

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КОВАЛЕВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 519.677

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО
ПОЗИЦІОНУВАННЯ ШЛЯХОМ КОМБІНОВАНОГО АНАЛІЗУ ЕЛЕМЕНТІВ
КАДРУ**

Спеціальність 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів–2021

Дисертацією є рукопис.

**Роботу виконано у Хмельницькому національному університеті
Міністерства освіти і науки України**

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Любчик Віталій Романович, ТОВ «Карат», енергетик
виробництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Жук Сергій Якович, Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», завідувач кафедри радіотехнічних пристроїв
та систем;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Зубков Анатолій Миколайович, Науковий центр
Сухопутних військ Національної академії сухопутних
військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, провідний
науковий співробітник.

Захист дисертації відбудеться **“6” травня 2021 р. о 15⁰⁰** год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 217 головного навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “5” квітня 2021 р.

*В.о. ученого секретаря спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор*



Р. Л. Голяка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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 планами. 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 напряму науково-промислового комплексу «КУРС» та ДП «Антонов».

Мета і завдання 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'єктом дослідження є процес визначення ключових точок об'єктів в стереоскопічному відеопотоці в умовах факторів впливу.

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

Методи дослідження. Для реалізації поставленого завдання 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, згорточних 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:

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 одержаних результатів:

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».

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному виконанні теоретичної та експериментальної частин роботи та інтерпретації одержаних результатів. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: [1] – досліджено вплив методів попередньої обробки зображень на ефективність роботи систем оптико-електронного позиціонування; [2] – досліджено метод підвищення ефективності роботи систем оптико-електронного позиціонування шляхом компенсації афінних викривлень на етапі попередньої обробки; [3] – розробка стійкого алгоритму супроводу рухомих об'єктів; [4] – удосконалення методів обчислення оптичного потоку за рахунок введення в математичну модель інерційних та висотно-швидкісних параметрів; [5] – розробка системи електродистанційного керування БПЛА з автоматичною корекцією курсу на об'єкт супроводу, [6] - математичне моделювання дистанційного вимірювання висоти літальних апаратів.

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).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях, серед них 1 стаття в іноземному науковому періодичному виданні за напрямом дисертації [4], 4 статті у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України [1,2,5,6], 1 свідоцтво на реєстрацію авторського права на програмне забезпечення [3] та 6 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура роботи. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** – «**Аналіз методів та систем оптико-електронного позиціонування**» проведено дослідження відомих методів оптико-електронного пеленгування і вимірювання дальності. Проведено порівняння методів фото- та термоконтрастного пеленгування рухомих об'єктів, обробки відеопотоку за допомогою контурного аналізу, візуальної одометрії з використанням оптичного потоку, методів активного вимірювання дальності та пасивного вимірювання дальності в каліброваних стереопарах. В ході проведення аналізу встановлено, що методи контрастного пеленгування мають низьку стійкість до шумів зображення; ефективність методів контурного аналізу суттєво знижується при маневруванні як носія системи оптико-електронного позиціонування, так і об'єкта спостереження; методи, що базуються на розрахунку оптичного потоку є найбільш стійкими до шумів зображення та афінних викривлень, але потребують значних обчислювальних ресурсів. Розглянуто методи активного фазового вимірювання дальності, активного імпульсного вимірювання дальності та пасивного вимірювання дальності з використанням каліброваних стереопар. В ході аналізу методів встановлено, що активні методи вимірювання дальності забезпечують ефективну роботу лише за

умови супроводу одного об'єкту та збільшують енергоспоживання системи оптико-електронного позиціонування; методи, засновані на вимірюванні дальності в стереоскопічних зображеннях підвищують технологічні вимоги до елементів оптичної системи та не забезпечують належної завадостійкості. Розглянуто ряд технічних завдань, які необхідно вирішити в системах оптико-електронного позиціонування, а саме: збільшення завадостійкості, зменшення обчислювальних витрат, збільшення швидкості обробки відеоінформації тощо. В результаті проведеного аналізу відповідно до мети дисертаційної роботи сформовано завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі – «Дослідження та оцінювання методів супроводу об'єктів, заснованих на обчисленні оптичного потоку» вирішено друге та третє завдання дисертаційного дослідження; отримано перший науковий результат, а саме розроблено кількісний показник ефективності систем оптико-електронного позиціонування з урахуванням природних факторів впливу, маневрових характеристик носія системи, маневрових характеристик об'єктів спостереження та параметрів відеосистеми. Також для зручності оцінювання ефективності методів супроводу цілей розроблено алгоритм та пакет прикладного програмного забезпечення для генерації тестових відеопослідовностей та розрахунку оптичного потоку за допомогою відомих методів.

Детально розглянуті наступні методи супроводу рухомих об'єктів: метод шаблонів руху, метод зсуву, метод безперервного адаптивного зсуву, метод Лукаса-Канаде, Farneback. Для кожного з методів визначено ступень автоматизації, дані зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

Ступені автоматизації алгоритмів супроводу цілей.

