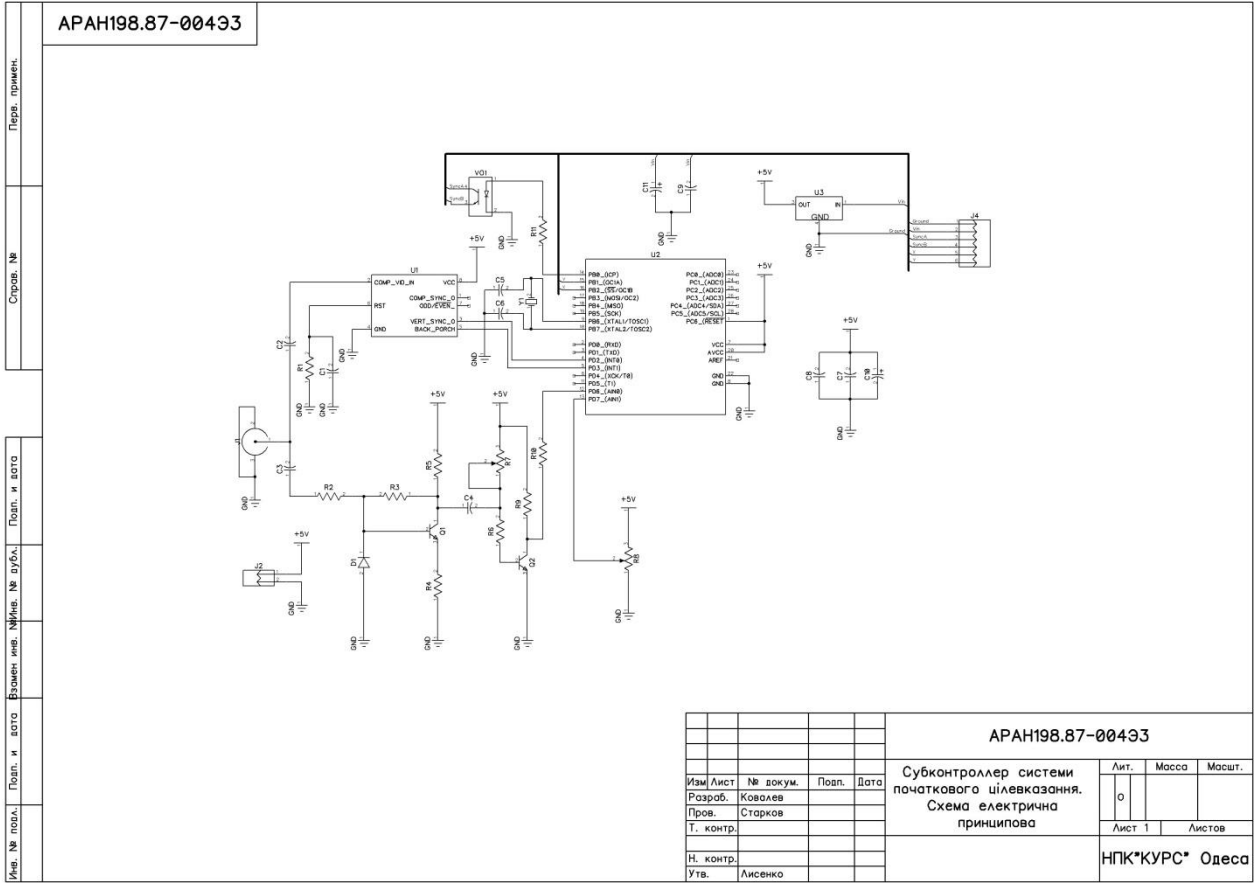
