

к.с.-г.н., доц. **Пасічник Н.А.** (НУБіП м.Київ)
к.т.н., доц. **Опришко О.О.** (НУБіП м.Київ)
д.т.н., проф. **Шворов С.А.** (НУБіП м.Київ)
д.т.н., проф. **Василенко В.В.** (НУБіП м.Київ)
Теплюк В.М. (НУБіП м.Київ)
Глуган Ф.В. (НУБіП м.Київ)

DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2023/79-06>

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ МІСЦЕВОСТІ В НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ БПЛА

У роботі проаналізовані сучасні методи аналізу зображень місцевості в навігаційних системах БПЛА та наведені експериментальні результати досліджень методу навігації БПЛА на основі застосування просторово-спектральних портретів об'єктів на ділянках місцевості. В умовах радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА засобами РЕБ існує актуальна потреба в розробці та застосуванні нових завадозахищених методів навігації БПЛА. Метою роботи є удосконалення методів аналізу зображень місцевості в системах технічного зору БПЛА. Для досягнення цієї мети у роботі вирішувались такі завдання: проведено аналіз можливого використання існуючих методів та систем технічного зору на БПЛА; здійснено обґрунтування методу аналізу зображень з використанням просторово-спектральних портретів місцевості в системах технічного зору БПЛА.

Проаналізовано метод обчислення пройденого шляху на основі аналізу потоку відеоданих, які надходять з оптикоелектронних приладів спостереження, метод точної прив'язки до рельєфу за стереоефектом, що виникає під час руху камери та метод точної прив'язки за еталонними фотографіями. З метою підвищення ефективності навігаційної системи БПЛА запропоновано застосування просторово-спектральних портретів об'єктів на ділянках місцевості. При цьому кадри відео порівнюються із закладеними спектральними портретами ділянок маршруту, у разі «впізнання» визначаються точні координати та орієнтація БПЛА. Застосування цього метода пов'язане з необхідністю врахування впливу змін освітлення на спектральні показники об'єктів та ділянок місцевості. В дослідженні розглянуто існуючі методики корекції змін освітлення для різних фотоапаратів в лабораторних та польових умовах. Для проведення корекції щодо змін природнього освітлення запропоновано використовувати експериментально отримані залежності під конкретні марки сенсорного обладнання. При побудові систем навігації по спектральним портретам місцевості рекомендовано використовувати об'єкти та ділянки з найбільш стабільними, щодо змін освітлення, оптичними характеристиками.

Ключові слова: БПЛА, навігаційні системи, технічний зір, аналіз зображень, портрети, об'єкти.

Вступ. В ході бойових дій створюються принципово нові виклики щодо придушення навігаційної системи БПЛА засобами РЕБ. Це пов'язано з тим, що в систему навігації на переважній кількості малих БПЛА входять недостатньо завадозахищені канали зв'язку приймача сигналів зі супутникових радіонавігаційних систем (СРНС). До найпоширеніших СРНС належать системи: ГЛОНАСС (Росія), GPS/NAVSTAR (США), Beidou (Китай), Galileo (ЄС). Сигнали СРНС формуються на частотах в діапазоні 1,1-1,6 ГГц. Як правило, прості навігаційні системи, що встановлюються на малі БПЛА, використовують інтегрований режим обробки сигналів від кількох СРНС, що підвищує точність навігації як в горизонтальній площині, так і по висоті. На більш складніших БПЛА встановлюються елементи автономної навігаційної системи – акселерометри, гіроскопи, барометри, лазерні висотоміри тощо. Загальноприйнятою нормою точності авіаційних інерційних навігаційних систем (ІНС) «середньої точності» є помилка обчислення шляху 1,8 км за 1 годину польоту. Така точність досягається авіаційними ІНС на основі лазерних чи волоконно-оптичних гіроскопів. Однак,

значна маса таких ІНС робить проблематичним їх використання на малих (і навіть середніх) БПЛА. В результаті на малих БПЛА встановлюються простіші ІНС, які оснащені мікромеханічними датчиками руху – акселерометрами та гіроскопами. Така ІНС без її корекції за сигналами СРНС не в змозі здійснювати автономне числення пройденого шляху через високі швидкості дрейфу гіроскопічних датчиків. Нагромаджувана помилка мікромеханічних ІНС в умовах відсутності коригувальних сигналів СРНС за 1 хв становить до 3 м по горизонталі та 2 м по вертикалі. Таким чином, такі ІНС здатні без сигналів СРНС підтримувати прийнятну точність польоту на рівні 100-150 м на протязі не більше 10 хв. При цьому, як правило, мається на увазі підтримка режиму прямолінійного польоту без прискорень та маневрів.

При використанні інерційної системи наднизької точності (особливо на БПЛА ближньої дії) відсутність коригувальних сигналів від СРНС може призвести до «розвалу» інерційної системи та аварії БПЛА. Тому придушення СРНС розглядається як основний метод боротьби з БПЛА. Застосування високоточних інерційних навігаційних систем також не вирішує проблему з таких причин [3]: ці системи дорогі (від 30-50 тис. доларів); маса інерційної системи «середньої точності» на лазерних чи волоконно-оптичних гіроскопах становить від 8 кг, що робить проблематичним їх використання на БПЛА малої та навіть середньої дальностей; важливим обмеженням інерційних навігаційних систем є зростання помилки визначення координат із часом автономної роботи. Таким чином, виникає типове протиріччя: методи, що призводять до покращення точності навігації, одночасно призводять до втрати системою автономності та стійкості до перешкод. Ця суперечність зменшується введенням відеонавігації спільно з визначенням координат БПЛА по пеленгаційних вимірах на об'єкт, що спостерігається, з відомими координатами. Для використання відеонавігаційного способу необхідно отримувати зображення місцевості камерою, потім проведення його аналізу бортовим комп'ютером і, виходячи з цього аналізу, знаходити координати та орієнтацію літального апарату. Ці методи аналогічні методам, які використовує людина для орієнтації у просторі. Виробники безпілотних систем проводять дослідження та розробки, спрямовані на забезпечення автономності застосування БПЛА за умов відсутності сигналів супутникової навігації на основі альтернативних джерел даних. До таких даних належать передусім видова інформація, що надходить з бортових фото та відеокамер денного та інфрачервоного діапазонів, що є актуальним для вирішення завдань навігації БПЛА у середовищах без застосування GPS [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що компанія RockwellCollins, яка виробляє апаратуру навігації та управління польотом для БПЛА різних типів, оголосила про завершення розробки Vision Augmented Inertial Navigation System (VAINS), в якій забезпечується корекція інерційної системи за швидкістю та координатами від відеокамери без сигналів супутникової навігаційної системи [2, 3]. В основу таких розробок покладено наступні базові методи:

1. Обчислення пройденого шляху на основі аналізу потоку відеоданих, що надходить з оптикоелектронних приладів спостереження. У першому кадрі відеопотоку знаходяться характерні точки і далі відбувається відстеження їхнього переміщення в кадрі. За характером переміщення програма визначає як змінюється положення та орієнтація самої камери. Основним обмеженням методу є можливість лише відносного визначення координат та орієнтації, що може призвести до зростання помилки навігації з часом. Також можуть бути причини, що призводять до неможливості знайти відповідні пари точок на знімках: недостатня освітленість, неможливість використання у разі хмарності, неможливість використання над гладкою поверхнею без характерних особливих точок;

2. Метод точної прив'язки по рельєфу за стереоефектом, що виникає під час руху камери. Цей спосіб дозволяє частково компенсувати недоліки першого методу. Використовуючи перекриття потоку фото-відеоданих – відновлюється рельєф, який порівнюється із закладеними в пам'ять даними, у разі «впізнання» визначаються точні координати та орієнтація. Основна перевага перед попереднім методом – можливість знайти не тільки

відносні, а й абсолютні значення координат камери, оскільки знання карти прив'язує камеру до конкретних точок на місцевості з відомими абсолютними координатами. Це веде до того, що помилка навігації не зростає з часом. Основний недолік методу – чутливість до занадто великих помилок вихідних координат камери, отриманих від інерційних навігаційних приладів, які метод повинен уточнювати. Також зберігається і такий недолік першого методу, як неможливість роботи над водною або піщаною поверхнею та виникнення суттєвої помилки у відсутності явно вираженого рельєфу;

3. Метод точної прив'язки за еталонними фотографіями – кадри відео порівнюються із закладеними в базу даних зображеннями ділянок маршруту, у разі «впізнання» визначаються точні координати та орієнтація. Цей метод забезпечує високу точність визначення абсолютних координат навіть за відсутності рельєфу. Він також дозволяє знайти абсолютне місцезнаходження камери, навіть коли її приблизні координати взагалі невідомі. Це досягається шляхом сканування всієї бази даних зі знімками місцевості та порівняння їх із поточним знімком. Крім того, маючи «прив'язаний» знімок, можна з високою точністю визначати координати наземних об'єктів, виявлених оптико-електронною апаратурою. Якщо колір об'єкта відрізняється від фону, то «прив'язка» знімків відбувається за допомогою наступного алгоритму [4]: виділення пікселів, відповідних заданому об'єкту; виділення знайдених об'єктів контурами; знаходження прямокутника, до якого потрапляють усі точки контуру об'єкту. Однак, впровадження цього методу потребує вирішення ряду методологічних питань, зокрема врахування впливу змін освітлення на спектральні показники об'єктів.

Метою роботи є удосконалення методів аналізу зображень в системах технічного зору БПЛА.

Для досягнення цієї мети виникає необхідність у вирішенні наступних завдань:

1. Провести аналіз можливого використання існуючих методів та систем технічного зору (СТЗ) на БПЛА;
2. Обґрунтувати метод аналізу зображень об'єктів з використанням просторово-спектральних портретів місцевості в системах технічного зору БПЛА.

Результати дослідження. При використанні кореляційних методів зіставлення поточного і еталонного зображень принцип порівняння поточного зображення з еталоном ґрунтується на розгляді зображень як двовимірних функцій яскравості (дискретних двовимірних матриць інтенсивності). При цьому вимірюється або відстань між зображеннями, або міра їх близькості.

Згідно [5], в узагальненій формі процес технічного зору містить наступні основні етапи: формування зображення; попередня обробка зображення; сегментація зображення; опис і аналіз зображення.

Узагальнена схема алгоритму кореляційного порівняння чорно-білих і кольорових зображень різної розмірності складається з наступних етапів.

Перший етап – обробка зорової інформації та формування зображення. Він включає в себе автоматичне налаштування (вибір поля зору, фокусування, встановлення діапазону дальності дії, введення зображення (запис зображення в накопичувач).

На другому етапі кореляційного порівняння зображень здійснюється попередня обробка, яка призначена для видалення шумів (на основі згладжування, фільтрації), поліпшення контрастності, корекція спотворень і бінаризація зображення.

На третьому етапі кореляційного зору реалізуються алгоритми сегментації і кодування. Сегментацією називають процес розбиття зображення робочої сцени на складові частини: об'єкти, їх фрагменти або характерні особливості. Під кодуванням розуміють стиснення відеоінформації для зберігання в пам'яті системи.

Четвертий етап обробки зорової інформації – формування кореляційної функції. Зазвичай для обчислення відстані між зображеннями використовується наступна функція:

$$\rho(f, g) = \left[\sum_{(x, y) \in O} |f(x, y) - g(x, y)|^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (1)$$

де $f(x, y)$, $g(x, y)$ – функції інтенсивності, O – поле зору, α – ціле число.

Величина α визначає характеристики використаної метрики. При $\alpha = 2$ цей вислів описує евклідову відстань між зображеннями, які розглядаються як вектори, що належать простору $L_2(x, y)$ на полі зору O функцій інтенсивностей.

Якщо дано n еталонних зображень $\{f_i\}$, $i = 1, \dots, n$, кожне з яких відповідає j -му класу, віднесення знову висунутого фрагмента зображення g до деякого класу j може здійснюватися, наприклад, за методом мінімальної відстані до відповідного еталона:

$$j = \arg \min(\rho(g, f_i)). \quad (2)$$

Існують й інші способи формування кореляційних функцій [5]:

простий кореляційний аналіз, який обчислює вагову кореляційну функцію або інтеграл згортки; вимагає значних обчислювальних потужностей для здійснення операцій множення й інтегрування при всіх зрушеннях і розворотах отриманого і еталонного зображень;

кореляційний аналіз з фільтрацією забезпечує фільтрацію від перешкод;

кореляційний аналіз з суміщенням зображень, повернених щодо кута обертання;

кореляційний аналіз з розкладанням на кольори забезпечує формування кореляції відповідних складових кольору зображень.

Застосування конкретного формувача кореляційної функції обумовлюється завданням, що виконується системою. На етапі аналізу кореляційної функції використовується один з наступних алгоритмів.

1. При амплітудному кореляційному аналізі необхідна інформація визначається на основі оцінки амплітуди головного максимуму кореляційної функції. Це найпростіший вид аналізу, однак, він гірше за інших забезпечує точності характеристики системи.

2. Більш високі точності характеристики, в порівнянні з амплітудним аналізом, забезпечує модифікований амплітудний кореляційний аналіз, в якому необхідна інформація визначається на основі аналізу параметрів (ширина, крутизна) кореляційної функції.

3. Кореляційний аналіз з корекцією координат допускає безперервне обертання еталона при кутовому суміщенні зображень. При цьому отримана груба оцінка координат уточнюється.

4. Різницевий кореляційний аналіз, заснований на поелементному обчисленні різниць інтенсивності спостережуваного і еталонного зображень, за обсягом обчислень має перевагу перед класичним аналізом, який потребує проведення операції множення.

5. Модифікований спектральний алгоритм, який визначає кутову координату, заснований на Фур'є-перетворенні і обчислює відмінність спектрів.

6. Квадратичний кореляційний аналіз реалізується шляхом зведення в квадрат кореляційної функції, за рахунок чого збільшується різниця між головним і побічним максимумами. Це значно підвищує стійкість системи.