Алгоритм	Автоматичне навчання	Автоініціалізація
Шаблони руху	+	+
Зсуву середнього	+	-
Безперервний адаптивний зсув	+	-
Лукаса-Канаде	+	-
Farneback	-	+

В процесі дослідження зазначені алгоритми було перевірено на стійкість до різних негативних факторів впливу. Дослідження проводилось в умовах стандартної схеми маневрування літального апарата при супроводі рухомого об'єкту на фоні неоднорідного фону. Результати перевірки наведені в таблиці 2.

Вплив негативних факторів на роботу алгоритмів супроводу об'єктів

Алгоритм	Фактор впливу			
	Дуже швидкий рух об'єкта	Об'єкт слабо відрізняється від фону	Велика швидкість руху фону	Масштабування розмірів об'єкта
Шаблони руху	-	+	-	+
Зсув середнього	-	-	+	-
Безперервний адаптивний зсув	-	-	+	+
Лукаса-Канаде	-	+	+	-
Farneback	+	+	+	-

Виходячи з попереднього аналізу для подальшого удосконалення було обрано методи розрахунку оптичного потоку Лукаса-Канаде та Farneback, оскільки вони забезпечують найкращі результати при швидкому переміщенні фону. Обидва методи базуються на розрахунку оптичного потоку та передбачають обробку зображень на основі піраміди масштабів. Для зручності оцінювання ефективності позиціонування рухомих об'єктів при використанні оптичного потоку розроблено кількісний показник ефективності системи оптико-електронного позиціонування, який відображає співвідношення площі перетину мінімальних обмежуючих прямокутників для характерних точок об'єкту, отриманих в результаті обробки згенерованої тестової відеопослідовності та заданих в моделі до загальної площі обмежуючих прямокутників.

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

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \dots & h_{mn} \end{pmatrix}, \text{ де } h_{ik} \in (0, 2^{32}); \text{ текстурна матриця } T = \begin{pmatrix} t_{11} & \dots & t_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & \dots & t_{mn} \end{pmatrix}, \text{ де } t_{ik} \in (0, 2^{24});$$

масиви моделей цілей $obj_i = [x, y, z, c]$; просторове положення точки спостереження $(x_c, y_c, z_c, \alpha_{yaw}, \alpha_{pitch}, \alpha_{roll})$; кутові і лінійні швидкості пересування носія системи

$$(\bar{v}, \omega_y, \omega_p, \omega_r); \text{ матриця коефіцієнтів камери } A = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \text{ коефіцієнти викривлення}$$

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

Для максимального наближення до реальних умов роботи комплексу оптико-електронного позиціонування матриці висот рельєфу і текстурна матриця беруться з обраних фрагментів GDEM (Global Digital Elevation Model) та геореференційованого растру GeoTIFF відповідно.

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

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

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

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

$$M(\alpha_{yaw}) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{yaw} & \sin \alpha_{yaw} \\ -\sin \alpha_{yaw} & \cos \alpha_{yaw} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{pmatrix} M(\alpha_{yaw}) \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} x_{ij}^{pr} \\ y_{ij}^{pr} \\ z_{ij} \\ 1 \end{pmatrix}_p = \begin{pmatrix} \frac{1}{as \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_{vh}}{2}\right)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta_{hh}}{2}\right)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-NearZ - FarZ}{NearZ - FarZ} & \frac{2FarZ - NearZ}{NearZ - FarZ} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Для визначення елементів матриць, що потрапляють в вікно проекції та підлягають перспективному перетворенню (5) використовується метод перетину проекційного променя.

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

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

Вертикальна і горизонтальна компоненти фільтра мають наступний вигляд:

$$x_{gauss} = \left(0, 0, 0.02 \frac{\omega_p}{v_{exp}}\right), y_{gauss} = \left(0, 0.03 \frac{\omega_y}{v_{exp}}, 0\right), \quad (7)$$

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

Для введення засвічування, обумовленого локальними джерелами 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 джерела засвічування, враховуючи наступне співвідношення:

$$(k_0, k_{120}, k_{240}) = \left(\frac{y_i^1}{1,732}, \frac{y_i^2}{2,766}, \frac{1,44 y_i^1 + 1,44 y_i^2}{2,943}\right), \quad (8)$$

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

Результатом вищенаведених перетворень є множина кадрів відеопослідовності, до якої застосовується обраний метод розрахунку оптичного потоку. Порівняння множини отриманих ключових точок з вхідними даними проводиться за проєктивними координатами. Сумарний показник ефективності обчислюється за співвідношенням (9):

$$K_e = \frac{S_{pts}^{gt} \cap S_{pts}^e}{S_{pts}^{gt} \cup S_{pts}^e}. \quad (9)$$