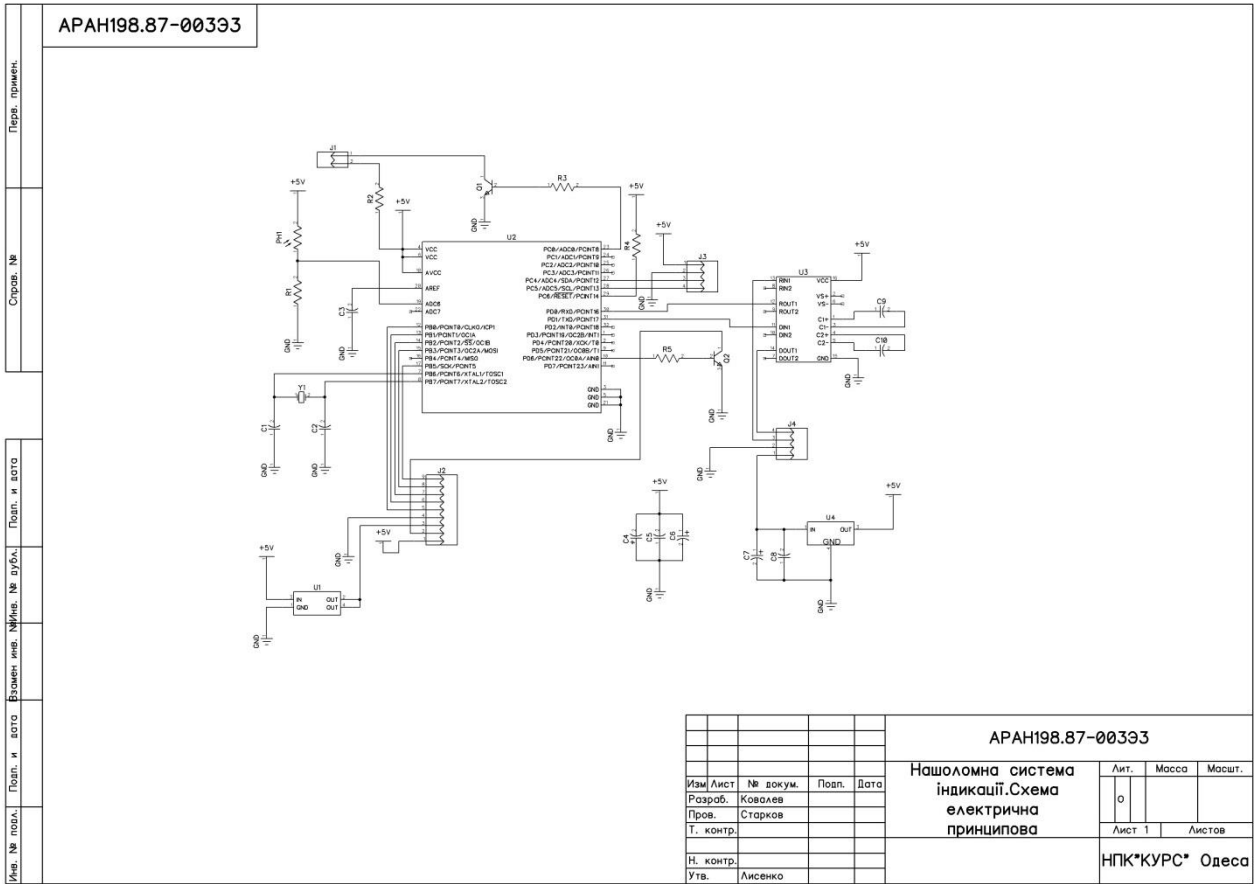
Н. контр. Лисенко