7. Структурний (синтаксичний або лінгвістичний) кореляційний аналіз базується на трьох процедурах: виділення контурів на спостережуваному зображенні, виділення дескрипторів (ліній певної форми, сегментів) і описі їх параметрів – синтаксичний аналіз з використанням граматики (класифікація). При реалізації алгоритму проводиться порівняння ознак, а не повних зображень. Це значно знижує необхідний обсяг пам'яті системи і зменшує обсяг обчислювальних операцій.

Важливі недоліки кореляційних методів виявлення проявляються в присутності яскравості і геометричних спотворень поточного зображення в порівнянні з еталонним. Зокрема, спостерігається швидке зменшення кореляційного зв'язку при ракурсних викривленнях, наприклад, при поворотах зображень та при різній освітленості. Присутність викривлень зазвичай вже не дозволяє використовувати кореляційні методи виявлення [5-8].

У зв'язку з недостатньою стійкістю кореляційних алгоритмів до можливих спотворень вони не знаходять широкого застосування при конструюванні алгоритмів виявлення складних структурованих об'єктів. З іншого боку, активно розвиваються методи виявлення і розпізнавання, які ґрунтуються на вилученні з об'єктів їх унікальної структури, представленій у вигляді характерних рис об'єкта.

При вирішенні задачі виявлення і розпізнавання об'єктів можуть бути використані характерні особливості зображень. Наприклад, при ієрархічній кореляційній обробці у схемах порівняння обчислюється міра близькості поточного і еталонного зображень, що визначається таким чином:

$$\rho = \sum_{i=1}^m a_i \rho_i (F_{i_{T_r}} - F_{i_{A_C}}), \quad (3)$$

де ρ_i – міра близькості між алгоритмом векторної функції $F_{i_{T_r}}$ i -ої характерної риси поточного зображення і векторної функції $F_{i_{A_C}}$ i -ої характерної риси еталонного зображення; a_i – ваговий коефіцієнт i -ої характерної риси.

Характерні риси на зображенні мають такі види атрибутів:

1. Положення: кінці відрізка, центр відрізка, центр ваги області, вершини багатокутників.
2. Геометричні атрибути: орієнтація, довжина, кривизна, площа, периметр, ширина лінії, мінімальний і максимальний діаметр області, осі симетрії, число і положення особливих точок, показник компактності.
3. Радіометричні атрибути: контраст, статистика розподілу яскравості, знак і величина краю, автокореляція.
4. Текстерно атрибути: матриця суміжності, показник однорідності, енергія, ентропія, статистика градієнтів текстури, результати застосування текстурних фільтрів, моменти.
5. Топологічні атрибути: зв'язність, сусідство, загальні точки, перетин, паралельність, перекриття, включення.
6. Кольорові (багатозональні) атрибути: вектор атрибутів для кожного каналу.
7. Динамічні атрибути: атрибути статичних і рухомих об'єктів.
8. Тимчасові атрибути: функції зміни атрибутів згодом.

Вибір конкретних характерних рис і їх атрибутів для побудови алгоритмів виявлення повинен ґрунтуватися на таких основних критеріях:

1. Присутність (щільність): наявність даних характерних рис на всіх використовуваних зображеннях, достатня щільність характерних рис для покриття району, який цікавить.
2. Рідкість (унікальність): рідкість конкретної з характерних рис на зображенні, унікальність характерних рис в околиці.
3. Інваріантність (стійкість): робастність по відношенню до геометричних і радіометричних спотворень, нечутливість до шуму.
4. Локалізація: можливість точної локалізації.
5. Інтерпретація: можливість швидкого розпізнавання й інтерпретації.
6. Швидкість: час виділення даного класу характерних рис з вихідного зображення.

Висока якість щільності характерна для точок, оскільки імовірність того, що область буде повністю присутня на досліджуваному зображенні, вкрай мала. Однак, можна встановити наявність об'єкта на зображенні в тому випадку, якщо будуть знайдені деякі характерні для цього об'єкта точки.

Високу якість унікальності мають області, що описують весь об'єкт. У разі знаходження характерних точок об'єкта ймовірність похибки розпізнавання більше, оскільки знайдені лише деякі точки, відповідні об'єкту.

Точки є найбільш інваріантними до повороту і зміни масштабу, в той час як області при повороті і масштабуванні піддаються істотній деформації. З іншого боку, області найбільш

чутливі до шуму, оскільки особливі точки можуть бути відсіянні при проведенні фільтрації як шуму.

Точки мають найбільшу точність локалізації, ніж області, оскільки їх розташування визначається єдиною парою координат, в той час як розташування центру області сильно залежить від того, яка частина області присутня на зображенні і чи правильно визначені її межі.

Знаходження точок здійснюється швидше, ніж знаходження областей, оскільки операція їх пошуку не вимагає рішення задачі зв'язування.

Найвні розриви, одержувані в результаті втрат при фільтрації, спотворюють геометричну форму й інші параметри області, в той час як для точок вони відкидають характерну ознаку цілком.

Лінії можна розглядати як сукупність особливих точок або як контур областей, тому значення критеріїв якості для них є середніми між значеннями критеріїв якості точок і критеріїв якості областей.

При роботі з реальними зображеннями розглянуті критерії є суперечливими. Тому конкретний вибір характерних рис і їх атрибутів залежить від доступної обчислювальної потужності і від мінімально необхідної робастності опису характерних рис.

На даний час існують різні алгоритми виділення характерних (особливих) точок зображень. Особливими точками (ключовими точками, точковими особливостями) називаються точки, які містять основну інформацію про зображення [5]. Людське око знаходить особливі точки автоматично. Особливі точки зазвичай розташовуються в місцях сильного перепаду яскравості пікселів, на кордонах і краях об'єктів. Точковою особливістю x' зображення називається точка, чия околиця відрізняється від околиць прилеглих точок по обраній мірі Ωx , тобто $\forall x |x' - x| < r \Rightarrow \rho(\Omega x, \Omega x') > \varepsilon$ – околиця точки x , а $\rho(\Omega x, \Omega x')$ – функція близькості околиць по деякій мірі. Всі точкові оператори засновані на обчисленні деяких атрибутів і визначенні, чи перевищують значення цих атрибутів поріг. Поріг визначає число виявлених точок. Він може визначатися адаптивно або фіксуватися заздалегідь. Альтернативним способом (без використання порога) є сортування значень атрибутів і вибір n кращих точок.

Окремо в ряду методів виявлення кордонів – вартий метод Кенні [5]. Автор визначив набір вимог до методу виявлення кордонів і описав оптимальний спосіб їх досягнення.

Реалізація методу Кенні складається з 4 послідовних кроків: згладжування, диференціювання, придушення в точках відсутності максимуму (Non-maximum Suppression) і порогової сегментації. Загальна складність методу Кенні, в порівнянні з іншими, описаними вище, є використання декількох стадій. У той же час це дає кращу якість сегментації зображення. Крім цього, слід врахувати, що він являє собою набір різних послідовно виконуваних алгоритмів.