Згідно з експериментальними даними, задовільним є результат при $K_e > 0,37$. Після проведення моделювання роботи алгоритмів Лукаса-Канаде і Farneback в серії з 200 наборів даних розрахований показник ефективності для метода Лукаса-Канаде становить 0.344..0.374, для методу Farneback 0.313..0.347. Проведення льотних випробувань системи, що попередньо підлягала моделюванню, показало похибку відносно розрахованого значення 3.17% для метода Лукаса-Канаде та 2.1% - для Farneback. Основні втрати ключових точок (21%) відносяться до ділянок маневрування з високими кутовими швидкостями носія системи оптико-електронного позиціонування за каналом крену, 15% - до маловисотних ділянок з великими кутовими швидкостями за каналом тангажа, решта втрат обумовлена перекриттям об'єктів та локальними засвічуваннями.

Отже, шляхом подальшого удосконалення методів аналізу оптичного потоку було визначено введення в модель обробки даних щодо кутових та лінійних переміщень носія системи оптико-електронного позиціонування.

У **третьому розділі дисертаційної роботи – «Розробка та удосконалення методу розрахунку оптичного потоку»** вирішено четверте та п'яте завдання дослідження; отримано другий та третій наукові результати, а саме удосконалено метод побудови оптичного потоку за рахунок зменшення піраміди масштабів та розроблено метод багатоканального пасивного вимірювання дальності в некаліброваних стереопарах.

Отримані в другому розділі результати та проведений в першому розділі аналіз методів побудови оптичного потоку показує, що нестійкість методів Лукаса-Канаде та Farneback до великих кутових швидкостей переміщення камери обумовлена способом побудови піраміди масштабів. У вищезазначених методах кожен наступний шар піраміди побудовано з фіксованим масштабним коефіцієнтом, що вимагає або збільшення кількості шарів піраміди, або введення додаткових програмних засобів підтвердження правильності захоплення ключових точок в сусідніх кадрах. У випадку збільшення кількості шарів піраміди має місце зростання обчислювальних витрат системи, а отже збільшення часу обробки зображення. Використання додаткових алгоритмів підтвердження також збільшує обчислювальні витрати, залежить від конкретних умов використання системи оптико-електронного позиціонування (освітленість, характер та рівень шумів зображення тощо) і не забезпечує універсальності.

Для підвищення точності побудови оптичного потоку запропоновано зменшення кроку масштабного коефіцієнта піраміди з одночасним звуженням діапазону масштабів. Оскільки такий підхід потребує введення додаткових даних щодо кутового та лінійного переміщення камери і відстані до цілі, розроблено

функціональну схему системи оптико-електронного позиціонування, яка забезпечує синхронне надходження даних для подальшої обробки. Функціональна схема системи наведена на рис.1.

Для системи оптико-електронного позиціонування, реалізованої за наведеною схемою оптичний потік розраховується в два етапи. Першим етапом розраховується статичний потік в горизонтальній стереопарі одного кадру. На цій стадії формується карта глибини зображення в першому наближенні. Для цього застосовується немодифікований метод Лукаса-Канаде, що реалізує розрахунок вектора оптичного потоку відносно точки центру вікна стеження (V_x, V_y) вирішенням системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_x(q_1)V_x + I_y(q_1)V_y = -I_t(q_1) \\ I_x(q_2)V_x + I_y(q_2)V_y = -I_t(q_2) \\ \dots \\ I_x(q_n)V_x + I_y(q_n)V_y = -I_t(q_n) \end{array} \right\}, \quad (10)$$

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 , обчислені в точці q_i . 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:

$$|\vec{p}| = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}, \quad (11)$$

$$\alpha_p = \arctg\left(\frac{y - y'}{x - x'}\right), \quad (12)$$

при цьому відкидаються всі точки, для яких $\alpha_p \neq \alpha_k$, де α_k задається конструкційними параметрами стереокамери. На другому етапі проводиться сегментація зображень відносно шарів піраміди масштабів, в яких було отримано ненульові значення

