

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Радіотехнічний факультет**

**Кафедра радіотехнічних пристроїв та систем**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні інформаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЖУК

«2» вересня 2020р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту  
Литвинець Олександрі Леонідівні**

1. Тема дисертації «Алгоритм кореляційно-екстремального стеження за безпілотним літальним апаратом за даними відеоспостереження», науковий керівник дисертації Жук Сергій Якович, д.т.н., проф.,

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2020 р.  
№ 3223-с

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: процес стеження за малорозмірними БПЛА системою відеоспостереження

4. Вихідні дані тактико-технічні характеристики та зображення типових малорозмірних БПЛА, характеристики оптичних систем відеоспостереження

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналіз сучасних телевізійних систем відеоспостереження; виконати аналіз кореляційно-екстремальних методів зіставлення зображень; розглянути можливості застосування метода калманівської фільтрації для стеження за точковими цілями; розробити алгоритм кореляційно-екстремального стеження за

малорозмірним БПЛА на основі методу калманівської фільтрації; оцінити ефективність розробленого алгоритму за допомогою статичного моделювання на ЕОМ; розглянути можливості практичної реалізації розробленого алгоритму.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 60 ілюстрацій, презентація 17 слайдів

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_

8. Дата видачі завдання 2 вересня 2020р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз існуючого матеріалу	9.09.2020	
2.	Аналіз актуальності обраної теми	12.09.2020	
3.	Дослідження застосування систем відеоспостереження	25.09.2020	
4.	Аналіз кореляційно-екстремальних методів зіставлення зображень	29.09.2020	
5.	Дослідження та застосування методів калманівської фільтрації	11.10.2020	
6.	Розробка алгоритму КЕС супроводження малорозмірного БПЛА на основі метода калманівської фільтрації	25.10.2020	
7.	Аналіз розробленого методу за допомогою статичного моделювання	30.10.2020	
8.	Аналіз точності позиціонування БПЛА	10.11.2020	
9.	Аналіз ефективності алгоритму	22.11.2020	
10.	Аналіз можливостей реалізації розробленого алгоритму	01.12.2020	
11.	Розробка стартап проекту	10.12.2020	

Студент

Олександра ЛИТВИНЕЦЬ

Науковий керівник

Сергій ЖУК

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет**

**Кафедра радіотехнічних пристроїв та систем**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Сергій ЖУК  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою**

**«Радіотехнічні інформаційні технології»**

**зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему: «Алгоритм кореляційно-екстремального стеження за  
безпілотним літальним апаратом за даними відеоспостереження »**


Виконала:  
студентка II курсу, групи РТ-91мп  
Литвінець Олександра Леонідівна




Керівник:  
Ст.викладач, д.т.н.  
Жук Сергій Якович



Рецензент:  
Проф., д.т.н. кафедри ТОР  
Шарпан Олег Борисович



Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.  
Студент (-ка) 

Київ – 2020 року

## АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на тему «Алгоритм кореляційно-екстремального стеження за безпілотним літальним апаратом за даними відеоспостережень» складається з 8 розділів, 83 сторінки, 1 додатку, 60 ілюстрацій по тексту роботи та 20 таблиць. Використано 11 посилань.

На сьогоднішній день прогресивний розвиток пілотної та безпілотної авіації, систем управління повітряними та наземними об'єктами пересування, створює необхідність у розробці технологій, що виявляють та супроводжують об'єкти у просторі. Найбільш широкі застосування вони віднайшли у задачах навігації, космічного моніторингу Землі, забезпечення безпеки, бортових систем, що встановлюються у літаках, гелікоптерах та автомобілях, та охоронних послуг.

Необхідність у використанні методів виявлення та супроводження зростає у зв'язку з розширенням області застосування БПЛА, що можуть бути об'єктами-правопорушниками. Підвищення ефективності оптико-електронних систем необхідно для задач охорони та захисту закритих територій від несакціонованого проникнення, забезпечення їх приватності від безпілотних літаючих апаратів.

Сучасні БПЛА можуть мати не тільки маленькі розміри та високу автономність, але і надзвичайно високу маневреність. Як наслідок, постійно підвищується вимоги комплексів, що обробляють поставлені цілі, а тому це приводить до поліпшення вже існуючих технологій та розробки нових методів і алгоритмів для вирішення поставлених задач.

В роботі розглянута розробка та аналіз алгоритм кореляційно-екстремального стеження за безпілотним літальним апаратом за даними відеоспостережень.

**Метою дослідження** є покращення характеристик стеження за малорозмірними БПЛА системою відеоспостереження, шляхом розробки кореляційно-екстремального алгоритма стеження.

**Об'єкт дослідження** – процес стеження за малорозмірними БПЛА системою відеоспостереження.

**Предмет дослідження** – методи стеження за малорозмірними БПЛА за даними відеоспостережень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних телевізійних систем відеоспостереження;
- виконати аналіз кореляційно-екстремальних методів зіставлення зображень;
- розглянути можливості застосування метода калманівської фільтрації для стеження за точковими цілями;
- розробити алгоритм кореляційно-екстремального стеження за малорозмірним БПЛА на основі методу калманівської фільтрації;
- оцінити ефективність розробленого алгоритму за допомогою статичного моделювання на ЕОМ;
- розглянути можливості практичної реалізації розробленого алгоритму.

**Ключові слова:** безпілотні літальні об'єкти, кореляційно-екстремальні системи, фільтр Калмана, зіставлення зображень, взаємно кореляційна функція.

## ANNOTATION

The topic of master thesis is “Algorithms for correlation-extreme tracking of an unmanned aerial vehicle based on video data”. The research work consists of 8 paragraphs, 83 pages, 60 illustrations and 20 tables. In total, 11 references links were used.

Nowadays, the progressive development of pilot and unmanned aerial vehicles, air and ground control systems, creates a need to develop technologies that detect and watch/tracks objects. They are most widely used in navigation, space monitoring, security, on-board systems installed in aircraft, helicopters and cars, and security services.

The need for detection and tracking methods is growing due to the expansion of the scope of UAVs using and as a result the exceeding of the limits which are allowed. Improving the efficiency of optoelectronic systems is necessary for the tasks of protection and defense of closed areas from unauthorized intrusion, ensuring their privacy from unmanned aerial vehicles.

Modern UAVs can have not only small size and high autonomy but also extremely high maneuverability. As a result, the requirements of systems that process the set goals are constantly increasing, and therefore it leads to the improvement of existing technologies and the development of new methods and algorithms for solving these aims.

The research work considers the development and analysis of an algorithm for correlation-extreme tracking of an unmanned aerial vehicle based on video data.

**The aim** of the work is to improve the characteristics of tracking UAVs by video system surveillance, by developing a correlation-extreme tracking algorithm.

**The research object** is the process of monitoring UAVs by the video surveillance system.

**The research subject** is the methods of tracking UAVs by the video surveillance system.

To achieve these goals have been resolved following tasks:

- to analyze modern television video surveillance systems;
- to analyze correlation-extreme methods of image comparison;
- to consider the possibility of applying the method of Kalman filtering for UAVs tracking;
- to develop an algorithm for correlation-extreme tracking of an unmanned aerial vehicle based on video data;
- to evaluate the effectiveness of the developed algorithm using static simulation on a computer;
- to consider the possibilities of practical implementation of the developed algorithm.

**Key words:** unmanned aerial vehicles, correlation-extreme systems, Kalman filter, image mapping, cross-correlation function.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	2
ВСТУП.....	3
1. АКТУАЛЬНІСТЬ РОЗРОБКИ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА СТЕЖЕННЯ ЗА МАЛОРОЗМІРНИМИ БПЛА .....	5
2. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА БПЛА.....	15
3. АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ МЕТОДІВ ЗІСТАВЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ. ....	22
4. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДА КАЛМАНІВСЬКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ СТЕЖЕННЯ ЗА ТОЧКОВИМИ ЦІЛЯМИ .....	28
5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОГО СТЕЖЕННЯ ЗА МАЛОРОЗМІРНИМ БПЛА НА ОСНОВІ МЕТОДА КАЛМАНІВСЬКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ. ....	34
6. АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОГО АЛГОРИТМУ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ЕОМ. ....	42
6.1 Аналіз точності позиціонування БПЛА на поточному кадрі.....	43
6.2 Аналіз ефективності алгоритму стеження за БПЛА на основі фільтру Калмана.....	54
7. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНОГО АЛГОРИТМУ.....	61
7. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «АЛГОРИТМ КОРЕЛЯЦІЙНО- ЕКСТРЕМАЛЬНОГО СТЕЖЕННЯ ЗА БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ ЗА ДАНИМИ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕНЬ». ....	65
ВИСНОВКИ.....	80
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	82
ДОДАТКИ:	
Додаток А. Програма .....	



## **Перелік скорочень, умовних позначень, термінів**

БПЛА – безпілотних літальний апарат;

ГШ– гаусівський шум;

СКП – середньо квадратична помилка;

СК – система координат;

СП – сигнальний процесор.

## ВСТУП

Магістрська робота на тему «Алгоритм кореляційно-екстремального стеження за безпілотним літальним апаратом за даними відеоспостережень» складається з 8 розділів.

У сучасних умовах все більше значення починають грати безпілотні літальні апарати (БПЛА). Початково БПЛА використовувалися виключно у воєнних цілях. З кінця 200-х років популярність здобули саморобні БПЛА завдяки любителям радіокерованих літаків. Але з появою першого дрону Phantom від компанії Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co. Ltd (DJI) у 2013 році, людство усвідомило справжні змоги даних апаратів. З цього моменту, арсенал можливостей дронів значно розширився. Це: транспортування вантажів, самостійне уникнення завад, функціонування у важких погодних умовах, збільшилися дальність та час роботи, а деякі моделі можуть функціонувати навіть під водою. На сьогоднішній день, БПЛА можуть проникати у недоступні та небезпечні зони, досліджувати будь-які місця, куди не хочуть, або не можуть потрапити люди. У той самий час, знання та вміння для керування БПЛА невпинно зменшуються, оскільки дані апарати стають все більш автономними і спроможними виконувати складні комплексні задачі без втручання оператора.

Розвиток технологій побудови малорозмірних БПЛА та їх поширення призвели до появи нового класу загроз: шпіонаж, тероризм, транспортування заборонених вантажів, ускладнення повітряного руху, пошкодження майна. На сьогодні, в провідних країнах світу вирішення задачі нейтралізації загроз від використання малорозмірних БПЛА і створення відповідних систем захисту виведено на рівень національної безпеки.

Боротьба з малорозмірними БПЛА являє собою комплекс заходів по їх виявленню, розпізнаванню, супроводженню і нейтралізації. У зв'язку з малою помітністю малорозмірних БПЛА задачі їх виявлення і супроводження

значно ускладнюються. У зв'язку з чим, виявлення і супровід малорозмірних БПЛА є пріоритетним завданням при створенні систем протидії. Важливим класом систем виявлення малорозмірних БПЛА є системи відеоспостереження. Вони часто об'єднуються з радіолокаційними станціями, системами радіомоніторингу, інфрачервоними камерами при створенні комплексних систем протидії БПЛА. Перевагами оптичних систем є висока ефективність виявлення і супроводження БПЛА за умови доброї видимості на відстанях кількох сотень метрів, а також менша вартість у порівнянні з системами радіолокаційного і радіочастотного виявлення.

**Метою дослідження** є покращення характеристик стеження за малорозмірними БПЛА системою відеоспостереження, шляхом розробки кореляційно-екстремального алгоритма стеження.

**Об'єкт дослідження** – процес стеження за малорозмірними БПЛА системою відеоспостереження.

**Предмет дослідження** – методи стеження за малорозмірними БПЛА за даними відеоспостережень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних телевізійних систем відеоспостереження;
- виконати аналіз кореляційно-екстремальних методів зіставлення зображень;
- розглянути можливості застосування метода калманівської фільтрації для стеження за точковими цілями;
- розробити алгоритм кореляційно-екстремального стеження за малорозмірним БПЛА на основі методу калманівської фільтрації;
- оцінити ефективність розробленого алгоритму за допомогою статичного моделювання на ЕОМ;
- розглянути можливості практичної реалізації розробленого алгоритму.

# 1. АКТУАЛЬНІСТЬ РОЗРОБКИ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА СТЕЖЕННЯ ЗА МАЛОРОЗМІРНИМИ БПЛА

У сучасних умовах все більше значення починають грати безпілотні літальні апарати (БПЛА). БПЛА — літальний апарат без екіпажу на борту, створений для повітряної зйомки, спостереження за наземними об'єктами та інших задач в реальному часі. Початково БПЛА використовувалися виключно у воєнних цілях. З кінця 200-х років популярність здобули саморобні БПЛА завдяки любителям радіокерованих літаків, але поява першого дрону Phantom від компанії Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co. Ltd (DJI) у 2013 визначила революційні зміни у розвитку цієї технології [2].