Перевагами методу Кенні можна назвати стійкість до шуму завдяки використанню методу Гаусса і те, що він являє собою налагоджене комплексне рішення. Недоліками є висока складність обчислень, некоректне розпізнавання Y-розгалужень через застосування порогової сегментації на основі спостереження.

Не дивлячись на різноманіття методів, на практиці застосування контурних методів можливо тільки для виділення протяжних об'єктів (дороги, будівлі, русла річок), оскільки їх контури менше схильні до спотворень. Таким чином, ці підходи здатні виділяти лише обмежений перелік об'єктів, можливих для спостереження з БПЛА.

Завдання виділення характерних областей представляє собою завдання сегментації зображень. Сегментація виконує розбиття зображення на безліч областей, однорідних відповідно до заданих критеріїв. У результаті сегментації формується карта областей (або сегментів) зображення. Серед підходів до побудови алгоритмів сегментації можна виділити наступні чотири класи:

1. Розбиття зображення проведенням контурів за допомогою застосування відомих контурних операторів (операторів Робертса, Прюїтт, Собеля, Лапласа та ін.), алгоритмів

виявлення так званих точок переходу через нуль другої похідної і алгоритмів простеження контурів.

Для вирішення завдання сегментації такий підхід має ряд переваг, серед яких: можливість отримання карти з безперервними контурними лініями; простежування лінії в разі невеликих порушень контурних перепадів (розривів); проведення контурних ліній мінімальної товщини. З недоліків можна відзначити наступні: сильна залежність від шумів на зображенні, необхідність попереднього вибору початкових точок простеження контурів, певні складності в точках перетину або розгалуження контурів, необхідність додаткового аналізу і фільтрації отриманої карти контурів [5-10].

2. Морфологічний підхід. З подібних методів найбільш відома сегментація по вододілах. Вона полягає в інтерпретації гладких областей як локальних басейнів, а контурів між ними як вододілів. При цьому визначаються локальні мінімуми як центри нарощування і до них поступово додаються пікселі, що знаходяться навколо і слабо відрізняються за заданими критеріями. У кінцевому підсумку з'являються області з центрами в локальних мінімумах і перегородки (вододіли) між ними. Головним недоліком даного підходу для застосування у системі технічного зору БПЛА є необхідність в попередньому визначенні центрів нарощування областей, що зазвичай проводиться вручну.

3. Розбиття зображення на однорідні області. До них відносяться порогові методи, які використовують як глобальні, так і адаптивні пороги. Граничне перетворення може розглядатися як операція, при якій проводиться порівняння з функцією

$$T = T(x, y, p(x, y), f), \quad (4)$$

де f – зображення, $p(x, y)$ – локальна характеристика точки (x, y) зображення, наприклад, середня яскравість в околиці з центром у цій точці. Зображення, що отримується в результаті порогового перетворення, визначається наступним чином:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T, \\ 0, & f(x, y) < T. \end{cases} \quad (5)$$

Пікселі, яким присвоєно значення 1, відповідають об'єктам, а пікселі зі значенням 0 – фону. Граничне перетворення може бути багаторівневим. У цьому випадку використовується кілька порогів.

Методи порогової обробки добре зарекомендували себе при використанні в системах технічного зору БПЛА при визначенні контрастних об'єктів, якими зазвичай і є штучні об'єкти на природному тлі. Однак, результат порогової сегментації залежить від правильного вибору порогу, вибір значення якого залежить від умов зйомки та характеру спостереження місцевості фону.

Крім порогових методів до даного класу відносяться методи розбиття і злиття областей і методи вирощування областей. Методи злиття і поділу областей засновані на первинному розбитті зображення на безліч малих непересічних областей і здійсненні подальшого їх злиття і поділу. Методи вирощування областей складаються в угрупованні елементів зображення в більші області, починаючи з певних центрів кластеризації.

Кластеризація в просторі ознак полягає у виборі відображення набору вхідних даних у деякий багатовимірний простір ознак і подальшому рішенні класичної задачі кластеризації – розбитті обраного простору на класи, базуючись на щільності розподілу в ньому. Існують методи, засновані на знаходженні максимальної правдоподібності, на основі обчислення гістограм і опорних векторів, на основі представлення зображення у вигляді графа, широко використовується кластеризація за кольором та інші методи. Методи кластеризації особливо зручні, коли заздалегідь відомо кількість класів об'єктів, що містяться в зображенні. Також, як правило, передбачається, що виявлені в просторі ознак кластери відображають зв'язкові області. Класична процедура кластеризації може дати невірні результати, якщо відображення

різних областей вихідного зображення в просторі ознак помітно перекриваються. Для подолання даної проблеми пропонується розширення простору ознак, наприклад, шляхом додавання значень координат зображення. Крім того, для коректної роботи алгоритму необхідне попереднє завдання кількості кластерів. У разі завдання сегментації зображення, що спостерігається БПЛА, кількість кластерів заздалегідь невідомо, що ускладнює використання даного методу сегментації.

Як при порівнянні зображень методом кореляційного аналізу, так і при зіставленні їх характерних рис зазвичай в мобільних системах потрібно рішення задачі виділення об'єктів переднього плану на постійно нерухомому тлі. У випадку інформаційно-вимірвальних систем БПЛА відбувається постійна зміна як об'єктів, так і фону, тому в цьому випадку говорять про виділення інформативних ділянок на зображенні. Розгляд меншої кількості інформативних ділянок при виявленні і розпізнаванні об'єктів зменшує вимоги до продуктивності областей інформаційно-вимірвальної системи БПЛА. З іншого боку, у процесі відсіювання неінформативних ділянок можуть бути виключені з розгляду області, що містять об'єкти. Таким чином, виникає задача застосування методів визначення ступеня інформативності ділянок зображення і відбору найбільш інформативних ділянок для подальшого розгляду. Однак, таке завдання не отримало до теперішнього часу остаточного рішення.

Математична постановка задачі полягає в наступному. Нехай необхідно знайти відповідність деякої точки (x_0, y_0) поточного зображення з еталонним. Позначимо $f(x, y)$ як вихідне еталонне зображення. Розглянемо лише певну частину цього зображення з центром в (x_0, y_0) і розміром $(2N + 1) \times (2N + 1)$ пікселів. Введемо функцію інформативності даного фрагмента $I(x_0, y_0, N)$.

Необхідно визначити:

- 1) чи є даний фрагмент інформативним;
- 2) якщо фрагмент не є інформативним, то чи можна змінити його розміри так, щоб він став інформативним.

Відповісти на ці питання можна за допомогою простого критерію, заснованого на порівнянні функції інформативності I з числовим порогом T . Якщо $I < T$, то фрагмент вважається неінформативним. У цьому випадку розмір фрагмента збільшується на деяку константу n до тих пір, поки або не виконається зворотна умова, або розмір фрагмента не досягне деякого максимального значення N_{\max} .

Існує кілька методів вирішення даної задачі.

1. Обчислення дисперсії сигналу. Чим більше неоднорідним є сигнал яскравості області, тим більше інформативною є ця область.