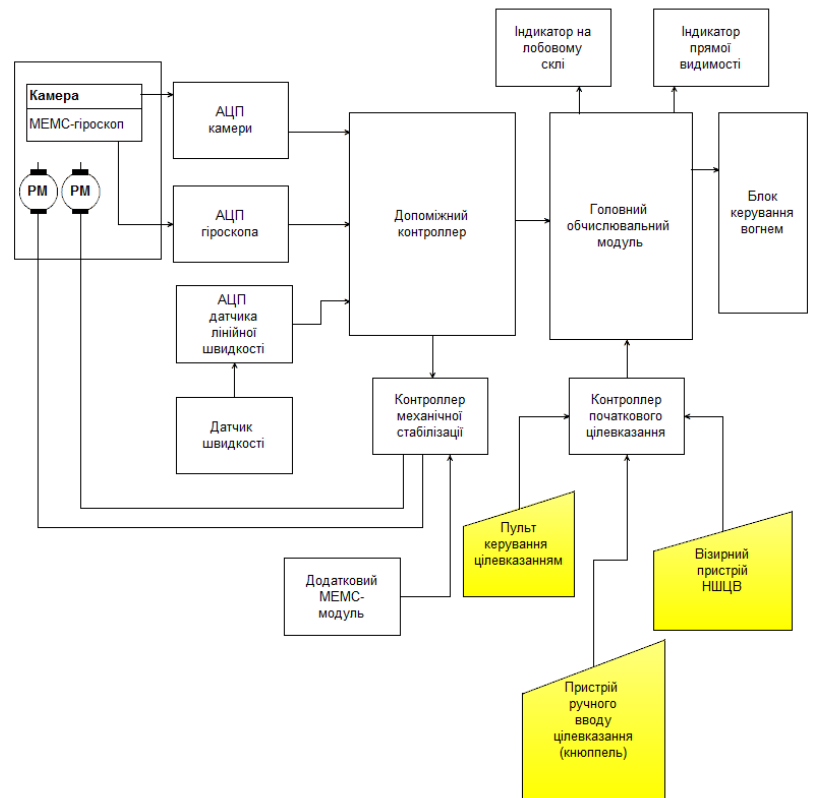


Рис.1. Функціональна схема системи оптико-електронного позиціонування

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

$$\Delta x = \frac{f}{4} \operatorname{tg} \theta_{yaw} \frac{L_x}{M_x}, \Delta y = \frac{f}{4} \operatorname{tg} \theta_{pitch} \frac{L_y}{M_y}, \quad (13)$$

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 (14):

$$\Delta x_{seg} = \frac{\Delta x}{2n_p}, \Delta y_{seg} = \frac{\Delta y}{2n_p}. \quad (14)$$

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 (11) та детектування рухомих об'єктів за середнім вектором потоку (15):

$$\alpha_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \alpha_p^i}{n}. \quad (15)$$

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

$$C_x = \frac{\sum C_{ix} A_i}{\sum A_i}, C_y = \frac{\sum C_{iy} A_i}{\sum A_i}. \quad (16)$$

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.2.

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. Порівняно з класичним методом, який базується на знаходженні максимуму функції відгуку, метод побудови карти глибини на



Рис.2. Візуалізація результату роботи удосконаленого методу розрахунку оптичного потоку.

основі оптичного потоку забезпечує на 73% більшу швидкість обробки і є більш стійким до високочастотних шумів зображення. Збільшення швидкості обробки обумовлено в першу чергу зменшенням кількості шарів піраміди масштабів та 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.4.



Рис.3. Порівняння швидкості обробки кадру методом Лукаса-Канаде та удосконаленим методом.

Для створення карти глибини в умовах суто лінійного пересування (наприклад, при використанні стабілізованих камер) розроблено метод побудови карти глибини за рахунок розмиття оптичного потоку відносно оптичної вісі об'єктива (рис. 5,а).

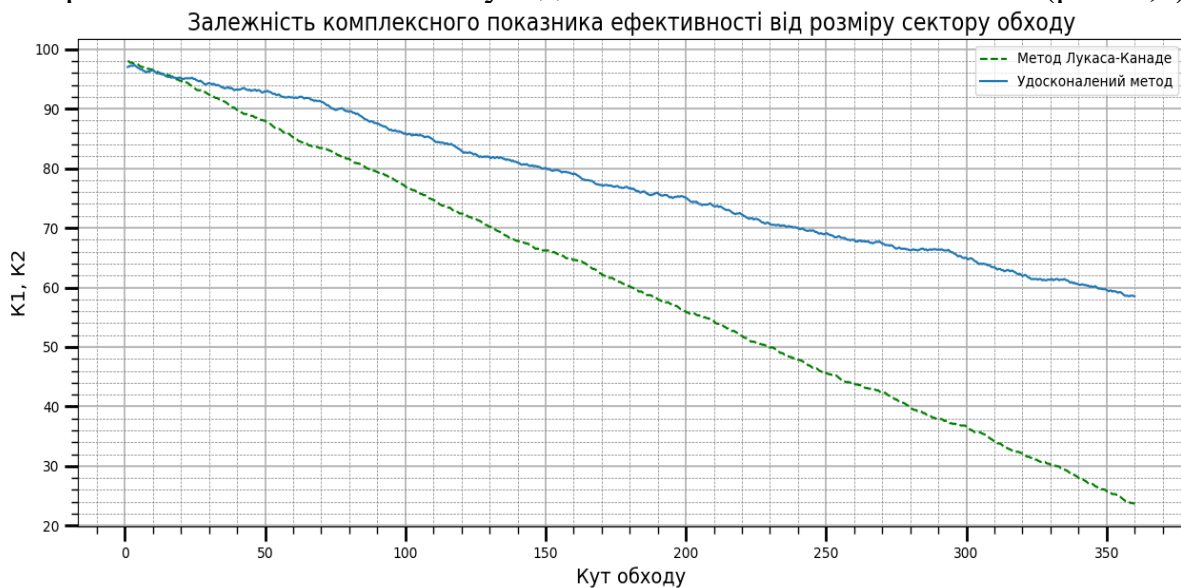


Рис.4. Результати моделювання системи оптико-електронного позиціонування при використанні методу Лукаса-Канаде та запропонованого методу відносно комплексного показника.