БПЛА прийнято поділяти за такими взаємопов'язаними параметрами, як вага, час, дальність та висота польоту. Їх класифікація наведена на рис.1.1. Відповідно до наведеної класифікації БПЛА за їх основними характеристиками з урахуванням існуючих комплексів протиповітряної оборони та їх можливостей виявлення, БПЛА поділяються на дві основні групи:

1) малорозмірні безпілотні літальні апарати (МБЛА), маса яких досягає від декількох грамів до 50 кг, що відносяться до масового виробництва (відповідно використання) і низьку вразливість до існуючих засобів боротьби з повітряними цілями;

2) БПЛА, маса яких від 50 кг і вище, що мають велику вартість виробництва і вразливість на рівні з літаками до існуючих засобів боротьби з ними.

Сучасні БПЛА можуть працювати абсолютно автономно, тобто без будь-якого втручання людини, та на дистанційному управлінні. Розглянуті класи БПЛА використовують різні технології та мають різні можливості, але в

рамках даної магістерської роботи основна увага приділяється малорозмірним БПЛА, які також визначаються терміном дрон.



Рис. 1.1 - Класифікація БПЛА

Не дивлячись на первісну прерогативу використання БПЛА в цілому для вирішення військових завдань, технології малорозмірних БПЛА сьогодні знаходять все більше застосування у багатьох галузях народного господарства, а також для задоволення потреб комерційних і приватних споживачів, а саме:

- автономне спостереження та моніторинг промислових процесів і навколишнього середовища;
- автоматизований збір даних пов'язаний з мережами зв'язку;
- аварійно-рятувальні операції;
- моніторинг надзвичайних ситуацій та їх наслідків;
- пошук постраждалих і доставка вантажу;
- дистанційний контроль нафтогазопроводів, ЛЕП і теплотрас, залізних і автомобільних доріг, лісових масивів і сільськогосподарських угідь;
- патрулювання сухопутних і морських кордонів;

- геологорозвідка;
- цифрова картографія;
- виробничо-екологічний моніторинг (контроль забруднень на землі, в морі та в повітрі);
- охорона об'єктів і районів;
- виявлення замаскованих цілей і спостереження за їх діями;
- огляду місцевості та спостереження за обстановкою на ній.

На сьогоднішній день, малорозмірні БПЛА можуть проникати у недоступні та небезпечні зони, досліджувати будь-яке місце, куди не хочуть, або не можуть потрапити люди. Збільшується дальність та час їх роботи. Одночасно з цим, знання та вміння для керування БПЛА невпинно зменшуються, оскільки дані апарати стають все більш автономними, спроможними самостійно уникати завад, виконувати складні комплексні задачі без втручання оператора, а також функціонувати у важких погодних умовах.

Оцінки ринку БПЛА, зроблені міжнародною консалтинговою компанією J'son & Partners Consulting, наведені на рис.1.2.

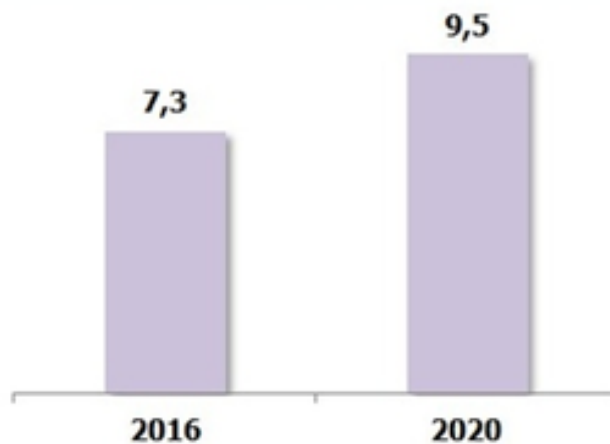


Рис.1.2. – Оцінка динаміки світового ринку БПЛА

У вартісному вираженні, дрони цивільного призначення складають вже трохи менше половини ринку (47%), з них на комерційні БПЛА доводиться половина із загальної суми (24%), решта - на споживчі (23%). Проте, за

оцінками J'son & Partners Consulting, світовий ринок БПЛА буде рости набагато швидшими темпами в кількості, ніж у вартості. А його основним драйвером залишаються споживчі малорозмірні БПЛА.

Компанія VI Intelligence прогнозує, що в 2021 році рівень продажів БПЛА перевищить \$12 мільярдів [1].

За даними IC Insights, з урахуванням всіх потенційних сфер використання світовий обсяг продажів малорозмірних БПЛА в 2025 році може перевищити 10 млрд доларів.

Розвиток технологій побудови малорозмірних БПЛА та їх поширення призвели до появи нового класу загроз рис.1.3..



Рис.1.3. Загрози внаслідок поширення МБПЛА

Малорозмірні БПЛА можуть нести вибухові речовини, біологічну або хімічну зброю для вчинення терористичних актів. Пристрої також можна використовувати для шпигунства, транспортування контрабанди, наркотиків,

глушіння GPS-сигналів або Wi-Fi, що призведе до переривання зв'язку і передачі даних.

Також гостро стоїть питання про відстеження БПЛА і контролем за дозволеною для них діяльністю.

На сьогодні, в провідних країнах світу вирішення задачі нейтралізації загроз від використання малорозмірних БПЛА і створення відповідних систем захисту виведено на рівень національної безпеки.

Протидронові системи і спеціалізоване озброєння, призначене для знищення безпілотників, стрімко наповнює світовий ринок. Згідно зі звітом дослідників з Центру вивчення безпілотників при Бард-коледжі, США, на кінець 2019 року існує близько 537 антидронових систем - в 2019 році асортимент розширився на кілька сотень моделей. Приблизно 350 систем призначені для перехоплення і виведення БПЛА з ладу. Інші комплекси здатні лише виявити небажаний дрон. Придушення радіосигналу залишається найбільш популярним методом антидроновий боротьби, інші підходи використовують лазери, сітки і навіть "дрони-тарани". Однак, на сьогодні говорити про уніфіковану систему, що здатна захистити об'єкт від будь-яких дронів не доводиться.

Про актуальність даного напрямку свідчить новий проект Aerial Dragnet (Повітряний невід), запущений DARPA, який ставить собі за мету створення можливості відображення всієї активності малих дронів в міському середовищі. В результаті досліджень буде розроблена система, яка буде відображати стан всіх літаючих БПЛА, поєднуючи дані, одержані в режимі реального часу, з картою міста, як це зараз робиться для пілотованих літаків. Aerial Dragnet спочатку буде задіяна для захисту військових формувань, що діють в міських умовах в операціях за межами США. Однак, як це часто буває з розробками виконаними на замовлення DARPA, систему можна буде застосовувати також для захисту цивільних осіб в містах США від можливого використання безпілотників у терористичних цілях.



Холдинг Роселектроніка (ГК Ростех) представив на форумі Армія-2020 багатофункціональний мобільний комплекс «Рать» для боротьби з безпілотниками. Комплекс оснащений лазером, призначеним для знищення дронів-порушників. Комплекс створений на базі броньованого автомобіля. До складу комплексу також входять радіолокатор, комплекс автоматичного розпізнавання і придушення телекомунікаційних каналів, система спрямованого СВЧ-придушення. Всім обладнанням управляє єдина інтелектуальна система збору, обробки і відображення інформації. Дані надходять на центральний пульта управління, система обробляє дані про ціль і пропонує оператору варіанти подальших дій.



Рис. 1.4. - Багатофункціональний мобільний комплекс «Рать»

За даними Reportbuyer, світовий ринок протидронових рішень виросте до \$ 4.5 млрд до 2026 року. Середній приріст на рік в інтервалі з 2019 по 2026 рік складе 29,9%. Тренду сприяє збільшення випадків різнорідних порушень, пов'язаних з ростом доступності і поліпшенням можливостей споживчих апаратів. У найближчі роки ми станемо свідками імпровізованих громадянської "гонки озброєнь" щодо створення систем протидії дронам.

Боротьба з малорозмірними БПЛА являє собою комплекс заходів по їх виявленню, розпізнаванню, супроводженню і нейтралізації. У зв'язку з малою помітністю малорозмірних БПЛА задачі їх виявлення і супроводження

значно ускладнюються. У зв'язку з чим, виявлення і супровід малорозмірних БПЛА є пріоритетним завданням при створенні систем протидії.

Основні системи виявлення малорозмірних БПЛА наведено на рис. 1.4.



Рис. 1.4.- Системи виявлення малорозмірних БПЛА

Основними способами виявлення малорозмірних БПЛА в електромагнітному спектрі є:

- використання радіолокаційних станцій;
- використання мультисенсорних систем;
- здійснення радіочастотного виявлення (радіомоніторинг);
- використання камер оптичного і інфрачервоного діапазону ЕМ хвиль.

Найбільш ефективним рішенням є комбінування основних способів виявлення: використання радіолокаційних засобів, обладнання радіомоніторингу, інфрачервоних і оптичних відеокамер. Даний варіант є дорогим, але кожен з методів доповнює інший, і, таким чином, збільшується загальну ефективність системи.

Системами оптичного виявлення БПЛА називаються камери високої роздільної здатності, що супроводжуються спеціальним програмним забезпеченням. Такі камери автоматично фокусуються на цілях, якими є малорозмірні повітряні апарати, і у випадку її впізнання як дрону за допомогою бази даних візуальних сигнатур, записують відео приближення дрона до об'єкту, активуючи при цьому сигналізацію. Прикладом такої системи може слугувати система оптичного виявлення БПЛА Sky Patriot рис.1.5.. Таке рішення є пасивним, але одночасно можливо не тільки виявляти декілька БПЛА, а і класифікувати їх на дальності до 800 м. Для оптичного виявлення використовується фіксована камера, що має поле огляду (FoV) 30°. Ціль, що була виявлена, передається на спеціальну камеру (RTZ-камера), щоб класифікувати дрон і у подальшому для виключити хибні рішення. Дана система має спеціальний набір алгоритмів для виключення хибних спрацьовувань. Велика кількість ознак, що демаскують дронів, закладені у аналітичній бібліотеці, а переміщення фонових об'єктів (птахів, засобів пересування, людей, ін.) відфільтровується. Така система інтегрується до антидронної системи у комбінації з іншими технологіями, такими як: радіочастотними, акустичними, радіолокаційними, ін.



Рис. 5.1. - Sky Patriot

Прикладами комплексних систем можуть слугувати DroneTracker, що розроблена компанією Dedrone (Німеччина) та Kaspersky Antidrone від компанії «Лабораторія Касперського» (Росія).



Рис. 1. 6 - DroneTracker

DroneTracker (рис.1.6) є системою автоматичного виявлення безпілотних літальних апаратів, що використовує комбінації акустичних даних, аналіз даних відеопотоку, даних, отриманих із інфрачервоного сенсору, даних про наявність Wi-Fi сигналу та сигналу на типових радіочастотах для управління БПЛА у секторі, що охороняється. Така система здатна відрізнити ціль від інших повітряних об'єктів, таких як птахи. Після етапу виявлення, система здійснює відеоспостереження і аналізує діяльність об'єкту. За зробленими знімками намагається визначити модель БПЛА, а після знімки надсилаються за заданою електронною адресою. DroneTracker спостерігає за БПЛА на відстані до 490 метрів, а також може мати опції для радіоелектронної боротьби із дронами.

Інший приклад комплексних систем є Kaspersky Antidrone (рис.1.7), що надає змогу захищати територію від прольотів дронів. До складу системи входять камера, радар, лідар чи мікрофони. Такий модуль відповідає за виявлення та локалізацію об'єкту, після цього у сторону виявленого БПЛА повертається моторизована станція слідкування із двома камерами. Вона здатна розпізнавати тип об'єкту, а також модель у випадку, якщо ціль виявилася дроном. Даний пункт необхідний для того, щоб підібрати частоту радіообміну між дроном та пультом керування оператора. За допомогою

цього можна створити завади завдяки яким БПЛА втратить зв'язок із оператором і буде вимушений здійснити посадку.



Рис. 1.7 - Kaspersky Antidrone

Перевагами оптичних систем є висока ефективність виявлення і супроводження БПЛА за умови доброї видимості на відстанях кількох сотень метрів, а також менша вартість у порівнянні з системами радіолокаційного і радіочастотного виявлення. На стійкість супроводу сильно впливає зміна форми об'єкта, наприклад, внаслідок маневрів, перекриття його фоном, наявність завад. Крім того, сучасні БПЛА можуть мати не тільки маленькі розміри та високу автономність, але і надзвичайно високу маневреність. Як наслідок, постійно підвищуються вимоги до комплексів, що обробляють виявлені цілі, а тому це приводить до необхідності покращення вже існуючих технологій та розробки нових методів і алгоритмів для вирішення поставлених задач. Таким чином, розробка систем відеоспостереження за малорозмірними БПЛА є актуальним напрямом наукових досліджень.