2. Відношення сигнал/шум. Використання відносин сигнал/шум для визначення інформативності області зображення полягає в припущенні, що чим більше однорідна область, тим менше коливань сигналу і, відповідно, менше коливань шумів.

3. Радіус кореляції сигналу. Радіус кореляції сигналу показує, на якій відстані відліки сигналу можна вважати статистично незалежними. Чим більш однорідною є область зображення, тим більше для неї радіус кореляції.

4. Аналіз наявності сигналу на фрагменті зображення. Метод заснований на аналізі оптичного клина, який розбивається на області. Для кожної області обчислюється функція середньої яскравості і середнє відхилення. Потім здійснюється отримання функції залежності середньоквадратичного відхилення шуму від яскравості. На підставі аналізу цієї функції робиться висновок про наявність сигналу на зображенні.

Розглянуті підходи мають істотний недолік: необхідно ітеративно змінювати (збільшувати) розміри аналізованого вікна для кожної точки зображення.

У цьому випадку найбільш ефективним є використання кратномасштабного представлення зображень, або піраміди зображень. Піраміда зображень являє собою послідовність зображень таку, що кожне наступне зображення виходить із попереднього шляхом фільтрації і проріджування в два рази. Послідовність дій полягає в наступному.

1. Є вихідне зображення.
2. Здійснюється височастотна фільтрація зображення з ядром.
3. Зображення зменшується в два рази.

У даний час найбільш часто для побудови піраміди зображень в якості ядра використовується функція Гаусса

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2}. \quad (6)$$

На даний час найбільш перспективною та актуальною науковою задачею є розроблення методу виявлення і розпізнавання зображень СТЗ в інформаційно-вимірювальних системах БПЛА на основі використання просторово-спектральних портретів об'єктів місцевості, за допомогою яких навігаційна система БПЛА орієнтується шляхом попередньо завантажених бібліотек орієнтирів на місцевості. У випадку використання малої кількості орієнтирів (опорних точок) їх можна сфальсифікувати чи знищити. З метою підвищення ефективності навігаційної системи БПЛА при використанні великої кількості об'єктів з урахуванням не тільки їх геометрії а і спектрального портрету їх фальсифікація принципово ускладнюється. З цієї причини просторово-спектральна навігація є одним з пріоритетних напрямів щодо удосконалення методів аналізу зображень в системах технічного зору БПЛА з метою підвищення ефективності застосування навігаційної системи в умовах РЕБ. При використанні найбільш розповсюджених та дешевих спектральних сенсорів оптичного діапазону СТЗ відеокадри просторово-спектральних портретів об'єктів на ділянках місцевості порівнюються із закладеними спектральними портретами ділянок маршруту, у разі їх «впізнання» визначаються точні координати та орієнтація БПЛА. Застосування цього методу пов'язане з необхідністю врахування впливу змін освітлення на спектральні показники об'єктів та ділянок місцевості. Виходячи з цих міркувань, виникає необхідність у розробці методологічного підходу щодо корекції по освітленню для визначення спектральних портретів об'єктів в оптичному діапазоні. Для оцінки ефективності запропонованої СТЗ дослідження проводились в лабораторних умовах та безпосередньо на дослідному польовому стаціонарі. В лабораторних умовах поряд із розробленими під БПЛА (FC200) цифровими фотоапаратами досліджувались і смартфони (Apple iPhone 5s та Lenovo s660). Вибір смартфонів для досліджень пояснюється тим, що є можливість використання саме такого обладнання в якості модуля керування при зборці БПЛА навіть в побутових умовах.

Дослідження щодо встановлення залежності інтенсивності складових кольору від величини Light Value здійснювалися на прикладі шаблону сірого кольору (насиченість 69%), надрукованому на лазерному принтері на офісному папері білого кольору та зразків пшениці (для ділянки пшеничного поля), розміщених на шаблоні (рис. 1).



Рисунок 1 – Зразок оптичного шаблону із зразком пшениці (для ділянки пшеничного поля)

В процесі проведення досліджень використовувались наступні параметри налагодження фотоапарату: «баланс білого» – ясна погода. Змінення величини Light Value враховувалась шляхом корекції експозиції в діапазоні $ev = -2.0 \dots 2.0$. Обробка результатів здійснювалась за допомогою програмного середовища та методики, представлених в роботі V.Lysenko та інші (2016) в [12]. Отримані результати наведені на рис. 2.

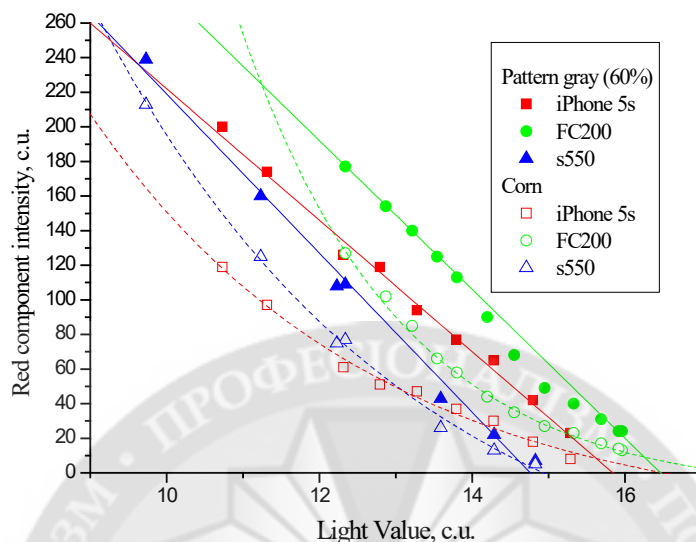


Рисунок 2 – Залежність інтенсивності червоної складової кольору від величини Light Value для різних моделей цифрових фотоапаратів

При обробці експериментальних даних було встановлено, що характер залежності для фотоапаратів є неоднаковим. Для зразку сірого кольору при апроксимації у виді лінійної залежності коефіцієнт детермінації (R^2) для фотоапаратів iPhone 5s, FC200 та s660 становив 0.957, 0.931 та 0,989 відповідно, для експоненціальної залежності 0,989, 0.996 та 0.996 відповідно [9]. Для кукурудзяного поля по аналогії при лінійній залежності R^2 становив 0.993, 0.989 та 0.989 відповідно, та для експоненціальної 0.992, 0.991 та 0.986 відповідно [10].

Виходячи з отриманих даних можна засвідчити, що характер залежності в певній мірі визначається об'єктом моніторингу. Для штучного шаблону він більш точно описується нелінійною залежністю, проте, такі рівняння більш складні ніж лінійні для проведення калібрування при різному освітленні за запропонованою в роботах [11, 12] методикою V.Lysenko та інші (2017, 2016). Встановлено, що характер показаної вище залежності буде індивідуальним для кожної моделі камери, що необхідно враховувати при їх використанні для просторово-спектральної навігації. Було зроблено припущення, що більш точно корекцію щодо змін освітлення для практичних потреб можна зробити, отримавши експериментальну залежність для об'єктів в польових умовах.