Схема утворення такого викривлення потоку наведена на рис. 5,б і обумовлена масштабуванням об'єктів в проективній площині при наближенні їх до камери.

Розрахунок оптичного потоку в даному випадку з метою підвищення точності проводиться в скомпенсованому зображенні відповідно до співвідношень (17):

$$\begin{aligned} x' &= x \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\ y' &= y \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \\ r^2 &= x^2 + y^2 \end{aligned} \quad (17)$$

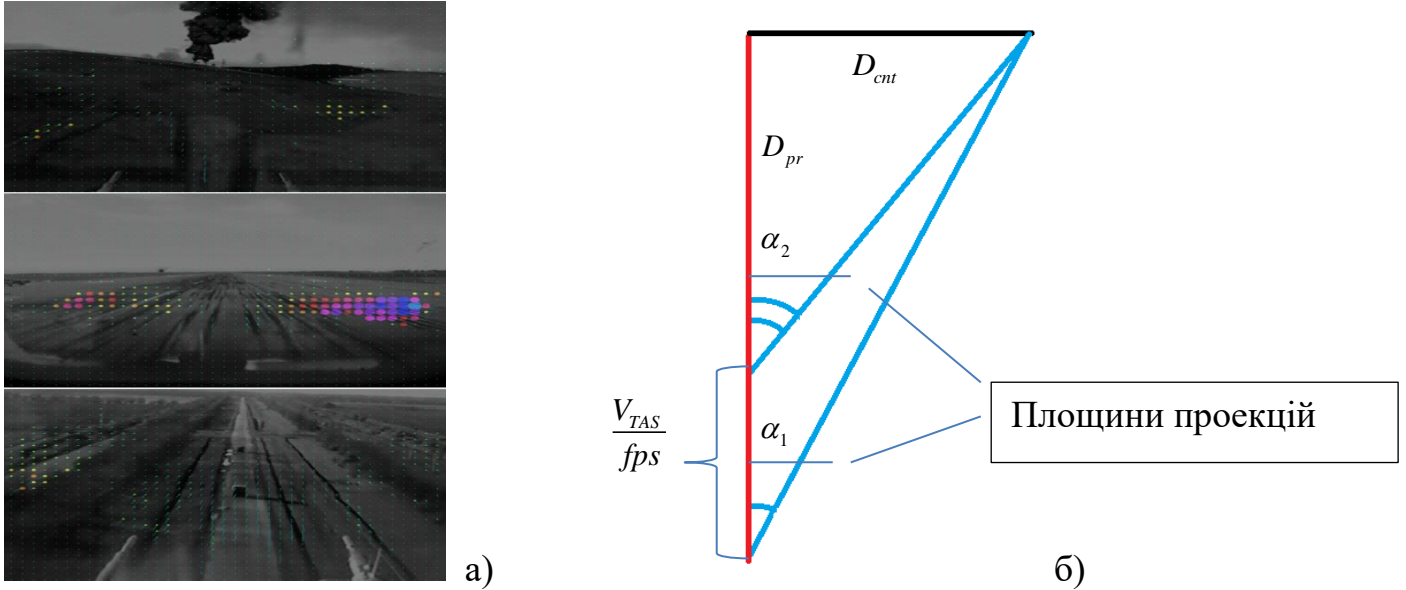


Рис. 5. Утворення швидкісного розмиття оптичного потоку.

Для подальшого розрахунку обчислюється істина повітряна швидкість літального апарату за показниками датчиків диференційного тиску за співвідношенням (18):

$$V_{TAS} = \sqrt{\frac{2K}{K-1} gRT_H \left[\left(\frac{q}{P_{CTq}} + 1 \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right]}. \quad (18)$$

Абсолютна відстань до пікселя зображення знаходиться як вирішення системи рівнянь (19) та записується у вигляді (20).

$$D_{cnt} = D_{pr} \operatorname{tg} \alpha_2, D_{cnt} = \left(D_{pr} + \frac{V_{TAS}}{fps} \right) \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (19)$$

$$D_{pr} = \frac{V_{TAS}}{fps \left(\operatorname{tg}(\sqrt{(x_p \beta_x)^2 + (y_p \beta_y)^2}) - \operatorname{tg}(\sqrt{(x'_p \beta_x)^2 + (y'_p \beta_y)^2}) \right)}. \quad (20)$$