## 2. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМ ВІДЕОПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА БПЛА

Для вирішення задачі автоматичного виявлення та супроводження БПЛА застосовуються широкопольні (панорамні) і вузькопольні системи відеоспостереження. Зазвичай такі системи використовуються сумісно, утворюючи комбіновані системи відеоспостереження. У цьому випадку за допомогою широкопольної системи відеоспостереження виконується виявлення та первинна селекція підозрілих об'єктів, вимірювання кутових координат яких передаються у вузькопольну підсистему оптико-електронного моніторингу для подальшого аналізу, розпізнавання та супроводження.

Структурна схема широкопольної системи відеоспостереження продемонстрована на рис. 2.1. Зображення з камер надходять у вигляді відеопотоку [3]. Блок виділення ключових кадрів із заданим дискретним кроком вибирає кадри з потоку. Чим менший крок, тим більш точний результат забезпечує система, але з іншого боку тим менша продуктивність.

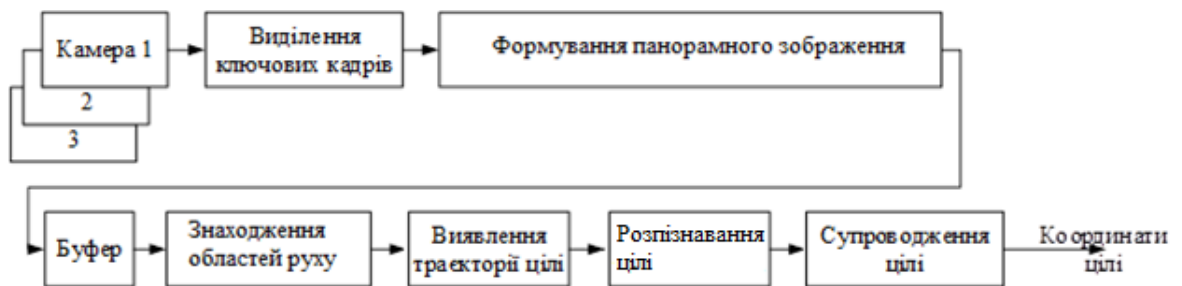


Рисунок 2.1- Структурна схема панорамної системи відеоспостереження

Обов'язковою складовою панорамної системи відеоспостереження є блок формування панорамного зображення, в якому відбувається усунення оптичних спотворень, що виникають внаслідок використання ширококутних об'єктивів. Алгоритм формування панорамного зображення здійснює

зіставлення зображень, що отримані від камер кругового огляду, у єдине панорамне зображення без швів. Алгоритм складається з декількох етапів [1]:

- усунення дисторсії на одержуваних зображеннях з камер;
- автоматична корекція яскравості і контрасту зображень;
- об'єднання виправлених зображень в єдине панорамне зображення.

Калібровка виконується один раз для даної оптичної системи, після чого одні і ті самі параметри калібровки використовуються для усунення дисторсій на кожному зображенні, що поступає з відкаліброваного фотоприймача.

Для виправлених зображень може виконуватися еквалізація їх гістограм [4], а також застосовуватися алгоритми покращення зображень у випадку необхідності, після чого з них формуються результуюче панорамне зображення.

Буфер накопичує оброблені зображення для подальшого вирішення задачі виявлення БПЛА.

Задача автоматичного виявлення об'єктів розбивається на два етапи [3]. На першому етапі вирішується задача виділення області руху. Її рішенням є сукупність областей зображення для кожного кадру, в якому відбувається рух одного або декількох об'єктів. Зазвичай, виділення областей руху відбувається шляхом визначення різниці між поточним панорамним зображенням та панорамним зображенням фонові обстановки, що може бути сформованим шляхом накопичення панорамних зображень. За результатами вирахування формується бінарне різницеве зображення, на якому нулі означають фон, а одиниці – підозрілі зони на об'єкт. Отримане різницеве бінарне зображення є вхідними даними для другого етапу алгоритму.

На другому етапі алгоритму виконується виявлення БПЛА шляхом рішення задачі виявлення траєкторії руху типових об'єктів. Для виявлення траєкторії малорозмірних цілей може бути використаний метод супроводження до виявлення (Track Before Detect) [4]. При використанні цього методу аналізується обмежена послідовність кадрів, і рішення

приймається на підставі накопиченої інформації. Як правило, обробка проводиться по кожній послідовності кадрів фіксованої кількості. Також можуть використовуватися і послідовні правила виявлення, які дозволяють зменшити час на прийняття рішення. Такий підхід дозволяє знизити навантаження на обчислювальну систему, а отже веде до зменшення необхідної кількості ресурсів.

Результатом роботи двоетапного алгоритму автоматичного виявлення об'єктів на панорамному зображенні є список об'єктів. Кожний виявлений об'єкт підлягає процедурі автоматичного розпізнавання. Для автоматичного розпізнавання найбільш широко застосовуються методи розпізнавання з використанням нейронних мереж. Результат автоматичного виявлення на розпізнавання БПЛА наведено на рис. 2.2.

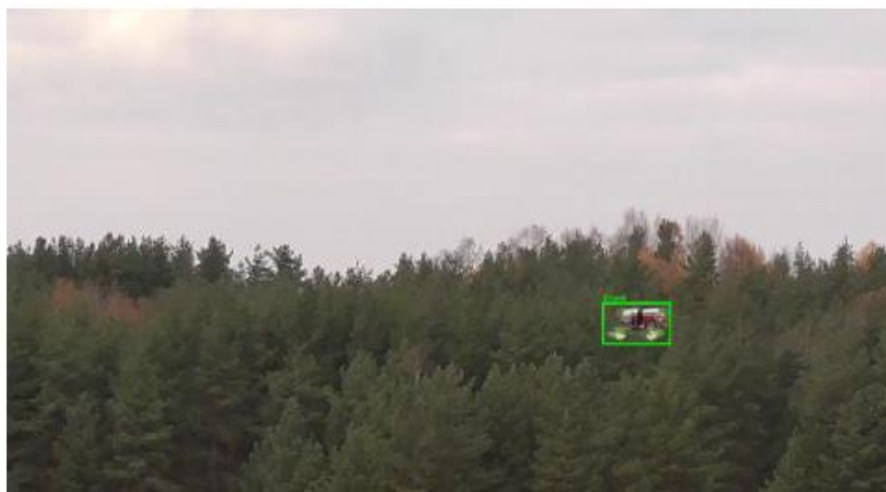


Рис. 2.2. Результат автоматичного виявлення та розпізнавання БПЛА.[2]

Серед задач в області системи технічного зору особливо виділяються задачі супроводження об'єктів. Відслідковування об'єктів може бути реалізовано двома методами: за допомогою оцінки координат об'єкта у кожному кадрі спостереження, що тим самим формує траєкторію переміщення, але не потребує переміщення самого датчика спостереження,



та за допомогою визначення координат об'єкта, що передбачає утримання об'єкту спостереження у центрі кадру, тим самим провокуючи рух самого датчика. На цьому етапі, формується два поняття [3]:

- Поняття слідкування за об'єктом – метод відслідковування траєкторії руху об'єкта без рішення задачі управління переміщення датчика зображення.

- Поняття супроводження – метод відслідковування, що передбачає організацію управління переміщенням датчика зображення.

Таким чином, в широкопольних системах відеоспостереження вирішується задача слідкування за об'єктом, а в вузькопольних – його супроводження.

До цих пір не існує єдиного підходу, що надав би високі показники якості. У результаті наукових досліджень [1, 2] було виявлено, що найкращі показники при супроводженні об'єктів демонструють методи, що засновані на кореляційному пошуку. У додаток, для рішення випадків часткового перекриття застосовується оптичний потік [3], для випадку повного перекриття – метод екстраполяції виявлення руху[1].

Вузькопольна система відеоспостереження, як правило, отримує вихідну інформацію щодо координат цілі від широкопольної системи, або іншої підсистеми комплексу протидії БПЛА. Після цього вона розгортається у вказаному напрямку і здійснює автоматичний пошук, розпізнання і захват на супроводження об'єкту у вказаних координатах.

Алгоритмічне забезпечення вузькопольних оптично-екстремальних систем складається з декількох ключових частин:

- алгоритм автоматичного виявлення об'єктів;
- алгоритм автоматичного розпізнавання об'єктів;
- алгоритм автоматичного супроводження об'єктів у ТВ-каналах.

Для автоматичного виявлення та розпізнавання об'єктів використовуються такі методи, як і широкопольних система відеоспостереження.

Для реалізації автоматичного супроводження рухомих об'єктів найбільш часто використовуються кореляційно-екстремальний алгоритм супроводження.

Структура типової кореляційної системи супроводження показана на рис.2.3. Принцип роботи цифрової телевізійної кореляційно-екстремальної системи супроводження за даними відеоспостереження заснований на зіставленні фрагменту зображення об'єкту, що спостерігається, з еталонним зображенням, яке отримано у результаті автоматичного виявлення та розпізнавання цілі.

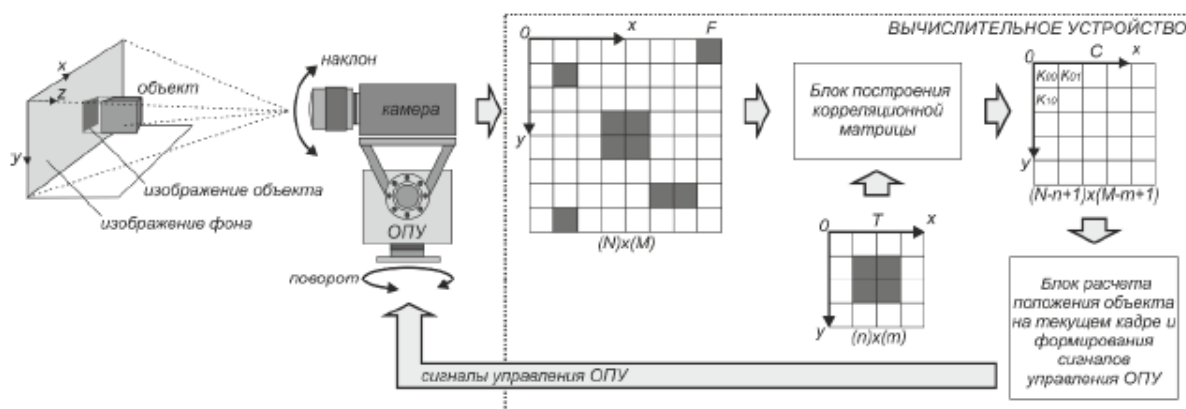


Рис. 2.3. – Структура типової кореляційної системи супроводження

При зіставленні окремого елемента зображення необхідно визначити степінь подібності. Функція подібності є тою самою мірою, за якою приймається рішення о рівні подібності зображень. Класичний алгоритм включає два етапи:

- визначення функції подібності.
- пошуку її екстремуму.

У якості функції подібності приймається взаємна кореляційна функція, що є стандартним методом визначення відповідності двох послідовностей. У кореляторі відбувається визначення взаємно-кореляційної функції. Екстремум максимум функції знаходиться у тій області, де зображення співпадають найбільше.

В процесі формування оцінки відповідності, еталонне зображення є фактично вікном, що стежить за ціллю, і пересувається в межах вихідного зображення на певну задану відстань.

Оскільки об'єкт еволюціонує у процесі супроводження (тобто змінюється у масштабі, ракурсі, повороті), необхідно періодично оновлювати еталон, що використовується, із заданим періодом або по значенню коефіцієнту кореляції. За оновленим стробом відбувається перезапис еталона для кореляційного супроводження.

Після цифроаналогового перетворювача, сигнали корелятора у кожному каналі поступають на виконавчий присрій, що представляє собою електродвигун із підсилювачем потужності, редуктором і тахогенератором.

Таким чином, задача слідкування за ціллю за кутовими координатами вирішується шляхом слідкування за частиною телевізійного зображення, у центрі якого розташовується ціль.

Основні труднощі автоматичного виявлення і супроводження системами відеоспостереження БПЛА пов'язані з різноманіттям форм об'єктів і умов спостереження. Зображення БПЛА у задачах, що пов'язані із їх виявленням та супроводженням на значних відстанях, можуть бути представлені однією або декількома точками, що говорить про малорозмірність або точечність об'єкту спостереження. У випадку, коли зображення складено із великої кількості точок, його можна назвати «протяжним», але провести грань між «малорозмірним» та «протяжним» об'єктом можливо лише умовно. У деяких задачах під час процесу спостереження, об'єкти можуть переходити з точечного у протяжний, та навпаки [3]. Крім того, сучасні БПЛА можуть мати не тільки маленькі розміри та високу автономність, але і надзвичайно високу маневреність.

Більшість методів слідкування та супроводження об'єктів ускладнюються наступними факторами [3]:

- наявність складного неоднорідного фону;

- відсутність апріорних даних про об'єкт, зокрема через їх велику варіативність;

- слабкі контрасти;
- слабе співвідношення сигнал-шум;
- швидкістю переміщення об'єкту.