Експериментальні **дослідження в польових умовах** було здійснено на дослідному стаціонарі кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва, де були розглянуті пшеничне поле з ділянками з різним станом мінерального живлення, а також ґрунтова дорога (рис. 3). Перед дослідженнями впродовж 3-х днів опадів на ділянці не було і дорога перебувала в повітряно-сухому стані.

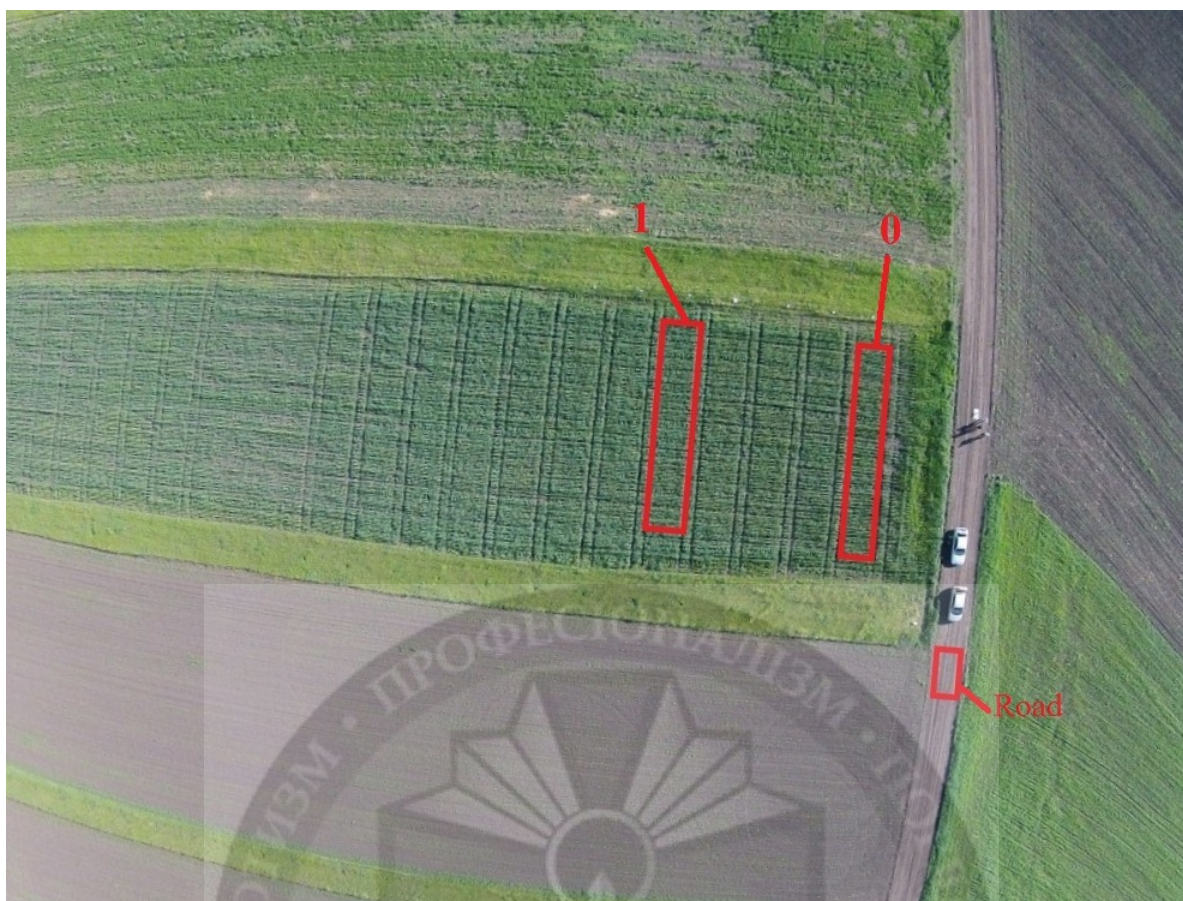


Рисунок 3 – Дослідний стаціонар кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва НУБіП України від 17.05.23, висота польоту БПЛА 100 метрів

Досліди проводились 17.05.23 з 15 до 21 години і було розглянуто діапазон освітлення від 41500 до 500 люкс. При вимірах люксметр було розміщено таким чином, щоб він лежав на горизонтальній поверхні без випадкової тіні, не обумовленої хмарами. При наявності хмар під час зйомки візуально оцінювалась рівномірність освітлення всіх об'єктів в кадрі, нерівномірне освітлення не допускалося. В якості об'єктів досліджень обирались: ґрунтова дорога (road) та 2 ділянки з посівів пшениці озимої в стадії вегетації колосіння (0 – фон, 1 – штучно внесена нормована доза мінеральних добрив).

Отримані результати по залежності інтенсивності складових кольору об'єктів від величини Light Value представлені на рис. 4.

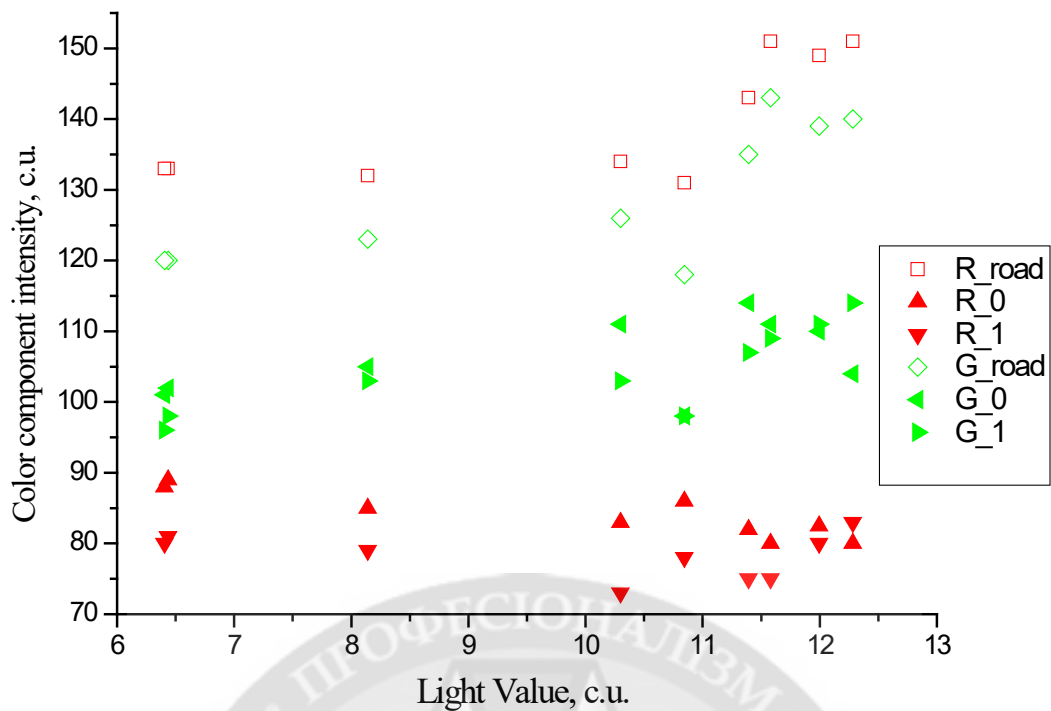


Рисунок 4 – Залежність червоної та зеленої складових кольору ґрунтової дороги та ділянок посівів пшениці озимої від величини Light Value де: road – ґрунтова дорога, 0 – без штучного внесення добрив, 1 – нормована доза

Результати досліджень показали, що на початку фази колосіння, за хмарності чи вечірнього освітлення (Light Value в діапазоні 6-11), при зйомці без корекції експозиції ($ev=0$) залежність інтенсивності складових кольору від рівня мінерального живлення (вмісту азоту) рослин виражена максимально.