В четвертому розділі дисертаційної роботи – «Розробка алгоритму роботи та функціональної схеми оптико-електронного позиціонування на основі аналізу оптичного потоку» у відповідності до загальної функціональної схеми системи оптико-електронного позиціонування було розроблено алгоритми програмного забезпечення для обробки відеопослідовностей. Розглянуто варіанти функціональної

реалізації систем оптико-електронного позиціонування для використання в складі наземних та бортових комплексів ЛА та розроблено відповідні розширені функціональні схеми пристроїв оптико-електронного позиціонування. Особливу увагу приділено аналізу варіантів розподілу операцій в багатопоточній реалізації програмного забезпечення, оптимізації послідовності попередньої обробки відеоінформації та синхронізації даних відеопотоку та інерційної системи ЛА. Розподіл операцій між обчислювальними підсистемами пристрою ОЕП для роботи в складі бортової апаратури ЛА наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Розподіл операцій обробки вхідної інформації між підсистемами пристрою оптико-електронного позиціонування.

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
Деаберація 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 проєктивну площину
Порогова бінарзація	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 проєктивній площині			Видача цілевказання в головний модуль

Проведено доповнення та уточнення математичної моделі системи ОЕП з урахуванням особливостей роботи реальних систем. До моделі включено розрахунки кутової орієнтації та лінійної носія системи ОЕП, фільтрацію показників датчиків фізичних величин, обчислення попереднього цілевказання з використанням нашоломної системи та підсистеми ручного вводу.

В ході роботи над розділом створено міжплатформове прикладне програмне забезпечення для основного модуля системи з урахуванням розподілу інформаційних та обчислювальних потоків. При розробці програмного забезпечення було проведено адаптацію розрахунків з урахуванням особливостей роботи сучасних процесорів для прискорення обробки вхідних даних.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи – «Розробка програмно-апаратних засобів комплексу оптико-електронного позиціонування та їх дослідження» вирішено шосте завдання дослідження; отримано четвертий науковий результат, а саме удосконалено метод попередньої обробки зображень, який відрізняється від існуючих введенням адаптивної фільтрації високочастотних шумів.

Для оцінки ефективності розробленого методу побудови оптичного потоку було виготовлено дослідний екземпляр системи оптико-електронного позиціонування, проведено лабораторні та льотні випробування і досліджено вплив способів та послідовності попередньої обробки відеоінформації на роботу системи. До складу системи входить вузол вводу відеоінформації, центральний обчислювальний блок з індикатором прямої видимості, блок вводу початкових координат (нашоломна триангуляційна система), блок індикатора на лобовому склі. Розроблено розширену функціональну схему системи (рис.6), на базі якої створено комплект конструкторської документації.

В рамках дослідно-конструкторської роботи досліджено міру впливу негативних факторів на якість відеоінформації при використанні стереокамер з дзеркально-призматичним розділенням світлового потоку та з використанням окремих камер для кожного елемента стереопари. Порівняння результатів роботи

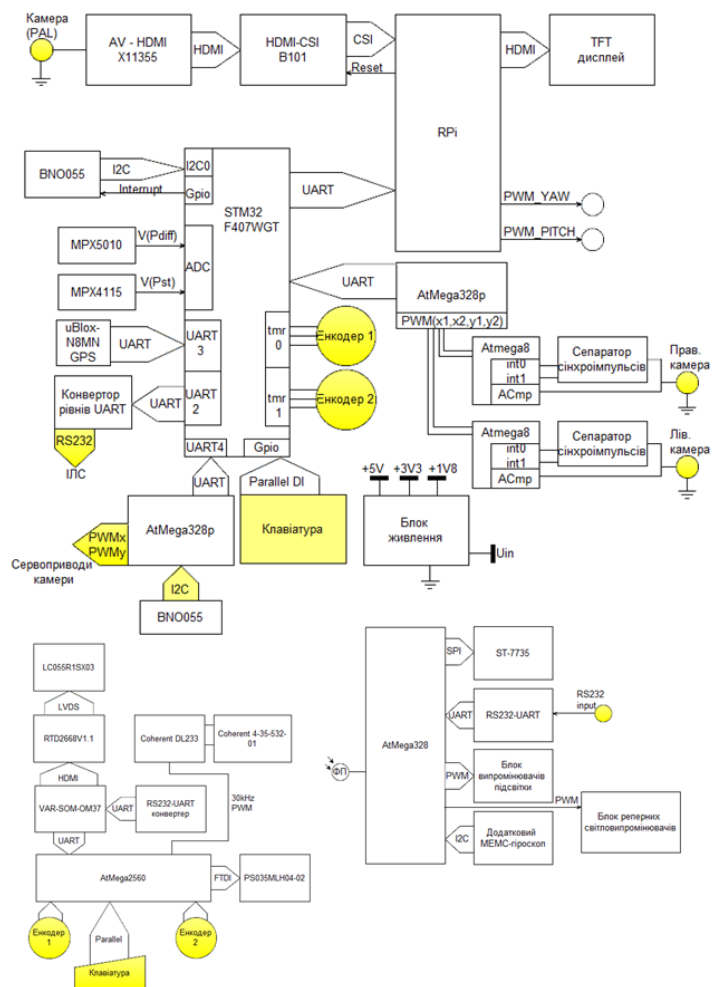


Рис.6. Розширена функціональна схема дослідної системи оптико-електронного позиціонування.