Серед існуючих алгоритмів супроводження цілей кореляційний метод в умовах нерівномірного фону вважається одним із найкращих. Цей метод може забезпечувати високі результати при супроводження замаскованих об'єктів та об'єктів, що мають погану контрастність, оскільки алгоритм враховує не тільки характеристики кольору, а також форму і положення об'єкту.

Одною із головних вимог також є забезпечення реалізації алгоритмів обробки зображення у реальному часі. Можливість використання для обчислення взаємних кореляційних функцій швидких цифрових алгоритмів спектральних перетворень забезпечують можливість практичної реалізації кореляційно-екстремального алгоритму на сучасній елементній базі.

### 3. АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ МЕТОДІВ ЗІСТАВЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Порівняння поточного зображення, що отримане з датчиків відеоспостереження, з еталонним зображенням, що є отримане завчасно, є основним принципом дії кореляційно-екстремальних систем слідкування. Принцип зіставлення зображень широко застосовується для вирішення задач аналізу руху об'єктів, а також задач зіставлення зображень різних спектральних діапазонів або зроблених у різний час.

Суттєву роль у виявленні та слідкуванні за об'єктами відіграють ознаки зображення - числові характеристики, що описують певні властивості зображення. Ознаки поділяються на два типи: природні та штучні. Природними називають такі ознаки, що є встановлені внаслідок аналізу датчика. Серед них можна відмітити яскравість, а у випадку кольорового відеоспостереження їх можна поділити за інтенсивністю певної кольорової категорії: червоний, синій та зелений діапазони. Якщо ознаки виявлені внаслідок спеціальної обробки, їх називають штучними. Вони можуть бути поділені на локальні\глобальні та статичні\динамічні. Прикладами штучних ознак можуть бути середня яскравість, степінь зміни яскравості, напрям перепаду яскравості, ін.

Повне співпадіння еталона із якою-небудь частиною зображення буває рідко через дію шумів та спотворень, що викликаються просторовою дискретизацією і квантуванням яскравості, а також внаслідок відсутності апіорної інформації відносно точної форми і структури об'єкту, що необхідно виявити. Саме тому використовується функція подібності, тобто міра, за допомогою якої приймається рішення о ступені подібності зображень. Алгоритми, що використовуються для зіставлення зображень, зазвичай включають операції обрахування функції подібності зображень і операції пошуку екстремуму такої функції.

У класичному методі в якості функції подібності використовується взаємна кореляційна функція поточного і еталонного зображень з подальшим визначенням максимуму цієї функції [5]:

$$K(x_1, y_1) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} h(x, y)g(x + x_1, y + y_1), \quad (3.1)$$

де  $g(x, y)$  - еталонне зображення;  $h(x, y)$  – поточне зображення;  $K(x_1, y_1)$  – взаємна кореляційна функція.

Значення  $(\hat{x}, \hat{y})$ , при яких отримується глобальний максимум, береться в якості величин, що характеризують зміщення еталону вздовж осей координат:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \max \{K(x, y)\}. \quad (3.2)$$

Теоретичною підставою застосування кореляційного методу є його строга оптимальність для виявлення детермінованого сигналу у білому шумі із гаусівським розподілом яскравості.

До недоліків класичного алгоритму слід віднести [6]:

1. Великий об'єм обчислень, оскільки обчислювальні функції взаємної кореляції проводяться при всіх можливих відносних зрушеннях оброблюваних зображень. При цьому, якщо розміри еталону і зони пошуку рівні  $N \times M$  і  $N \times M$  відповідно, то число точок, для яких обчислюється функція взаємної кореляції рівна  $(N_f - N + 1) \cdot (M_j - M + 1)$ . Зазвичай, це число є значним.

2. Функція кореляції може мати розмитий максимум, що ускладнює його пошук.

3. Шум на зображенні може приховати максимум кореляції.

4. Якщо необхідно виявлення об'єкту, то еталонний фрагмент не повинен містити елементи фону, щоб не трапилося прив'язки до фону.

Важливі недоліки кореляційних методів виявлення проявляються при наявності спотворень яскравості та особливо геометричних спотворень

поточного зображення у порівнянні з еталонним. Зокрема, спостерігається швидке зменшення кореляційного зв'язку при так званих ракурсних спотвореннях, наприклад поворотах об'єкту. Наявність спотворень типу "warping" зазвичай уже не дозволяють використовувати кореляційні методи виявлення. У той самий час, для такого класу алгоритмів запропоновано значна кількість процедур, що дозволяють або підвищити їх працездатність, або значно прискорити процес пошуку.

Щоб зменшити похибку визначення екстремуму взаємної кореляційної функції у випадку коливання яскравості, можна використовувати нормовані функції, що мають вигляд [8]:

$$R(x_1, y_1) = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} h(x, y) \cdot g(x + x_1, y + y_1)}{\sqrt{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} h^2(x, y)} \cdot \sqrt{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} g^2(x + x_1, y + y_1)}}. \quad (3.3)$$

Значення  $(\hat{x}, \hat{y})$  визначаються за допомогою вирішального правила:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \max \{R(x, y)\}. \quad (3.4)$$

На основі розрахованого коефіцієнту кореляції  $R(\hat{x}, \hat{y})$ , також може перевірятися достовірність виявлення. Якщо виконується умова:

$$R(\hat{x}, \hat{y}) \geq R_{\min}, \quad (3.5)$$

то виявлення визнається достовірним.

Нормовані функції зменшують вплив різниці яскравості на точність визначення координат, але у цьому випадку збільшується складність та об'єм обчислень.

Можна поліпшити міру кореляції таким чином, щоб в ній враховувалися статистичні властивості зображень. Практично це зводиться до попередньої фільтрації зображень. Особливо часто застосовується декореляція елементів зображення або відбілювання, тобто обробка

зображення, при якій енергія зображення стає дорівнює одиниці. Щоб побудувати класичний відбілюючий фільтр, необхідно обчислити власні вектори і власні значення кореляційних матриць, що вимагає великих обчислювальних витрат. Обчислення можна спростити, якщо зображення моделюються роздільним марковським процесом і відсутній шум, то фільтрація зводиться до згортки зображень з маскою виявлення перепадів, а в граничному випадку - з маскою оператора Лапласа. Таким чином, якщо зображення сильно корельовані, то зображення представляються в контурному вигляді і використовується бінарна кореляція.

Часто класичний алгоритм використовується для обробки зображень не в сигнальному просторі, а в просторі перетворень Фур'є:

$$K(x, y) = F^{-1} \{ H^* (w_x, w_y) \cdot G(w_x, w_y) \}, \quad (3.6)$$

де  $F^{-1}$  - зворотнє перетворення Фур'є;  $H(w_x, w_y)$  и  $G(w_x, w_y)$  - перетворення Фур'є зображень  $h(x, y)$  и  $g(x, y)$ ;  $*$  - символ комплексного спряження.

Це дозволяє застосувати для спектральних перетворень алгоритм швидкого перетворення Фур'є, що дозволяє зменшити витрати на обрахунки.

У більш загальному випадку, виконується «взвішування» різницевої міри спектральних компонентів за допомогою функції взвішування  $q(w_x, w_y)$ :

$$K(x_1, y_1) = \sum_{w_x=0}^{N-1} \sum_{w_y=0}^{M-1} q(w_x, w_y) H^* (w_x, w_y) \cdot G(w_x, w_y) \exp \left( j \frac{2\pi}{NM} (x_1 w_x + y_1 w_y) \right). \quad (3.7)$$

Точність локалізації визначається крутизною кросс-спектральної функції поблизу екстремуму, а у граничному випадку – це дельта-функції. Щоб її отримати, функція взвішування має вигляд:

$$q(w_x, w_y) = \left| H^* (w_x, w_y) \cdot G(w_x, w_y) \right|^{-1}. \quad (3.8)$$

Виявлювач з передавальною функцією такого вигляду представляє собою фазовий фільтр, тобто фільтр, що представляє фазову частину комплексного спектру без змін, а амплітудну складову спектру нормалізує. Алгоритм фазової кореляції, у порівнянні з класичним кореляційним



алгоритмом, краще функціонує при наявності спотворень у вигляді вузькополосного шуму. Алгоритм фазової кореляції рекомендується застосовувати для обробки зображень, що отримані в різних умовах освітлення. Фазова кореляція є ще більш чутлива до геометричних спотворень.

Різницеві кореляційні алгоритми засновані на поелементному обрахунку різниці інтенсивності зображень. З точки зору затрат на обрахування, різницеві алгоритми мають перевагу перед класичним алгоритмом. Загальний вираз для різницевих алгоритмів має вигляд:

$$T(x_1, y_1) = \sum_x \sum_y |h(x, y) - g(x - x_1, y - y_1)|^p, \quad \text{где } p=0,1,2\dots \quad (3.9)$$

На практиці найчастіше використовуються наступні алгоритми:

$$M(x_1, y_1) = \sum_x \sum_y |h(x, y) - g(x - x_1, y - y_1)| \quad (3.10)$$

$$E(x_1, y_1) = \sqrt{\sum_x \sum_y [h(x, y) - g(x - x_1, y - y_1)]^2} \quad (3.11)$$

$$S(x_1, y_1) = \max_{x,y} |h(x, y) - g(x - x_1, y - y_1)| \quad (3.12)$$

Міри подібності зображень (3.8-3.11) рівні нулю при їх повному зіставленні, однак реакція цих алгоритмів на різноманітні типи помилок неоднакова. За ознаками якості, (3.9) і (3.10) алгоритми більш близькі до класичного кореляційного алгоритму.

При наявності геометричних спотворень існує оптимальний розмір еталонного зображення, що дозволяє мінімізувати ймовірність помилкової прив'язки. Оптимальний розмір еталона пропорційний ширині його автокореляційної функції і зменшується зі збільшенням геометричних спотворень. У загальному випадку, мінімізація ймовірності помилкової прив'язки проводиться за допомогою вибору не тільки розміру, але також форми і орієнтації еталонного зображення.

Зазвичай не можна передбачити з точністю до найдрібніших деталей зображення, що представляється для виявлення. Однак в будь-якому випадку існують елементи зображень, які можуть бути передбачені з великим ступенем вірогідності. Таким чином, одна з найбільш важливих проблем при розробці кореляційно-екстремальних систем і виборі алгоритму їх функціонування полягає в ідентифікації цих елементів для заданих типів зображень і датчиків.

В результаті аналізу відомої літератури встановлено, що на практиці найбільше поширення набув кореляційно-екстремальний алгоритм на основі нормованої взаємної кореляційної функції (3.2), який має низку переваг з точки зору застосування. Основна перевага - це нечутливість до відмінностей в загальній яскравості зображень. Також зручним з точки зору застосування є те, що ця функція приймає значення від -1 до 1. Значення -1 означає, що поточне і еталонне зображення знаходяться в протифазі. При цьому для її визначення використовуються алгоритми обчислень в спектральній області за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

#### 4. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДА КАЛМАНІВСЬКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ СЛІДКУВАННЯ ЗА ТОЧКОВИМИ ЦІЛЯМИ

Одним із основних алгоритмів фільтрації вважається фільтр Калмана, що використовується у GPS-приймачах, системах управління, системах автоматичного регулювання, у різноманітних датчиках, у тому числі і в пристроях виявлення та слідування за літальними апаратами. Будь-який прилад має певну погрішність в обчисленнях, оскільки на нього впливають внутрішні і зовнішні фактори.

Алгоритм обробки даних, що прибирає шум та зайву інформацію, називають фільтром. Фільтром Калмана ж називається той випадок, коли задано апріорно відому інформацію про характеристики системи, що збільшує точність обрахунків. Фільтр Калмана, що використовує динамічну модель системи, також співпадає з фільтром Вінера в умовах стаціонарної динамічної системи.

Дискретна модель руху цілі описується наступним рівнянням:

$$u(k) = F(k, k-1)u(k-1) + G(k)\omega(k), \quad (4.1)$$

де  $u(k)$  - це вектор стану, його компоненти є параметри руху цілі, моделюється як випадковий процес;  $\omega(k)$  - це білий гаусівський шум збудження моделі (має нульове математичне очікування та кореляційну матрицю);  $F(k, k-1)$  - матриця переходу системи, визначає залежні від часу параметри моделі руху, пише вільний рух динамічної системи;  $G(k)$  - відома матриця на поточному кроці, визначає залежні від часу параметри моделі руху.

Рівняння спостереження цілі описується наступним рівнянням:

$$u_{\text{И}}(k) = H(k)u(k) + v(k), \quad (4.2)$$

де  $u_{\text{И}}(k)$  - вектор спостереження, його компоненти є параметри руху цілі, формується як перетворення вектору стану  $u(k)$  та накладання шуму

вимірювання  $v(k)$ ;  $v(k)$  - вектор помилок вимірювання параметрів руху, представлений некорельованою послідовністю гаусівських векторів (має нульове математичне очікування та кореляційну матрицю);  $H(k)$  - матриця спостереження.