При використанні способу калібрування із додатковим зенітним сенсором, який було представлено люксметром, не лінійність залежності також спостерігалась. Так, різниця в мінеральному живленні має найбільший вплив на інтенсивність складових кольору в діапазоні освітленості 1000-20000 люксів (рис. 5).

Як показують результати експериментальних досліджень для розглянутих об'єктів найменший вплив освітлення було зафіксовано для ділянки пшеничного поля без штучного внесення добрив, а максимальний – для ґрунтової дороги. Таким чином, при побудові системи навігації на базі просторово-спектральних портретів необхідно орієнтуватися на об'єкти із стабільними характеристиками.

При виявленні і розпізнаванні об'єктів на фоні місцевості представляють інтерес лише ті точки зображення, які не належать до фонових змін яскравості. Оскільки фон за визначенням є відносно однорідним (без яскраво виражених перепадів), детальні зміни щодо яскравості фону виявляються тільки на невеликих масштабах розкладання [9].

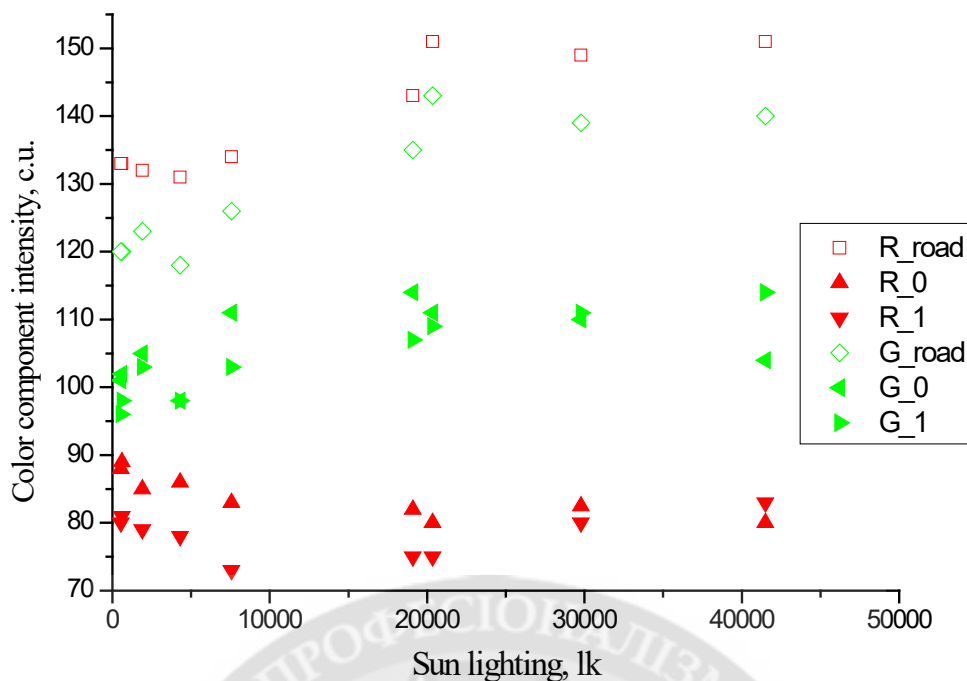


Рисунок 5 – Залежність інтенсивності складових кольору об'єктів від величини сонячного освітлення

Отже, необхідне уточнення значущості кожної точки для більших масштабів розкладання. У запропонованій модифікації алгоритму відсікання незначущих точок відбувається тільки на останній стадії після зважування всіх точок зображення на всіх аналізованих масштабах.

Висновки

1. Для прийняття рішення при виконанні більшості основних цільових завдань навігаційна система БПЛА здійснює виявлення і розпізнавання об'єктів на зображеннях, що надходять від бортового оптико-електронного модуля БПЛА. Від швидкості отримання і точності цих даних безпосередньо залежить правильність прийнятого рішення, тому підвищення точності і зменшення часу завдань виявлення і розпізнавання об'єктів за допомогою системи технічного зору БПЛА є актуальним завданням.

2. Існуючі в даний час автоматизовані системи технічного зору БПЛА використовують для аналізу зображень людину-оператора, який знаходиться на наземному пункті управління, що за рахунок втрати на передачу даних (а іноді і повної відсутності можливості передачі) істотно знижує час аналізу зображення і, як наслідок, час прийняття рішення. Альтернативним напрямком розвитку інформаційно-вимірювальних систем БПЛА є автоматичні системи виявлення та розпізнавання об'єктів на зображеннях бортового оптико-електронного модуля.

3. Наявні автоматичні інформаційно-вимірювальні системи виявлення та розпізнавання об'єктів на зображеннях в системах технічного зору БПЛА не володіють достатньою точністю і швидкістю обробки інформації для того, щоб повністю замінити людину-оператора і виробляти всі обчислення на борту БПЛА. Підвищення точності і швидкості обробки інформації в автоматичних інформаційно-вимірювальних системах виявлення і розпізнавання об'єктів на зображеннях бортового оптико-електронного модуля БПЛА є напрямком постійних досліджень.