Утв.

АРАН198.87-00693

Секція механічної стабілізації. Схема електрична принципова

НПК*КУРС* Олеса



**ДОДАТОК 5. ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ДОПОМІЖНОГО ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО МОДУЛЯ ДОСЛІДНОЇ
СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ.**

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BNO055.h>
#include <utility/imuMaths.h>
#include <Arduino.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <UbxGpsNavPvt.h>
#include <SFE_BMP180.h>

#define BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS (100)
#define GPS_BAUDRATE 9600L
#define GPS_RX 12
#define GPS_TX 13
#define DATETIME_FORMAT "%04d:%02d:%02d:%02d:%02d:%02d"
#define DATETIME_LENGTH 20
#define GPS_DEFAULT_BAUDRATE 9600L
#define GPS_WANTED_BAUDRATE 9600L

Adafruit_BNO055 bno = Adafruit_BNO055(-1, 0x29);
SoftwareSerial ss(GPS_TX, GPS_RX);
UbxGpsNavPvt<SoftwareSerial> gps(ss);
SFE_BMP180 pressure;

const long possibleBaudrates[] = {
```

```

//921600L,
//460800L,
//230400L,
115200L,
//57600L,
//38400L,
//19200L,
9600L,
//4800L,
};

float Pr_q = 1; //process noise covariance
float Pr_r = 1000; //measurement noise covariance
float Pr_x = 99400; //value
float Pr_p; //estimation error covariance
float Pr_k; //kalman gain

float VSI_q = 1; //process noise covariance
float VSI_r = 100; //measurement noise covariance
float VSI_x = 0; //value
float VSI_p; //estimation error covariance
float VSI_k; //kalman gain
int VSI = 0;

float TR_q = 1; //process noise covariance
float TR_r = 100; //measurement noise covariance
float TR_x = 0; //value
float TR_p; //estimation error covariance
float TR_k; //kalman gain

```

```
float TurnRate = 0;
```

```
float MAG=0;
```

```
float prev_MAG=0;
```

```
float gRoll=0;
```

```
float gPitch=0;
```

```
int AccX=0;
```

```
int AccY=0;
```

```
int AccZ=0;
```

```
unsigned long VSI_Timer1 = 0;
```

```
unsigned long VSI_Timer2 = 0;
```

```
unsigned long TR_Timer1 = 0;
```

```
unsigned long TR_Timer2 = 0;
```

```
double baseline=0;
```

```
double alt=0;
```

```
double prev_alt=0;
```

```
double P=0;
```

```
double longitude=0;
```

```
double latitude=0;
```

```
float gps_altitude=0;
```

```
float groundspeed=0;
```

```
float hdg=0;
```

```
int fix=0;
```

```
int nos=0;
```

```

/*****
*****/

/*GLOBAL VARIABLES*/

/*****
*****/

uint8_t gyro_flag=0;
uint8_t pres_flag=0;

char datetime[DATETIME_LENGTH];

void setup(void)
{
  while(!bno.begin())
  {}
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Starting auto-configuration...");
  ss.begin(GPS_BAUDRATE);

  // Restore the receiver default configuration.
  for (byte i = 0; i < sizeof(possibleBaudrates) / sizeof(*possibleBaudrates);
i++)
  {
    Serial.print("Trying to restore defaults at ");
    Serial.print(possibleBaudrates[i]);
    Serial.println(" baudrate...");

    if (i != 0)

```

```

    {
        delay(100); // Little delay before flushing.
        ss.flush();
    }

    ss.begin(possibleBaudrates[i]);
    restoreDefaults();
}

// Switch the receiver serial to the default baudrate.
if (possibleBaudrates[sizeof(possibleBaudrates) / sizeof(*possibleBaudrates)
- 1] != GPS_DEFAULT_BAUDRATE)
{
    Serial.print("Switching to the default baudrate which is ");
    Serial.print(GPS_DEFAULT_BAUDRATE);
    Serial.println("...");

    delay(100); // Little delay before flushing.
    ss.flush();
    ss.begin(GPS_DEFAULT_BAUDRATE);
}

// Disable NMEA messages by sending appropriate packets.
Serial.println("Disabling NMEA messages...");
disableNmea();

// Switch the receiver serial to the wanted baudrate.
if (GPS_WANTED_BAUDRATE != GPS_DEFAULT_BAUDRATE)
{

```

```
Serial.print("Switching receiver to the wanted baudrate which is ");
Serial.print(GPS_WANTED_BAUDRATE);
Serial.println("...");

changeBaudrate();

delay(100); // Little delay before flushing.
ss.flush();
ss.begin(GPS_WANTED_BAUDRATE);
}

// Increase frequency to 100 ms.
Serial.println("Changing receiving frequency to 100 ms...");
changeFrequency();

// Disable unnecessary channels like SBAS or QZSS.
Serial.println("Disabling unnecessary channels...");
disableUnnecessaryChannels();

// Enable NAV-PVT messages.
Serial.println("Enabling NAV-PVT messages...");
enableNavPvt();

Serial.println("Auto-configuration is complete!");

delay(100); // Little delay before flushing.
ss.flush();
```



```
// Starting gyro and accel

//Starting pressure sensor

if (pressure.begin())

    {
    pres_flag=1;
    }
else
    {
    pres_flag=0;
    }

if(pres_flag)
    {
    baseline = getPressure();
    }

bno.setExtCrystalUse(true);