Метод фільтрації Калмана складається з двох повторюваних кроків, першим з яких є передбачення, а другим корегування даних рис.4.1. Під час передбачення розраховується прогноз для наступного моменту часу, а на наступному кроці отримане вимірювання корегує зроблений прогноз і змінює ефективну смугу пропускання фільтра, що збільшує точність алгоритму.

Базуючись на виразах (4.1) та (4.2), фільтр Калмана описується наступними виразами:

$$u^*(k) = F(k, k-1)\hat{u}(k-1); \quad (4.3)$$

$$\hat{u}(k) = u^*(k) + K(k)(u_{\text{И}}(k) - H(k)u^*(k)), \quad (4.4)$$

де  $u^*(k)$  - вектор прогнозу параметрів руху цілі у момент часу  $k$ ;  $\hat{u}(k)$  - вектор оцінки параметрів руху цілі у момент часу  $k$ , є сума оцінки естраполяції та корегуючої поправки  $K(k)(u_{\text{И}}(k) - H(k)u^*(k))$ .

Фільтр Каламана є динамічною системою, що має змінний матричний коефіцієнт посилення  $K(k)$ , який визначається по формулі

$$K(k) = P^*(k)H^T(k)(H(k)P^*(k)H^T(k) + R(k))^{-1}; \quad (4.5)$$

Коефіцієнт посилення залежить від двох величин: точності поточних оцінок і рівня шумів.

Кореляційна матриця  $P^*(k)$  прогнозу помилки  $\Delta u^*(k) = u^*(k) - u(k)$  описується виразом:

$$P^*(k) = F(k, k-1)\hat{P}(k-1)F^T(k, k-1) + G(k)Q(k)G^T(k) \quad (4.6)$$

де  $\hat{P}(k)$  - кореляційна матриця помилки оцінки  $\Delta\hat{u}(k) = \hat{u}(k) - u(k)$  ;  
 $Q(k)$  - кореляційна матриця шумів збудження.

Кореляційна матриця  $\hat{P}(k)$  помилки оцінки описується виразом:

$$\hat{P}(k) = P^*(k) - K(k)H(k)P^*(k). \quad (4.7)$$

Початкові умови для фільтру Калмана  $\hat{u}(0) = \bar{x}(0), \hat{P}(0) = \bar{P}(0)$ , відомі на основі апріорної інформації.



Рис.4.1 – Узагальнений принцип фільтру Калмана

Структурна схема фільтру Калмана показана на рис. 4.2. Головна особливість фільтру Калмана у тому, що немає необхідності запам'ятовувати попередні вимірювання для оцінки  $\hat{u}(k)$  чи перераховувати ваговий матричний коефіцієнт посилення  $K(k)$  на кожному кроці, оскільки усі зміни параметрів вносяться в оцінку  $\hat{u}(k-1)$  з попереднього кроку. Величина коригуючої поправки  $K(k)(u_{И}(k) - H(k)u^*(k))$  залежить від вагового коефіцієнта, що в свою чергу залежить від рівня шумів вимірювання, поточної точності. Коефіцієнт посилення зменшується у процесі вимірювань, оскільки точністю оцінювання збільшується.

У випадку, коли відсутні шуми збудження (або достатньо малі, щоб ними знехтувати) коефіцієнт посилення  $K(k) \rightarrow 0$  при  $k \rightarrow \infty$ , такий коефіцієнт називається оптимальним, а система вважається розімкненою.

Тоді чутливість до нових даних відсутня і фільтр Калмана постійно видає оцінку екстраполяції  $u^*(k)$ .

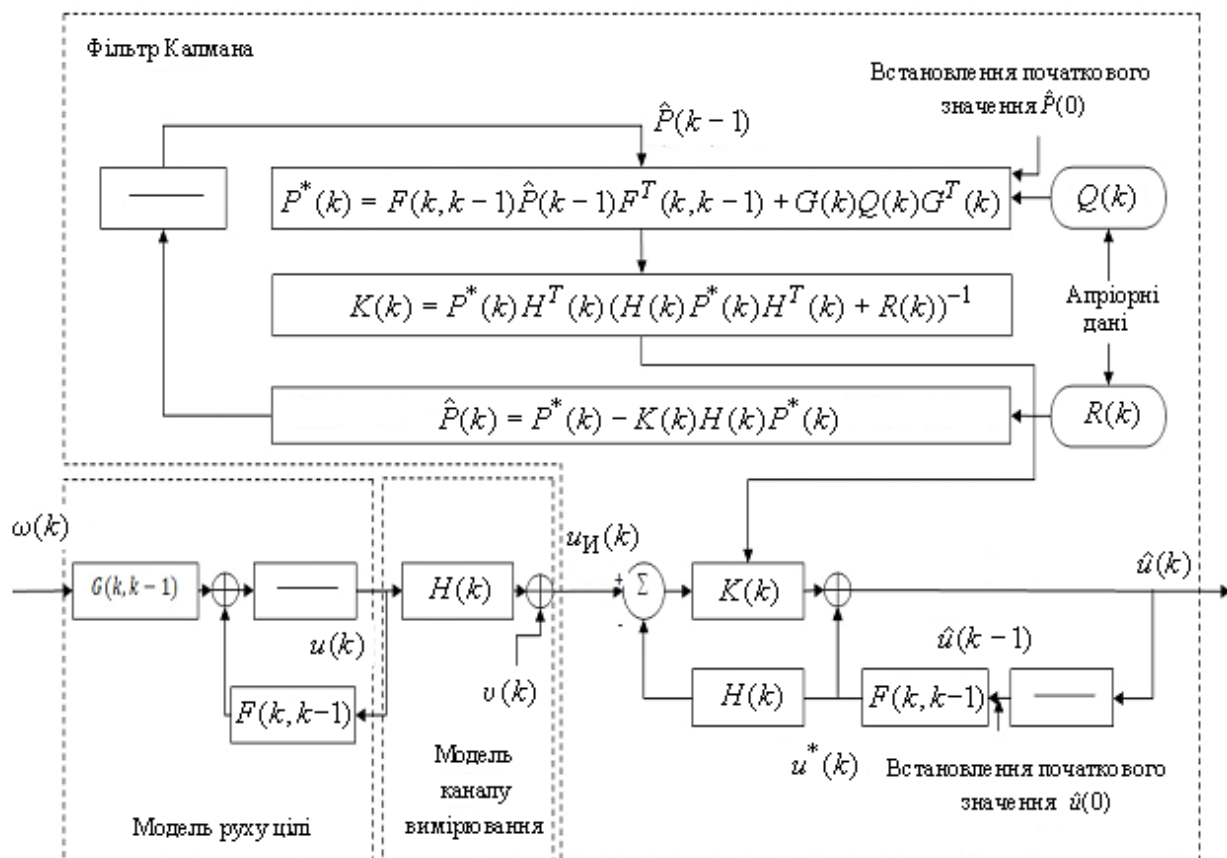


Рис.4.2. Структурна схема фільтру Калмана

Головними особливостями фільтру Калмана є [9]:

1. Фільтр є рекурентним – відшукує значення оцінки на поточному кроці за знайденими значеннями оцінки на попередньому кроці і отриманого поточного вимірювання.
2. Виміри відбуваються у дискретні моменти часу.
3. Оцінка  $\hat{u}(k)$ , що отримана внаслідок обрахунків фільтру, є лінійною відносно спостережень.
4. Кореляційна матриця помилок фільтрації  $\hat{P}(k)$  не залежить від спостережень  $u_M(k)$ , тому кореляційна матриця  $P^*(k)$  та коефіцієнт посилення  $K(k)$  можуть бути обраховані завчасно.
5. Фільтр Калмана може застосовувати для багатомірних випадків та багатоканальних систем.

6. Середньоквадратичне значення похибки може бути мінімізоване для нестационарної моделі динамічної системи.

7. Обмеженням є повна апіорна інформація щодо динамічної системи (4.1) і рівняння спостереження (4.2).

Оцінка вектору стану фільтром Калмана може бути розбіжна і призводить до перевищення дисперсії, математичного очікування та помилок округлення у цифровій реалізації алгоритму оцінювання. Цей недолік виникає за наступних умов:

- 1) неточність завдання моделей процесу;
- 2) неточність моделі спостереження;
- 3) лінеаризація рівнянь;
- 4) відсутність повної інформації про реальну фізичну задачу;
- 5) інші спрощення, що дозволяють описати математично задачу.

На відміну від задач оцінки параметрів, тобто фіксованих значень, у задачах фільтрації оцінюються процеси, значення яких змінюються у часі та з урахуванням шуму.

Фільтр Калмана реалізований у часовому вигляді, а не в частотному, оскільки для розрахунків поточного стану системи, потрібно знати апіорну інформацію на попередньому часовому кроці.

Однією з основних задач при супроводі цілі є вибір області пошуку чергового набору вимірюваних координат цілі, тобто формування стробу супроводу. Як центр стробу супроводу вибираються екстрапольовані значення параметрів руху цілі, що підлягають вимірюванню  $H(k) u^*(k)$ .

Помилка стробування, яка має назву нев'язка, дорівнює  $1/$

$$u_H(k) = H(k)u^*(k) - u_H(k) = H(k)\Delta u^*(k) - v(k). \quad (4.8)$$

Нев'язка є білим гаусівським шумом з нульовим математичним очікуванням і кореляційною матрицею

$$D(k) = H(k)P^*(k)H^T(k) + R(k). \quad (4.9)$$

Строб супроводу є багатовимірним еліпсоїдом, розміри якого визначаються необхідною ймовірністю попадання в нього вектора спостереження. Алгоритм перевірки на попадання відмітки цілі в строб супроводу має вигляд

$$u_H^T(k)D^{-1}(k)u_H(k) \leq l^2, \quad (4.10)$$

де  $l$  - відношення головних напівосей еліпсоїда до СКВ помилок стробування уздовж цих осей.

Ймовірність попадання вектора спостереження в межі стробу супроводу визначається по формулі /2/

$$P = \int_{u_H^T(k)D^{-1}(k)u_H(k) \leq l^2} (2\pi)^{-m/2} \det(D(k))^{-1/2} \exp\{-0.5 \|u_H(k)\|_{D(k)}\} du_H(k), (4.11)$$

де  $m$  – розмірність вектора вимірювань.

Чим більше  $l$ , тим менше ймовірність зриву супроводу цілі. Але тим більше розміри стробу супроводу і тим вище ймовірність попадання в нього «помилкових цілей».



## 5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСРЕМАЛЬНОГО СТЕЖЕННЯ ЗА МАЛОРОЗМІРНИМ БПЛА НА ОСНОВІ МЕТОДА КАЛМАНІВСЬКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

У рамках задачі виявлення та слідкування малорозмірних літальних апаратів, зображення поля, що отримується за допомогою датчика відеоспостереження, квантується за рівнем яскравості та дискретизується:

- по просторовим координатам  $x$  та  $y$  із кроком  $\Delta x$  та  $\Delta y$ ;
- по часу із кроком надходження нового кадру.

Послідовність матриць чисел, кожний елемент яких є вимірюванням яскравості у відповідній точці у кожному кадрі, поступає на прилад аналізу зображень. Таким чином формується прямокутна система координат  $x$  та  $y$ , що є пов'язаною із зображенням, а кожному елементу поточного дискретного зображення буде зіставлена у відповідність яскравість  $l(i, j, n)$ , де  $i, j$  є індексами елементів зображення по осям  $x$  та  $y$ , а  $n$  – номер поточного кадру.

Аналіз обстановки спостереження включає в собі зображення та фон, у якості якого можуть бути будь-яке середовище (наприклад ліс, небо, поле, жилий квартал т.д.). Усе це передбачає наявність складного неоднорідного фону, до якого додається наявність шумів на поточному зображенні (шум датчика, шум квантування зображення за рівнем). Задачі з послідовностями зображень вимагають використовувати просторово-часовий характер інформації, що надходить, при розробці моделей. Також необхідно враховувати велику варіативність зображень, тому дуже складно зазначити певну модель, що могла б відповідати усьому можливному набору сцен спостереження. Це пояснює евристичний характер алгоритмів виявлення та слідкування за БПЛА.

Для строгого прогнозування двомірної моделі необхідно мати трьохмірну модель об'єкту і моделі трьохмірного руху, оскільки БПЛА у процесі руху можуть повертатися чи виконувати різноманітні маневри. Як

наслідок, об'єкт може змінювати свої розміри та форму. Залучення трьохмірних просторових описів потребує опис усіх типів об'єктів і рішення задачі попередньої ідентифікації конкретного типу об'єкту. Визначення усіх параметрів (зсуву, обертання навколо усіх осей, визначення масштабу та проєкцій) потребує великих обчислювальних ресурсів, що ускладнює поставлену задачу.