відеовузлів було проведено за кількістю захоплених пар ключових точок при зведенні стереопари в межах вікна оператора Лукаса-Канаде в умовах факторів впливу відносно статичного зображення. Результати порівняння наведені в таблиці 4.

Згідно з отриманими результатами було обрано конструкцію системи з дзеркально-призматичною системою розділення світлового потоку. Попередні стендові випробування показали суттєвий вплив попередньої обробки кадрів відеопослідовності на результат роботи системи в цілому.

Таблиця 4

Порівняння ефективності роботи систем вводу відеоінформації.

Фактор впливу	Система з двома камерами	Дзеркально-призматична система
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%

Найкращі результати отримано при використанні наступної послідовності попередньої обробки: фільтр Гауса – ерозія – дилатація. При цьому з'ясовано, що зміна швидкісного режиму суттєво впливає на ефективність попередньої обробки кадру при збереженні розмірності ядра фільтра Гауса та ітераційних показників ерозії та дилатації. Використання фільтра Гауса з симетричним ядром в режимі маловисотного польоту з великими кутівими швидкостями викликає значне зменшення кількості вірних розпізнавань ключових точок оптичного потоку для об'єктів у зв'язку з інертністю затвору камери. Для адаптації розмірностей компонент фільтру використовуються значення модулів векторів оптичного потоку, отримана в попередніх двох циклах роботи алгоритму. Для кожної зони зображення знаходиться середнє відхилення від оптичної вісі камери за співвідношенням (21):

$$D_{np} = D_p - \sum_{i=0}^{n_k} T A S_i, | \bar{p} |_{np} = K_{zoom} \sqrt{x_{pix}^2 + y_{pix}^2} \operatorname{atg} \frac{D_{np}}{D_{cnt}}. \quad (21)$$

Розмірність матриці фільтру при цьому розраховується за співвідношенням (22) для кожного сегмента зображення окремо:

$$x_{gauss} = (0, 0, 0, 0, 0, 53 \frac{v_{exp}}{\Delta l | \bar{p} |_{np} \sin \alpha_{mcl} / L_{sp}}), y_{gauss} = (0, 0, 53 \frac{v_{exp}}{\Delta l | \bar{p} |_{np} \cos \alpha_{mcl} / L_{sp}}, 0). \quad (22)$$

Використання адаптивного фільтру дозволило скоротити втрати кількості правильно розпізнаних ключових точок оптичного потоку в маловисотних режимах з 15 до 9% та підвищити показник ефективності системи до значення 0.64..0.67, при цьому експериментальні дослідження показують зменшення залежності кількості правильно захоплених точок цілей від рельєфу місцевості.

Льотні випробування дослідного зразка підтвердили збільшення показника ефективності системи оптико-електронного позиціонування при використанні удосконаленого метода розрахунку оптичного потоку та адаптивного фільтру та відповідність експериментальних даних до розрахованих в моделі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА 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. Достовірність отриманих даних перевірено в ході експериментальних досліджень.

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%. Достовірність даних підтверджено в ході проведення випробувань дослідного зразка системи оптико-електронного позиціонування, яка реалізує вказаний метод.

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. Достовірність методу підтверджено в ході моделювання, стендових та льотних випробувань дослідної системи оптико-електронного позиціонування.

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. В ході створення програмного забезпечення було вирішено завдання синхронізації даних від пристрою вводу відеоінформації та інерційної системи, оптимізовано процеси попередньої обробки відеоінформації та розподілу математичних операцій з урахуванням багатопоточності програмного забезпечення.

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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Статті у наукових фахових виданнях України та наукових періодичних
виданнях інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз
даних:

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. «Дводіапазонний 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 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)

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

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., Клепиковський 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. Клепиковський А.В. Розробка комплексу оптико-телевізійного наведення з використанням адаптивних алгоритмів супроводу / Клепиковський 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., Клепиковський 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 дводіпазонних системах оптико-телевізійного наведення / Ковалев В.О., Клепиковський 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., 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.

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 та телевізійні системи. – Хмельницький Національний університет Міністерства освіти і науки України, Хмельницький, 2021.