4. Точність і швидкість виявлення об'єктів в навігаційних системах БПЛА може бути підвищена за рахунок розробки нових алгоритмів виявлення і розпізнавання об'єктів на зображеннях бортового оптико-електронного модуля БПЛА з використанням просторово-спектральних портретів місцевості. При виявленні і розпізнаванні об'єктів на фоні місцевості представляють інтерес лише ті точки зображення, які не належать до фонових змін яскравості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Tianmiao Wang, Chaolei Wang, Jianhong Liang, Yang Chen¹ and Yicheng Zhang (2013) Vision-Aided Inertial Navigation for Small Unmanned Aerial Vehicles in GPS-Denied Environments. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. *Int J Adv Robotic Sy*, 2013, Vol. 10, 276: pp. 1-12.
2. Guoquan (Paul) Huang (2019). Visual-Inertial Navigation: A Concise Review. A Preprint - June 7, 2019, pp. 1-16.
3. E. Mueggler, G. Gallego, H. Rebecq, and D. Scaramuzza, (2018) “Continuous-time visual-inertial odometry for event cameras,” *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1–16.
4. Kotvitsky R.S., Saryboga G.V. (2016) System of technical vision in problems of stabilization of a pilotless vehicle. «*Young Scientist*», № 5 (32), pp. 234-238.
5. Автоматизована система управління процесами збирання та переробки енергетичних культур у біогаз: Монографія / [Лисенко В.П., Шворов С.А., Комарчук Д.С., Лукін В.Є., Книжка Т.С., Чирченко Д.В.] – К.: Видавництво “Науковий світ”, 2017. – 244 с.
6. Ángel Manuel Guerrero-Higuera (2018) Detection of Cyber-attacks to indoor real time localization systems for autonomous robots // Ángel Manuel Guerrero-Higuera, Noemí DeCastro-García, Vicente Matellán. *Robotics and Autonomous Systems* Vol.99, pp. 75-83.
7. Tao L, Matuszewski B.J. Robust deformable shape reconstruction from monocular video with manifold forests. *Machine Vision and Applications*. 2016. vol. 27. Issue 6. pp. 801–819. 20.
8. Pu Y.-R., Chen Y.-J., Lee S.-H. Fire recognition based on correlation of segmentations by image processing techniques. *Machine Vision and Applications*. November 2015. vol. 26. Issue 7. pp. 849–856.
9. Shvorov S. A., Komarchuk D. S., Pasichnyk N. A., Opryshko O. A., Gunchenko Y. A. and Kuznichenko S. D. (2018) IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), "UAV Navigation and Management System Based on the Spectral Portrait of Terrain," 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 2018, pp. 68-71, doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576304.).
10. V.Lysenko, (2016) Drones camera calibration for the leaf research // V.Lysenko, O.Opryshko, D. Komarchyk, N. Pasichnyk. *Scientific Journal NUBiP*, Vol. 252, pp. 61-65.
11. Vitalii Lysenko (2017) Usage of Flying Robots for Monitoring Nitrogen in Wheat Crops / Vitalii Lysenko, Oleksiy Opryshko, Dmytro Komarchuk, Nadiia Pasichnyk, Nataliia Zaets, Alla Dudnyk // *The 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania. Vol.1. pp. 30-34.
12. Lysenko V., Opryshko A., Komarchuk D. & Pasichnyk N. (2016). The use of UAVs for remote sensing of crops during harvest programming *Scientific Journal NUBiP Ukraine*, 256, 146-150.

REFERENCES:

1. Tianmiao Wang, Chaolei Wang, Jianhong Liang, Yang Chen¹ and Yicheng Zhang (2013) Vision-Aided Inertial Navigation for Small Unmanned Aerial Vehicles in GPS-Denied Environments. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. *Int J Adv Robotic Sy*, 2013, Vol. 10, 276:2013, pp. 1-12.
2. Guoquan (Paul) Huang (2019). Visual-Inertial Navigation: A Concise Review. A Preprint - June 7, 2019, pp. 1-16.
3. E. Mueggler, G. Gallego, H. Rebecq, and D. Scaramuzza, (2018) “Continuous-time visual-inertial odometry for event cameras,” *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1–16.
4. Kotvitsky R.S., Saryboga G.V. (2016) System of technical vision in problems of stabilization of a pilotless vehicle. «*Young Scientist*», № 5 (32), pp. 234-238.

5. Automated management system for harvesting and processing energy crops into biogas: Monograph / [V.P. Lysenko, S.A. Shvorov, D.S. Komarchuk, V.E. Lukin, T.S. Knyzhka, D.V. Chirchenko.] – K.: Naukovyi svit Publishing House, 2017. – 244 p.
6. Ángel Manuel Guerrero-Higueras (2018) Detection of Cyber-attacks to indoor real time localization systems for autonomous robots // Ángel Manuel Guerrero-Higueras, Noemí DeCastro-García, Vicente Matellán. Robotics and Autonomous Systems Vol.99, pp. 75-83.
7. Tao L, Matuszewski B.J. Robust deformable shape reconstruction from monocular video with manifold forests. Machine Vision and Applications. 2016. vol. 27. Issue 6. pp. 801–819. 20.
8. Pu Y.-R., Chen Y.-J., Lee S.-H. Fire recognition based on correlation of segmentations by image processing techniques. Machine Vision and Applications. November 2015. vol. 26. Issue 7. pp. 849–856.
9. Shvorov S. A., Komarchuk D. S., Pasichnyk N. A., Opryshko O. A., Gunchenko Y. A. and Kuznichenko S. D. (2018) IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), "UAV Navigation and Management System Based on the Spectral Portrait of Terrain," 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 2018, pp. 68-71, doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576304.).
10. V.Lysenko, (2016) Drones camera calibration for the leaf research // V.Lysenko, O.Opryshko, D. Komarchuk, N. Pasichnyk. Scientific Journal NUBiP, Vol. 252, pp. 61-65, 2016.
11. Vitalii Lysenko (2017) Usage of Flying Robots for Monitoring Nitrogen in Wheat Crops / Vitalii Lysenko, Oleksiy Opryshko, Dmytro Komarchuk, Nadiia Pasichnyk, Nataliia Zaets, Alla Dudnyk // The 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania. Vol.1. pp. 30-34.
12. Lysenko V., Opryshko A., Komarchuk D. & Pasichnyk N. (2016). The use of UAVs for remote sensing of crops during harvest programming Scientific Journal NUBiP Ukraine, 256, 146-150.

Ph.D. Pasichnyk N.A., Ph.D. **Опришко О.О.**, D.Sci.Tech., prof. Shvorov S.A.
D.Sci.Tech., prof. Vasilenko V.V., Teplyuk V.M., Glugan F.V.

The paper analyzes modern methods of terrain image analysis in UAV navigation systems and presents experimental results of UAV navigation method research based on the use of spatial-spectral portraits of objects in terrain areas. In the conditions of radio-electronic suppression of the UAV navigation system by EW means, there is an urgent need for the development and application of new jam-proof UAV navigation methods. The purpose of the work is to substantiate the method of terrain image analysis in UAV technical vision systems. To achieve this goal, the following tasks were announced in the work: an analysis of the possible use of existing methods and systems of technical vision on UAVs was carried out; the substantiation of the method of image analysis using spatial-spectral terrain portraits in UAV technical vision systems was carried out.

The method of calculating the traveled path based on the analysis of the flow of video data coming from the optoelectronic surveillance devices, the method of accurate mapping on the terrain based on the stereo effect that occurs during camera movement, and the method of accurate mapping based on reference photographs are analyzed. In order to improve the efficiency of the UAV technical vision system, it is proposed to use spatial-spectral portraits of objects in areas of the terrain. At the same time, the video frames are compared with embedded spectral portraits of the route sections, in the case of "recognition", the exact coordinates and orientation of the UAV are determined. The application of this method is connected with the need to take into account the impact of lighting changes on the spectral indicators of objects and areas of the terrain. The research examines existing techniques for correcting lighting changes for various cameras in laboratory and field conditions. It is proposed to use experimentally obtained dependencies for specific brands of sensor equipment to carry out corrections for changes in natural lighting. When organizing navigation systems based on spectral portraits of the terrain, it is recommended to use objects and areas with the most stable optical characteristics in relation to changes in lighting.

Keywords: UAVs, navigation systems, technical vision, image analysis, portraits, objects.