Розглянемо наступну модель, що дозволяє відслідковувати зміни в об'єкті. Об'єкт на зображенні (Рис.5.1.) представляє собою сукупність зв'язаних точок, геометричний центр якого має координати  $x_e$ ,  $y_e$ . Помістимо об'єкт в прямокутну область, в яку вписується ціль із запасом. Величину «запасу» слід обирати із максимально можливого діапазону зміни розмірів об'єкта на сусідніх тактах обробки зображення. Оскільки конфігурація об'єкта може змінюватися, то точка, що приймається за центр об'єкту, і розміри прямокутної області можуть змінюватися у процесі виявлення та слідування.

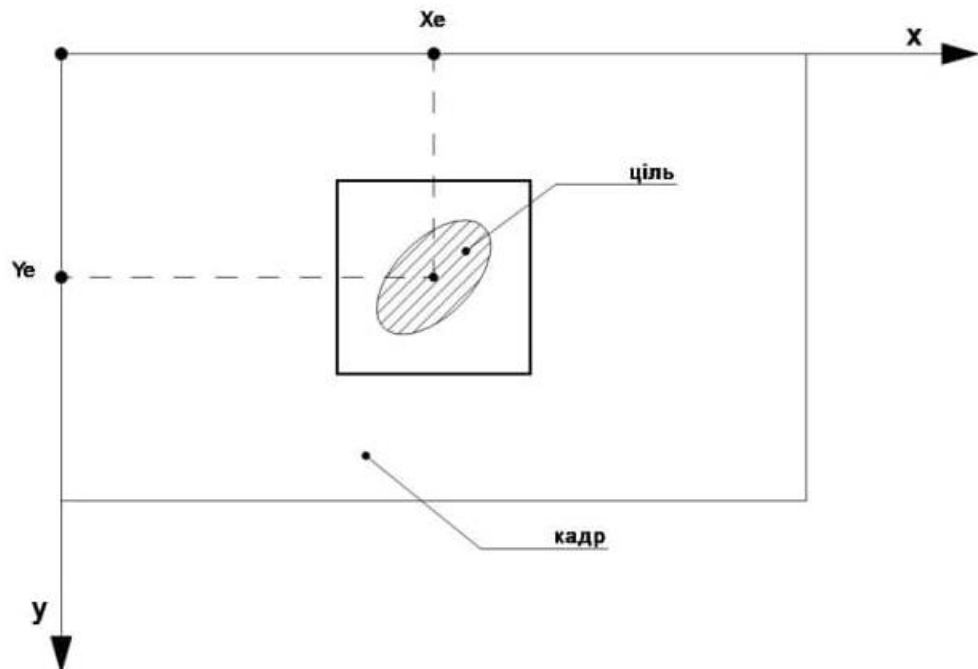


Рис.5.1. - Модель об'єкта

Прямокутна область є моделлю об'єкту спостереження, таким чином задача слідкування зводиться до слідкування за центром прямокутної ділянки поточного зображення, в якій знаходиться реальна ціль, за допомогою кореляційно-екстремального алгоритму позиціонування зображень і алгоритму стеження калманівського типу.

На попередніх тактах роботи алгоритму калманівської фільтрації визначається еталонне зображення, в ролі якого є модель цілі у вигляді прямокутної області.

Однією із основних задач слідкування є формування стробу - області пошуку набору вимірювальних координат цілі, тобто в цій області розглядаються можливі варіанти положення цілі. Область стробу має вигляд прямокутника, а його розміри визначаються в залежності від ймовірності попадання об'єкта спостереження в цю область. Центр стробу пошуку розміщується у точці прогнозованого положення цілі на поточному кадрі, тому координати центру співпадають із координатами центру  $x_e$ ,  $y_e$  еталонного зображення. На рис.5.2. зображено границі стробу синьою лінією, а границі зображення цілі червоною лінією.

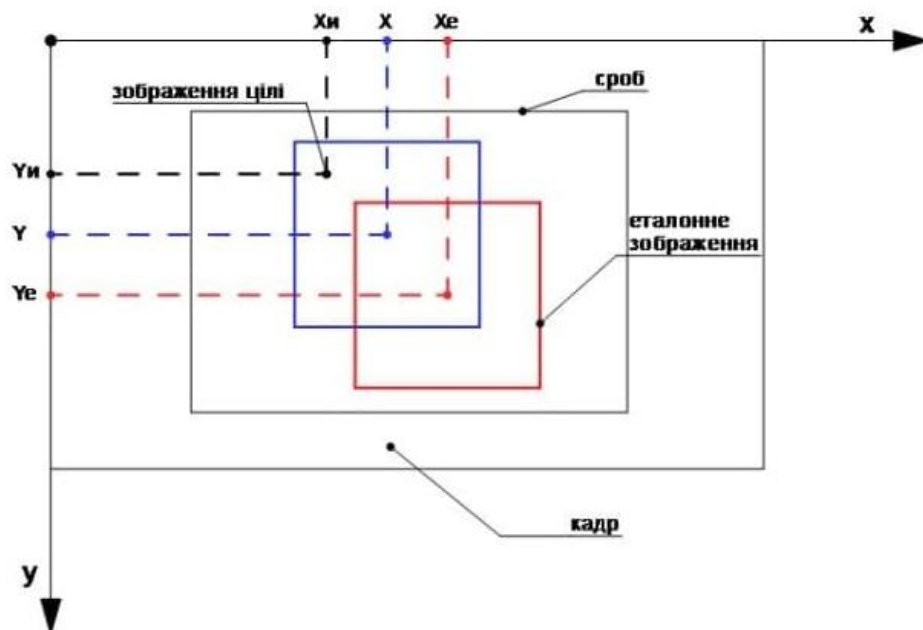


Рис.5.2. - Ілюстрація стробу, еталонного та поточного зображення.

Для визначення зміщення центру зображення цілі відносно центру строба використовується кореляційно-екстремальний алгоритм. Обраховується кореляційна функція при порівнянні фрагменту поточного зображення в стробі і еталонного зображення. При відсутності чинників, що заважають, кореляційна функція приймає максимальне значення, якщо фрагмент зображення в стробі містить об'єкт слідкування. Це дозволяє визначити зміщення  $\Delta x$  та  $\Delta y$  цілі, відносно еталонного зображення, оскільки фрагмент стробу містить зображення об'єкту і має найбільшу схожість з еталонним зображенням. У результаті впливу фону, шуму, завад, зміни геометричної форми та розмірів, зміщення цілі  $\Delta x_{\text{И}}$ ,  $\Delta y_{\text{И}}$  визначається з певною похибкою.

Розраховані зміщення центру зображення цілі відносно центру стробу описуються наступними виразами:

$$\begin{aligned}\Delta x_{\text{И}}(k) &= \Delta x(k) + v_x(k); \\ \Delta y_{\text{И}}(k) &= \Delta y(k) + v_y(k).\end{aligned}\tag{5.1}$$

де  $\Delta x_{\text{И}}(k)$ ,  $\Delta y_{\text{И}}(k)$  - розраховані зміщення центру зображення цілі відносно центру еталонного зображення на  $k$ -тому кроці.

$\Delta x(k)$ ,  $\Delta y(k)$  - істинні зміщення поточного зображення цілі відносно еталонного зображення на  $k$ -му кроці;

$v_x(k)$ ,  $v_y(k)$  - похибки вимірювання зміщення поточного зображення цілі відносно еталонного зображення на  $k$ -му кроці, які є гаусівськими з нульовим математичним очікуванням і кореляційною матрицею  $\mathbf{R}(k)$ .

Наступним кроком у вирішенні задачі слідкування за ціллю є визначення параметрів руху об'єкту. При вимірюванні координат цілі використовується прямокутна система координат, тому для опису руху малорозмірного БПЛА також використовують прямокутну систему координат. Модель руху центру зображення БПЛА в прямокутній системі координат у вигляді дискретної динамічної системи має вигляд:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{F}\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{G}(k)\boldsymbol{\omega}(k) \quad (5.2)$$

де  $\mathbf{u}^T(k) = (x(k), \dot{x}(k), y(k), \dot{y}(k))$  - вектор стану, що включає координати положення  $x(k)$ ,  $y(k)$  і швидкості зміни положення  $\dot{x}(k)$ ,  $\dot{y}(k)$  по відповідних осях декартової СК;

$\boldsymbol{\omega}(k)$  - шум збудження з кореляційною матрицею  $\mathbf{Q}(k) = \text{diag}(\sigma_{ax}^2, \sigma_{ay}^2)$ ;

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \sigma_{ax} \frac{T^2}{2} & 0 \\ \sigma_{ax} T & 0 \\ 0 & \sigma_{ay} \frac{T^2}{2} \\ 0 & \sigma_{ay} T \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

$\mathbf{F}(k-1)$  - матриця переходу системи;

$\mathbf{G}(k)$  - відома матриця на поточному кроці.

$T$  - темп надходження даних.

$\sigma_{ax}^2, \sigma_{ay}^2$  - дисперсії прискорення переміщення цілі по кожній осі, що

визначаються наступним чином:

$$\sigma_{ax}^2 = \frac{a_{mx}^2}{3}; \sigma_{ay}^2 = \frac{a_{my}^2}{3}, \quad (5.4)$$

де  $a_{mx}, a_{my}$  - модулі максимального значення прискорення цілі по кожній осі.

В отриманій моделі (5.2) зміна параметрів руху цілі по кожній осі прямокутної СК описується динамічною системою другого порядку, вектор стану якої містить координати положення і швидкості зміни положення. Рівняння спостереження малорозмірного БПЛА на поточному кадрі мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} x_{\text{И}}(k) &= x_e(k) + \Delta x_{\text{И}}(k) = x_e(k) + \Delta x(k) + v_x(k) = x(k) + v_x(k); \\ y_{\text{И}}(k) &= y_e(k) + \Delta y_{\text{И}}(k) = y_e(k) + \Delta y(k) + v_y(k) = y(k) + v_y(k). \end{aligned} \quad (5.5)$$

де  $x_{\text{И}}(k)$ ,  $y_{\text{И}}(k)$  виміряні координати цілі в прямокутній СК.

Рівняння спостереження у векторно-матричній формі мають наступний вигляд:

$$\mathbf{u}_{\text{И}}(k) = \mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k), \quad (5.6)$$

де  $\mathbf{u}_{\text{И}}(k) = (x_u(k), y_u(k))$  - вектор спостереження, що включає, виміряні координати цілі в декартовій СК;

$\mathbf{v}(k) = (v_x(k), v_y(k))$  – вектор похибок вимірювання з кореляційною матрицею  $\mathbf{R}(k)$ , що має вигляд:

$$\mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2(k) & \sigma_{xy}^2(k) \\ \sigma_{xy}^2(k) & \sigma_y^2(k) \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

$\mathbf{H}$ - матриця спостереження, що має вигляд:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Теоретично компоненти кореляційної матриці помилок вимірювання  $\mathbf{R}(k)$  дуже складно визначити, оскільки вони залежать від багатьох факторів: статистичні характеристики зображення цілі, розмірів еталонного зображення, властивості шуму, фону тощо. Компоненти можна визначити експериментальним чином для різних умов і використовувати їх залежно від випадку, базуючись на ознаках поточного зображення. Аналіз похибок вимірювання буде проведено в розділі 6.1.

На основі моделей (5.2), (5.6) лінійний дискретний фільтр Калмана четвертого порядку, що синтезується, описується рівняннями (4.3-4.7). У загальному випадку через наявність взаємної кореляції між помилками вимірювання в декартовій системі координат, фільтр Калмана не розділяється на два фільтра другого порядку, але на практиці для спрощення алгоритму нехтують взаємною кореляцією, тобто покладають її рівною нулю. Як результат, фільтр Калмана четвертого порядку можна розділити на два

фільтра другого порядку і виконувати незалежну фільтрацію по координатах  $x$  і  $y$ .