}
```

```

/*****
*****/

/*
  Arduino loop function, called once 'setup' is complete (your own code
  should go here)
*/

/*****
*****/

void loop(void)
{
  P = getPressure();
  PressureFilter();
  alt = pressure.altitude(P,baseline);
  VSI_Timer2=millis();
  if(VSI_Timer2>(VSI_Timer1+100))
  {
    double delta=alt-prev_alt;
    prev_alt=alt;
    VSI=1000*delta/(VSI_Timer2-VSI_Timer1);
    VSI_Timer1=VSI_Timer2;
    vsiFilter();
  }

  // Possible vector values can be:
  // - VECTOR_ACCELEROMETER - m/s^2
  // - VECTOR_MAGNETOMETER - uT
  // - VECTOR_GYROSCOPE - rad/s
  // - VECTOR_EULER - degrees
  // - VECTOR_LINEARACCEL - m/s^2

```

```

// - VECTOR_GRAVITY    - m/s^2

sensors_event_t event;
bno.getEvent(&event);
MAG = event.orientation.x;
gRoll = (-1)*event.orientation.y;
gPitch = (-1)*event.orientation.z;
imu::Vector<3>          acc          =
bno.getVector(Adafruit_BNO055::VECTOR_ACCELEROMETER);
  AccX = acc.x()*100; //slip ball
  AccY = acc.y()*100; //forward acceleration
  AccZ = acc.z()*100; //wing loading

TR_Timer2=millis();
if(TR_Timer2>(TR_Timer1+300))
{
  double delta_m=MAG-prev_MAG;
  prev_MAG=MAG;
  TurnRate=1000*delta_m/(TR_Timer2-TR_Timer1);
  if(TurnRate>180)
  {
    TurnRate=TurnRate-360.0;
  }
  TR_Timer1=TR_Timer2;
  TRFilter();
}

if (gps.ready())
{

```

```

        snprintf(datetime,    DATETIME_LENGTH,    DATETIME_FORMAT,
gps.year, gps.month, gps.day, gps.hour, gps.min, gps.sec);
    longitude=gps.lon / 10000000.0;
    latitude=gps.lat / 10000000.0;
    gps_altitude=gps.height / 1000.0;
    groundspeed=gps.gSpeed * 0.0036;
    hdg=gps.heading / 100000.0;
    fix=gps.fixType;
    nos=gps.numSV;
}
Serial.print("W,");
Serial.print(alt);
Serial.print(',');
Serial.print(VSI);
Serial.print(',');
Serial.print(datetime);
Serial.print(',');
Serial.print(MAG);
Serial.print(',');
Serial.print(gPitch);
Serial.print(',');
Serial.print(gRoll);
Serial.print(',');
Serial.print(TurnRate);
Serial.print(',');
Serial.print(AccX);
Serial.print(',');
Serial.print(AccY);
Serial.print(',');

```

```
Serial.print(AccZ);  
Serial.print(',');  
Serial.print(longitude,7);  
Serial.print(',');  
Serial.print(latitude,7);  
Serial.print(',');  
Serial.print(gps_altitude);  
Serial.print(',');  
Serial.print(groundspeed);  
Serial.print(',');  
Serial.print(hdg);  
Serial.print(',');  
Serial.print(fix);  
Serial.print(',');  
Serial.print(nos);  
Serial.println(",S");  
}
```

```
double getPressure()  
{  
  char status;  
  double T,P,p0,a;  
  
  status = pressure.startTemperature();
```

```

if (status != 0)
{

    delay(status);

    status = pressure.getTemperature(T);
    if (status != 0)
    {

        status = pressure.startPressure(3);
        if (status != 0)
        {
            // Wait for the measurement to complete:
            delay(status);

            status = pressure.getPressure(P,T);
            if (status != 0)
            {
                return(P);
            }
            else Serial.println("error retrieving pressure measurement\n");
        }
        else Serial.println("error starting pressure measurement\n");
    }
    else Serial.println("error retrieving temperature measurement\n");
}
else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
}

```

```

void PressureFilter() {
// Simple Kalman filter

Pr_p = Pr_p + Pr_q;