Дисертаційне дослідження присвячене розробці методів оптико-електронного позиціонування з метою підвищення ефективності їх функціонування. В дисертаційній роботі було запропоновано кількісний показник ефективності систем оптико-електронного позиціонування з урахуванням природних факторів впливу, маневрових характеристик носія системи, маневрових характеристик цілей та штучних перешкод, що дозволяє оцінити роботу подібних комплексів в реальних умовах, не проводячи натурних експериментів. В роботі 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 в цілому. Також було запропоновано метод багатоканального пасивного вимірювання дальності на основі оптичного потоку в стереоскопічному зображенні, який дозволяє, на відміну від існуючих, будувати карту глибини зображення в некаліброваних стереопарах з масштабною стереобазою. 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 в умовах неоднорідного фону. Розроблено 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. 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.

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

АННОТАЦІЯ

Ковалев В.А. Повышение эффективности методов оптико-электронного позиционирования путем комбинированного анализа элементов кадра. – на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Хмельницкий Национальный университет Министерства образования и науки Украины, Хмельницкий, 2021.

Диссертационное исследование посвящено разработке методов оптико-электронного позиционирования с целью повышения эффективности их функционирования. В диссертационной работе был разработан комплексный показатель эффективности систем оптико-электронного позиционирования с учетом естественных факторов влияния, маневренных характеристик носителя системы, маневренных характеристик объектов наблюдения, что позволяет оценить эффективность систем оптико-электронного позиционирования без проведения экспериментов. В работе усовершенствован метод расчета оптического потока

Лукаса-Канаде путем введения в математическую модель данных, полученных с датчиков инерциальной и высотно-скоростной подсистем, что снизило количество необходимых слоев в пирамиде масштабов, что позволило обеспечить значительный прирост скорости обработки изображений. Введен метод многоканальной пассивной дальнометрии на основе анализа оптического потока, обеспечивающий построение карты относительной и абсолютной глубины изображения в некалиброванных горизонтальных стереопарах а также детектировать и сопровождать подвижные объекты без введения дополнительных алгоритмов трекинга. В работе предложен метод построения карты глубины изображения в условиях линейного сближения, базирующийся на анализе оптического потока, полученного при масштабировании объектов видеопоследовательности. Также был усовершенствован метод предварительной обработки изображения путем введения адаптивной фильтрации высокочастотных шумов изображения для использования с узкопольными оптическими системами. Предложен алгоритм и прикладное программное обеспечение, реализующие усовершенствованный метод расчета оптического потока и метод многоканальной дальнометрии для работы в составе систем оптико-электронного позиционирования. Разработан комплект конструкторской документации и изготовлен опытный экземпляр системы оптико-электронного позиционирования, реализующей методы расчета оптического потока и измерения дальности, полученные в результате диссертационного исследования.

Ключевые слова: оптико-электронное позиционирование, оптический поток, карта глубины стереопары, метод Лукаса-Канаде, медианная фильтрация, билатеральная фильтрация, детектор движения.

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 Ph.D. degree in technical sciences on speciality 05.12.17 - radio engineering and television systems. - Khmelnytsky National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Khmelnytsky, 2021.

The dissertation research is devoted to the development of optical-electronic guidance methods in order to increase the efficiency of their functioning. In the dissertation work, a quantitative indicator of the effectiveness of optical-electronic guidance systems was developed, taking into account the natural factors of influence, the maneuverable characteristics of the carrier of the system, the maneuverable characteristics of targets, interference from the means of optical-electronic suppression, which makes it possible to evaluate the effectiveness of the optical-electronic guidance systems without conducting experiments. In this work, the method for calculating the optical flow of Lucas-Kanade was improved by introducing into the mathematical model the data obtained from the sensors of the inertial and high-altitude-velocity systems, which reduced the number of required layers in the method scale pyramid without increasing the processing time. A method of multichannel massive ranging based on the analysis of the optical flow has been developed, which provides the construction of a map of the relative and absolute depth of the image in uncalibrated horizontal stereopairs. The image preprocessing method was also improved by introducing adaptive filtering of high-frequency image noise. An algorithm and applied

software have been developed that implement an improved method for calculating the optical flow and a method of multichannel ranging for operation as part of optoelectronic guidance systems. A set of design documentation has been developed and a prototype of an optical-electronic guidance system has been manufactured, which implements the methods for calculating the optical flow and measuring the range obtained as a result of the dissertation research.

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

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БІНС – безінерційна навігаційна система;
БПЛА – безпілотний літальний апарат;
ІЛС – індикатор на лобовому склі;
ПІВ – індикатор прямої видимості;
ЛА – літальний апарат;
ОЕЛ – оптико-електронна локація;
ОЕП – оптико-електронне позиціонування;
ОП – оптичний потік;
ПСП – повне світлоповернення;
ПСС – повна світлосила;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ЦФ – цифровий фільтр.

Підписано до друку 31.03.2021р. Папір офсетний. Друк на різогр.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 120 прим. Зам. №318

Друк СПДФО Марусич М.М. Свідоцтво №1252 від 30.12.1996
м. Львів, пл. Осмомисла, 5/11
тел./факс (032) 261-51-31.
email: interprint-m@ukr.net