Рівняння фільтрації по координаті  $X$  мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x^*(k) \\ \dot{x}^*(k) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}(k-1) \\ \hat{\dot{x}}(k-1) \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{\dot{x}}(k) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x^*(k) \\ \dot{x}^*(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{x1}(k) \\ K_{x2}(k) \end{pmatrix} (x_H(k) - x^*(k)). \end{aligned} \quad (5.8)$$

де коефіцієнт підсилення фільтра Калмана  $\mathbf{K}_x^T(k) = (K_{x1}(k), K_{x2}(k))$  обчислюється по формулам (3.5)-(3.7), де

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= [1 \quad 0]; \quad R_x(k) = \sigma_x^2(k); \\ \mathbf{G}_x &= \begin{bmatrix} \sigma_{ax} \frac{T^2}{2} \\ \sigma_{ax} T \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Початкові умови для фільтра Калмана по координаті  $X$  мають наступний вид:

$$\hat{\mathbf{x}}(1) = \begin{bmatrix} x_H(1) \\ \frac{x_H(1) - x_H(0)}{T} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P}_x(1) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2(1) & \frac{\sigma_x^2(1)}{T} \\ \frac{\sigma_x^2(1)}{T} & 2\frac{\sigma_x^2(1)}{T^2} + \sigma_{mx}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

Рівняння фільтрації по координаті  $Y$  мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y^*(k) \\ \dot{y}^*(k) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{y}(k-1) \\ \hat{\dot{y}}(k-1) \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} \hat{y}(k) \\ \hat{\dot{y}}(k) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} y^*(k) \\ \dot{y}^*(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{y1}(k) \\ K_{y2}(k) \end{pmatrix} (y_H(k) - y^*(k)). \end{aligned} \quad (5.10)$$

де коефіцієнт підсилення фільтра Калмана  $\mathbf{K}_y^T(k) = (K_{y1}(k), K_{y2}(k))$  обчислюється по формулам (3.5)-(3.7), де

$$\mathbf{H} = [1 \quad 0]; \quad R_y(k) = \sigma_y^2;$$

$$\mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} \sigma_{ay} \frac{T^2}{2} \\ \sigma_{ay} T \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Початкові умови для фільтра Калмана по координаті  $Y$  мають наступний вид:

$$\hat{\mathbf{y}}(1) = \begin{bmatrix} y_{И}(1) \\ \frac{y_{И}(1) - y_{И}(0)}{T} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P}_y(1) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2(1) & \frac{\sigma_x^2(1)}{T} \\ \frac{\sigma_x^2(1)}{T} & 2\frac{\sigma_x^2(1)}{T^2} + \sigma_{mx}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

Координати центру строба розраховуються на етапі прогнозу і дорівнюють

$$\begin{aligned} x_e(k) &= x^*(k); \\ y_e(k) &= y^*(k). \end{aligned} \quad (5.12)$$



## 6. АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕННОГО АЛГОРИТМУ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ЕОМ

Для дослідження якості роботи синтезованого алгоритму в середовищі Matlab була розроблена програма імітаційного моделювання, що складається із трьох блоків:

- Імітатор;
- Фільтр Калмана;
- Блок статичної обробки.

Перший блок імітує переміщення зображення БПЛА на поточному кадрі. Також відбувається зашумлення кадру дискретним білим гаусівським шумом з дисперсією .

Блок статичної обробки призначений для оцінки якості роботи фільтру Калмана і ефективності супроводження БПЛА. Дані з імітатора і оцінки алгоритму порівнюються для обчислення СКВ похибок оцінювання точносних характеристик фільтру Калмана та визначення ймовірності зриву супроводження.

Процес моделювання розбивається на наступні етапи:

1. Зчитується еталонне зображення із файлу.
2. Задаються координати центру поточного і еталонного зображень.
3. Моделюється стан незашумленого поточного зображення по заданому еталонному зображенню.
4. Моделюється поточне зображення із накладанням білого гаусівського шуму із заданою дисперсією, що імітує власні шуми каналів спостереження.
5. Моделюється кореляційно-екстремальний алгоритм зіставлення поточного і еталонного зображень для визначення місцеположення БПЛА на поточному кадрі.
6. Моделюється фільтр Калмана.

7. Проводиться статична обробка результатів роботи алгоритмів шляхом багаторазового запуску для подальшої оцінки ефективності їх роботи.

### **6.1 Аналіз точності позиціонування БПЛА на поточному кадрі**

Аналіз точності позиціонування з використанням кореляційного алгоритму виконано шляхом статистичного моделювання у середовищі Matlab. Було використано вихідні тестові зображення безпілотного літального апарату, дрону (рис.6.1.), різного розміру на основі зображень у форматі JPEG. При виконанні моделювання зображення пронормовані до інтервалу  $[0,1]$  та представлені у форматі з плаваючою точкою. Дані зображення використовуються для побудови еталонних зображень, а також для аналізу точності позиціонування при переміщеннях БПЛА без повороту зображень.



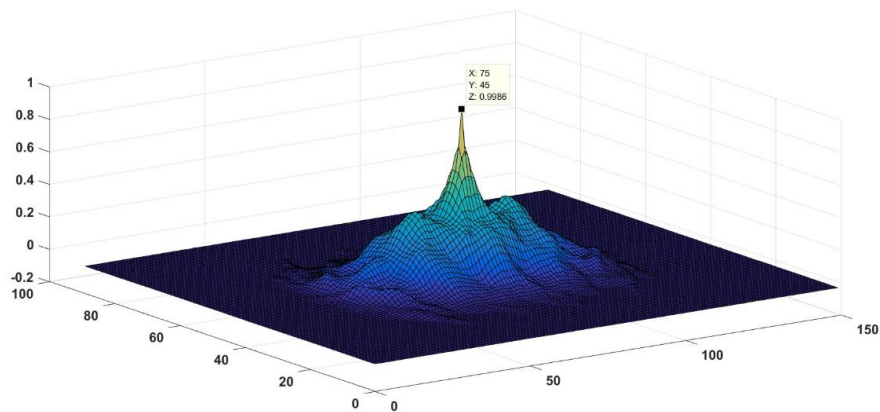
Рис.6.1 - Зображення еталону а) 50 на 30 пікселів, б) 25 на 15 пікселів, в) 10 на 6 пікселів

Енергетичні характеристики тестових зображень наведені в таблиці 1.

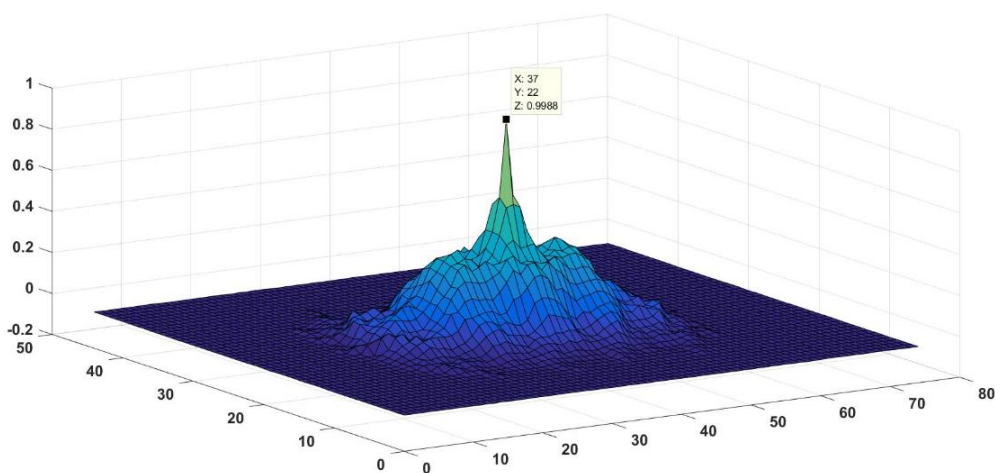
Таблиця.1 Енергетичні характеристики тестових зображень.

Розмір зображення	$E_D$ (енергія)	$\sigma_D$ (СКВ)	$\sigma_D^2$ (дисперсія)
50x30	136.6247	0.3018	0.0911
25x15	36.7910	0.3132	0.0981
10x6	5.1953	0.2943	0.0866

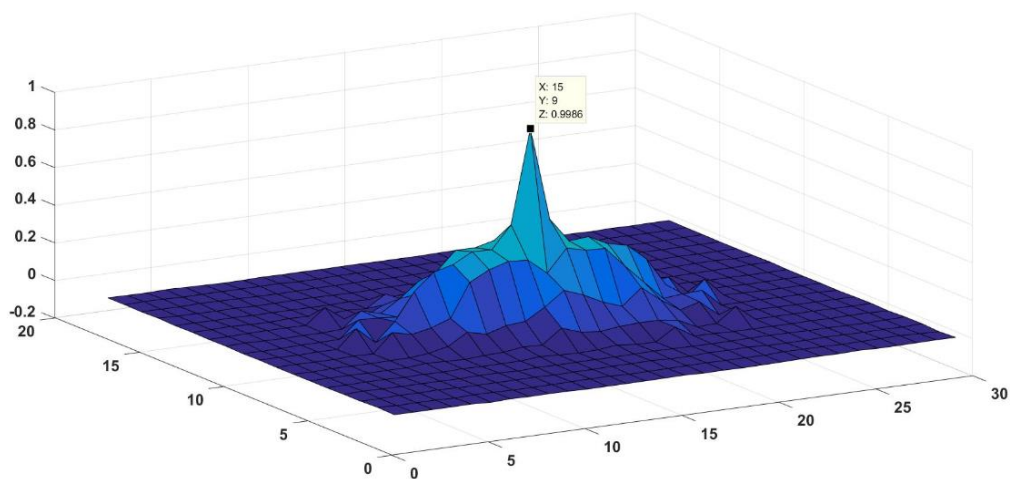
Нормовані кореляційні функції зображень представлені на рис. 6.2.



а)



б)



в)

Рис.6.2 - Нормовані кореляційні функції еталонних зображень

а) 50 x 30 пікселів, б) 25 x 15 пікселів, в) 10 x 6 пікселів

Еталонне зображення представляє собою прямокутник, сторони якого у три рази більше за сторони тестового зображення БПЛА, яке знаходиться у центрі стробу. Поточне зображення має ті ж самі розміри, що і еталонне зображення. При проведенні випробувань, тестове зображення БПЛА розташовується в прямокутній області поточного зображення рівномірно. На рис. 6.3(а) представлений вигляд еталонного зображення, а на рис. рис.6.3(б) тестового зображення не спотворених завадою.



Рис. 6.3(а) - Еталонне зображення



Рис. 6.3(б) - Поточне зображення без шуму

В якості завади використовувався дискретний білий гаусівський шум з дисперсією  $\sigma_n^2$ . Дослідження проводилось при різних значеннях вхідного відношення сигнал/шум, яке розраховувалось по формулі:

$$q = \sigma_D^2 / \sigma_n^2, \quad (1)$$

де  $\sigma_D^2$  - дисперсія зображення БПЛА.

Демонстрація роботи спектрального алгоритму розрахунку нормованої кореляційної функції з використанням двомірного дискретного перетворення Фур'є показано на рис.6.4 на прикладі неспотвореного завадою зображення 50x30 пікселів. Поточне зображення зміщено відносно еталонного зображення по осям X і Y на один відлік.

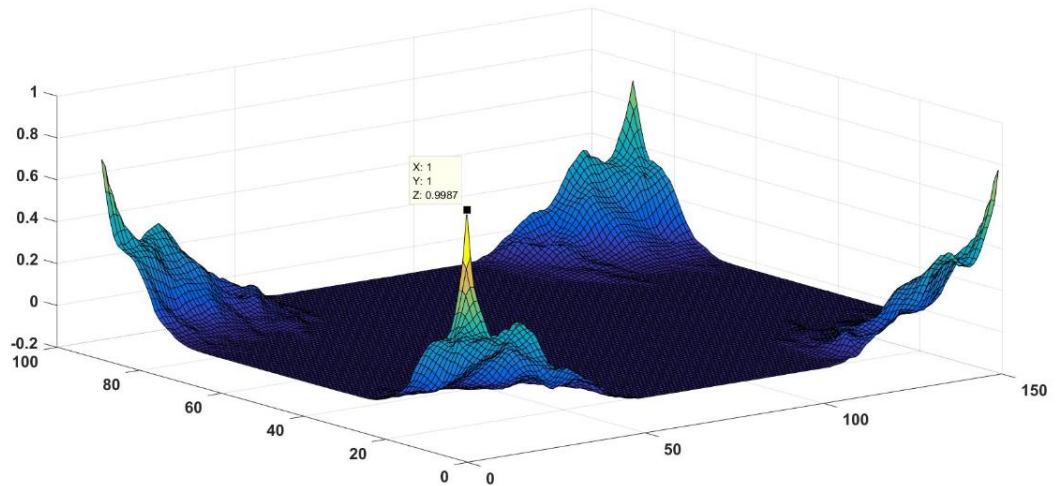


Рис. 6.4 - Неспотвореного завадою зображення 50x30

Як випливає з рис.6.4 нормована взаємна кореляційна функція цифрових зображень є періодичною. Її максимум знаходиться в точці з координатами  $X=1$ ,  $Y=1$ .

Повне співпадіння еталону із поточним зображенням практично не буває через постійну наявність шумів, завад і спотворень. Ці негативні фактори також впливають і на вигляд взаємної кореляційної функції зображень.