Pr_k = Pr_p / (Pr_p + Pr_r);
Pr_x = Pr_x + Pr_k * (P - Pr_x);
Pr_p = (1 - Pr_k) * Pr_p;
P = Pr_x;

}

```

```

void vsiFilter() {
// Simple Kalman filter

VSI_p = VSI_p + VSI_q;

VSI_k = VSI_p / (VSI_p + VSI_r);
VSI_x = VSI_x + VSI_k * (VSI - VSI_x);
VSI_p = (1 - VSI_k) * VSI_p;
VSI = VSI_x;

}

```

```

void TRFilter() {
// Simple Kalman filter

```

```

TR_p = TR_p + TR_q;

TR_k = TR_p / (TR_p + TR_r);
TR_x = TR_x + TR_k * (TurnRate - TR_x);
TR_p = (1 - TR_k) * TR_p;
TurnRate = TR_x;

}

```

```

void restoreDefaults()
{
    // CFG-CFG packet.
    byte packet[] = {
        0xB5, // sync char 1
        0x62, // sync char 2
        0x06, // class
        0x09, // id
        0x0D, // length
        0x00, // length
        0xFF, // payload
        0xFF, // payload
        0x00, // payload
        0x00, // payload
        0x00, // payload
        0x00, // payload
        0x00, // payload
    }
}

```



```
    0x00, // payload
    0xFF, // payload
    0xFF, // payload
    0x00, // payload
    0x00, // payload
    0x17, // payload
    0x2F, // CK_A
    0xAE, // CK_B
};
```

```
    sendPacket(packet, sizeof(packet));
```

```
    }

// Send a set of packets to the receiver to disable NMEA messages.
```

```
void disableNmea()
```

```
{
    // Array of two bytes for CFG-MSG packets payload.
    byte messages[][2] = {
        {0xF0, 0x0A},
        {0xF0, 0x09},
        {0xF0, 0x00},
        {0xF0, 0x01},
        {0xF0, 0x0D},
        {0xF0, 0x06},
        {0xF0, 0x02},
        {0xF0, 0x07},
        {0xF0, 0x03},
        {0xF0, 0x04},
        {0xF0, 0x0E},
    };
}
```

```

    {0xF0, 0x0F},
    {0xF0, 0x05},
    {0xF0, 0x08},
    {0xF1, 0x00},
    {0xF1, 0x01},
    {0xF1, 0x03},
    {0xF1, 0x04},
    {0xF1, 0x05},
    {0xF1, 0x06},
};

// CFG-MSG packet buffer.
byte packet[] = {
    0xB5, // sync char 1
    0x62, // sync char 2
    0x06, // class
    0x01, // id
    0x03, // length
    0x00, // length
    0x00, // payload (first byte from messages array element)
    0x00, // payload (second byte from messages array element)
    0x00, // payload (not changed in the case)
    0x00, // CK_A
    0x00, // CK_B
};

byte packetSize = sizeof(packet);

// Offset to the place where payload starts.
byte payloadOffset = 6;

```

```

// Iterate over the messages array.
for (byte i = 0; i < sizeof(messages) / sizeof(*messages); i++)
{
    // Copy two bytes of payload to the packet buffer.
    for (byte j = 0; j < sizeof(*messages); j++)
    {
        packet[payloadOffset + j] = messages[i][j];
    }

    // Set checksum bytes to the null.
    packet[packetSize - 2] = 0x00;
    packet[packetSize - 1] = 0x00;

    // Calculate checksum over the packet buffer excluding sync (first two)
and checksum chars (last two).
    for (byte j = 0; j < packetSize - 4; j++)
    {
        packet[packetSize - 2] += packet[2 + j];
        packet[packetSize - 1] += packet[packetSize - 2];
    }

    sendPacket(packet, packetSize);
}
}

// Send a packet to the receiver to change baudrate to 115200.
void changeBaudrate()
{

```

```

        0x7E, // CK_B
    };

    sendPacket(packet, sizeof(packet));
}

// Send a packet to the receiver to change frequency to 100 ms.
void changeFrequency()
{
    // CFG-RATE packet.
    byte packet[] = {
        0xB5, // sync char 1
        0x62, // sync char 2
        0x06, // class
        0x08, // id
        0x06, // length
        0x00, // length
        0xFA, // payload
        0x00, // payload
        0x01, // payload
        0x00, // payload
        0x01, // payload
        0x00, // payload
        0x10, // CK_A
        0x96, // CK_B
    };

    sendPacket(packet, sizeof(packet));
}

```

```
// Send a packet to the receiver to disable unnecessary channels.
```

```
void disableUnnecessaryChannels()
```

```
{
```

```
    // CFG-GNSS packet.
```

```
    byte packet[] = {
```

```
        0xB5, // sync char 1
```

```
        0x62, // sync char 2
```

```
        0x06, // class
```

```
        0x3E, // id
```

```
        0x24, // length
```

```
        0x00, // length
```

```
        0x00, 0x00, 0x16, 0x04, 0x00, 0x04, 0xFF, 0x00, // payload
```

```
        0x01, 0x00, 0x00, 0x01, 0x01, 0x01, 0x03, 0x00, // payload
```

```
        0x00, 0x00, 0x00, 0x01, 0x05, 0x00, 0x03, 0x00, // payload
```

```
        0x00, 0x00, 0x00, 0x01, 0x06, 0x08, 0xFF, 0x00, // payload
```

```
        0x00, 0x00, 0x00, 0x01,           // payload
```

```
        0xA4, // CK_A
```

```
        0x25, // CK_B
```

```
    };
```

```
    sendPacket(packet, sizeof(packet));
```

```
}
```

```
// Send a packet to the receiver to enable NAV-PVT messages.
```

```
void enableNavPvt()
```

```
{
```

```

// CFG-MSG packet.
byte packet[] = {
    0xB5, // sync char 1
    0x62, // sync char 2
    0x06, // class
    0x01, // id
    0x03, // length
    0x00, // length
    0x01, // payload
    0x07, // payload
    0x01, // payload
    0x13, // CK_A
    0x51, // CK_B
};

sendPacket(packet, sizeof(packet));
}

// Send the packet specified to the receiver.
void sendPacket(byte *packet, byte len)
{
    for (byte i = 0; i < len; i++)
    {
        ss.write(packet[i]);
    }

    printPacket(packet, len);
}

```

ДОДАТОК 6: АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Директор
товариства з обмеженою відповідальністю
«АНГ-«ПАТРІОТ УКРАЇНА»
О.М.Головач
«02» вересня 2020р.



АКТ

про впровадження кандидатської дисертаційної роботи Ковалева
Володимира Олександровича «Підвищення ефективності методів оптико-
електронного позиціонування шляхом комбінованого аналізу елементів
кадру»

Складено цей акт в тому, що впроваджені математичні моделі систем оптико-електронного позиціонування, засновані на обчисленні оптичного потоку, надають змогу детектувати та супроводжувати повітряні та наземні об'єкти в радіусі 5000 м. Урахування інформації про наявність таких об'єктів та їх кутове переміщення надає змогу попередити повітряні інциденти а також забезпечує підвищення ефективності супроводу рухомих об'єктів при проведенні аеровідеозйомки. Розроблений метод розрахунку оптичного потоку також використовується для підтвердження навігаційної інформації під час візуального заходу на посадку.

Директор ТОВ «АНГ-«ПАТРІОТ УКРАЇНА» О.М.Головач



Директор
науково-промислового комплексу
«КУРС»
Лисенко Валерій Миколайович
«19 04 2021р.

АКТ

про впровадження кандидатської дисертаційної роботи Ковалева
Володимира Олександровича «Підвищення ефективності методів оптико-
електронного позиціонування шляхом комбінованого аналізу елементів
кадру»

Складено цей акт в тому, що впроваджені математичні моделі систем оптико-електронного позиціонування, засновані на обчисленні оптичного потоку, надають змогу проводити детектування наземних та повітряних об'єктів в ефективному радіусі 200..3000м. в залежності від поля об'єктиву відеосистеми. Інформація щодо азимуту та елевації таких об'єктів надає змогу проводити післяполітний аналіз дотримання пілотами правил виконання польотів та здійснити стабілізацію відеоінформацію не застосовуючи додаткові електромеханічні засоби. Розроблений метод розрахунку оптичного потоку додатково використовується при уточненні вектору руху літальних апаратів

Директор НПК «КУРС»



Лисенко В.М.