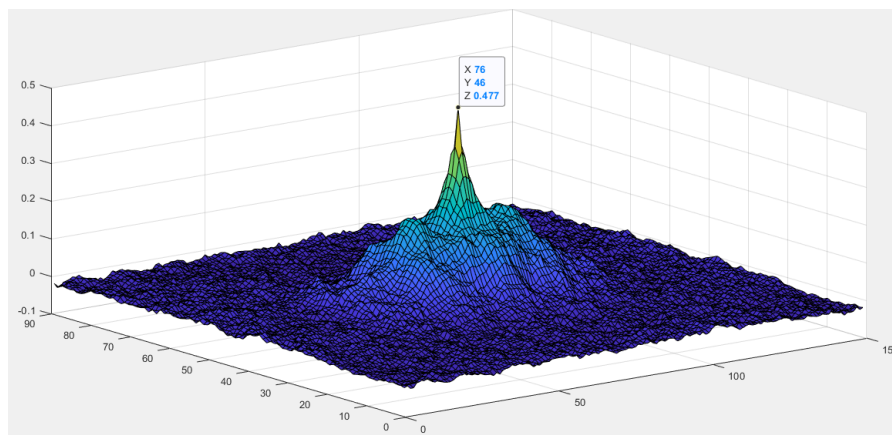
Розглянуто вплив шуму на зображенні на вигляд нормованої взаємної кореляційної функції зображень. Еталонні і поточні зображення спотворені дискретним білим гаусівським шумом з СКВ  $\sigma_n=0.3$ . Тестові зображення спотворені шумом показані на рис. 5.



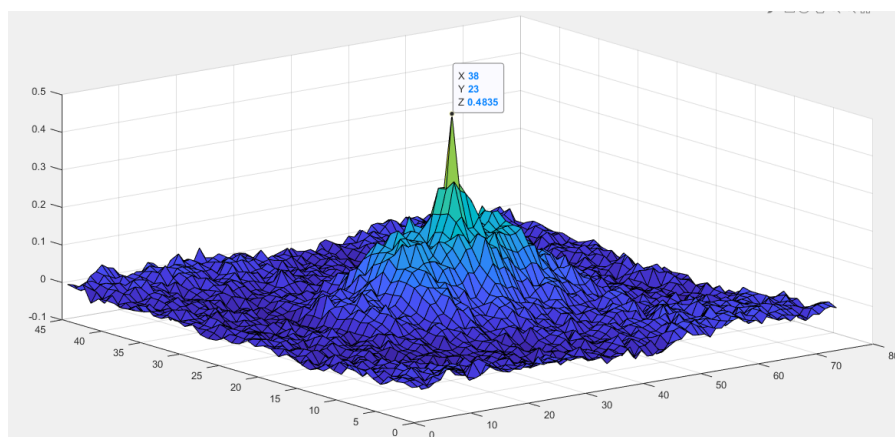
Рис.6.5 - Зашумлені тестові зображення

а) 50 на 30 пікселів, б) 25 на 15 пікселів, в) 10 на 6 пікселів

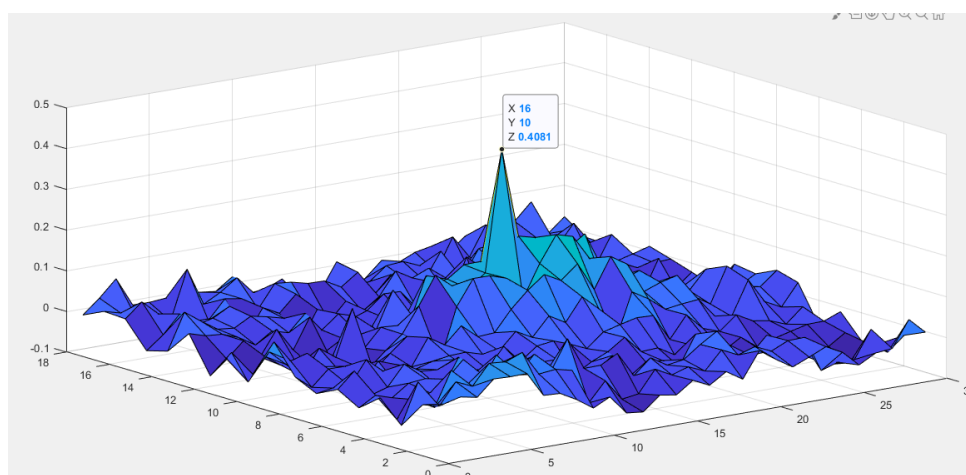
На рис. 6.6 представлені результати обчислення нормованої взаємної кореляційної функції еталонних зображень і поточних зображень спотворених шумом.



а)



б)



в)

Рис.6.6. Нормовані взаємні кореляційні функції зашумлених зображень  
а) 50 на 30 пікселів, б) 25 на 15 пікселів, в) 10 на 6 пікселів

Наявність шуму призводить до зменшення коефіцієнту кореляції зображень, а також до появи додаткових локальних екстремумів. При зменшенні розміру зображення (енергії сигнальної складової) вплив шуму збільшується. Наявність локальних екстремумів призводить до можливих похибок (хибних рішень) у визначенні зсуву поточного зображення відносно еталонного зображення.

Головним недоліком кореляційних методів зіставлення зображень є їх висока чутливість до геометричних спотворень у порівнянні з еталонним, зокрема у випадку ракурсних спотворень при повороті об'єкта слідкування.

На рис.6.7 продемонстровано зображення БПЛА різних розмірів, що отримані з відповідних зображень рис.6.1, але із поворотом на 45 градусів. Ці дані використовуються для аналізу точності позиціонування при переміщення БПЛА і при наявності геометричних спотворень.

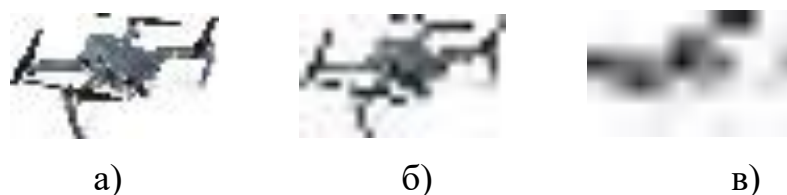
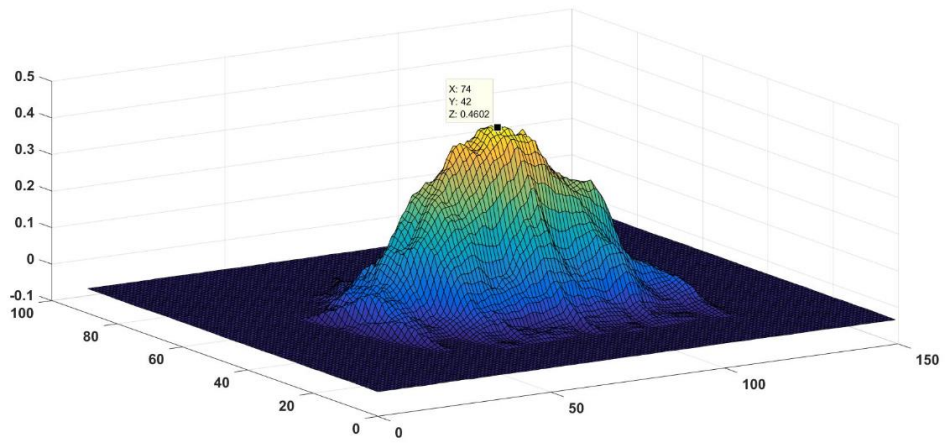


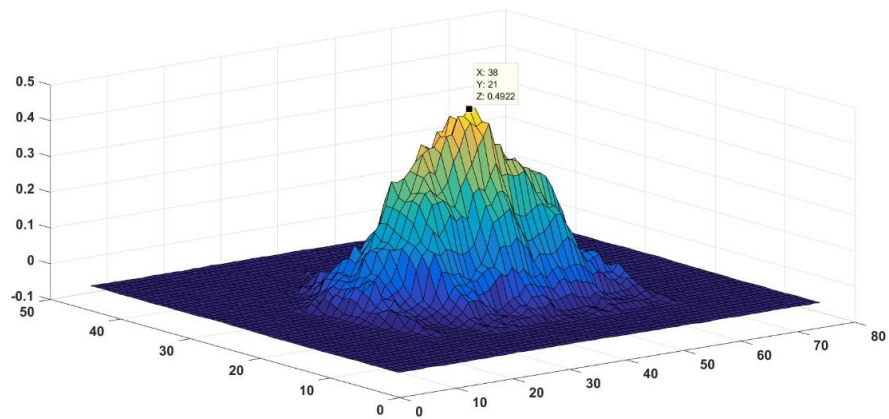
Рис.6.7. - Зображення повернуте на 45°

а) 50 на 30 пікселів, б) 25 на 15 пікселів, в) 10 на 6 пікселів

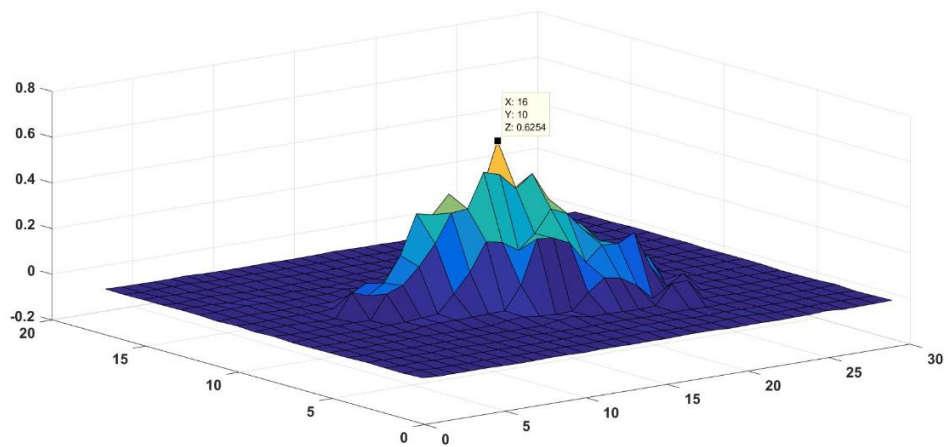
На рис. 6.8 представлені результати обчислення взаємної кореляційної функції еталонних зображень рис. 6.1 і поточних зображень рис.6.7 при відсутності шуму.



а)



б)



в)

Рис.6.8. - Нормовані взаємні кореляційні функції при відсутності шуму  
в еталонному зображенні,

поворот поточного зображення дорівнює  $45^\circ$

а) 50 на 30 пікселів, б) 25 на 15 пікселів, в) 10 на 6 пікселів



Поворот зображення призводить до зменшення коефіцієнту кореляції зображень. Крім того, екстремуми взаємних кореляційних функцій є розмитими.

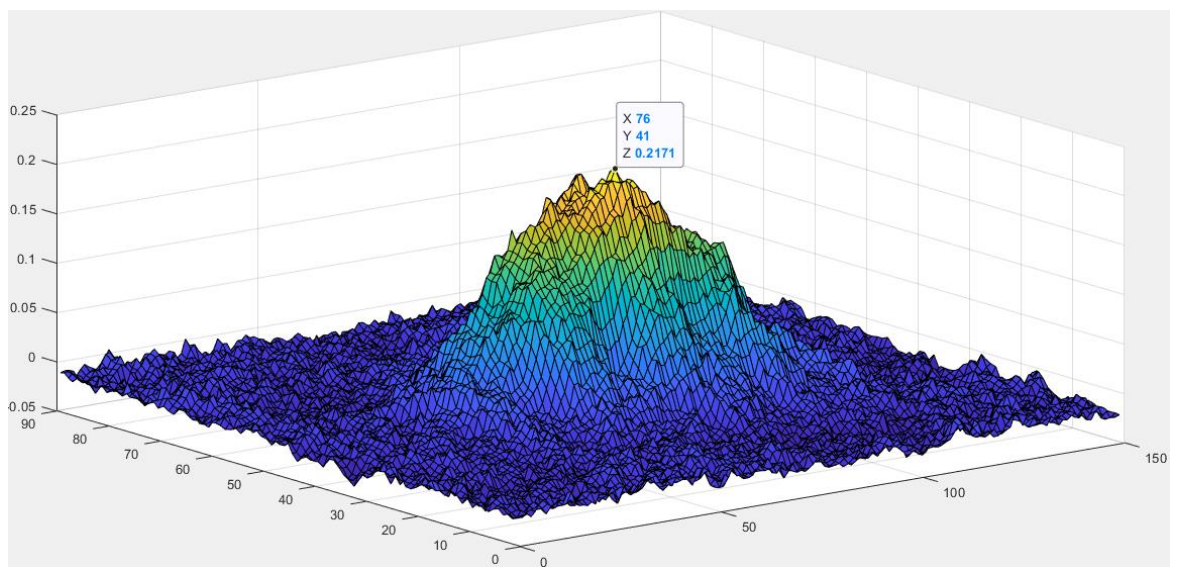
Розглянуто вплив шуму на зображенні на вигляд взаємної кореляційної функції зображень при наявності геометричних спотворень. Еталонні і поточні зображення спотворені дискретним білим гаусівським шумом з СКВ  $\sigma_n=0.3$ . Поточні зображення спотворені шумом показані на рис.6.9.



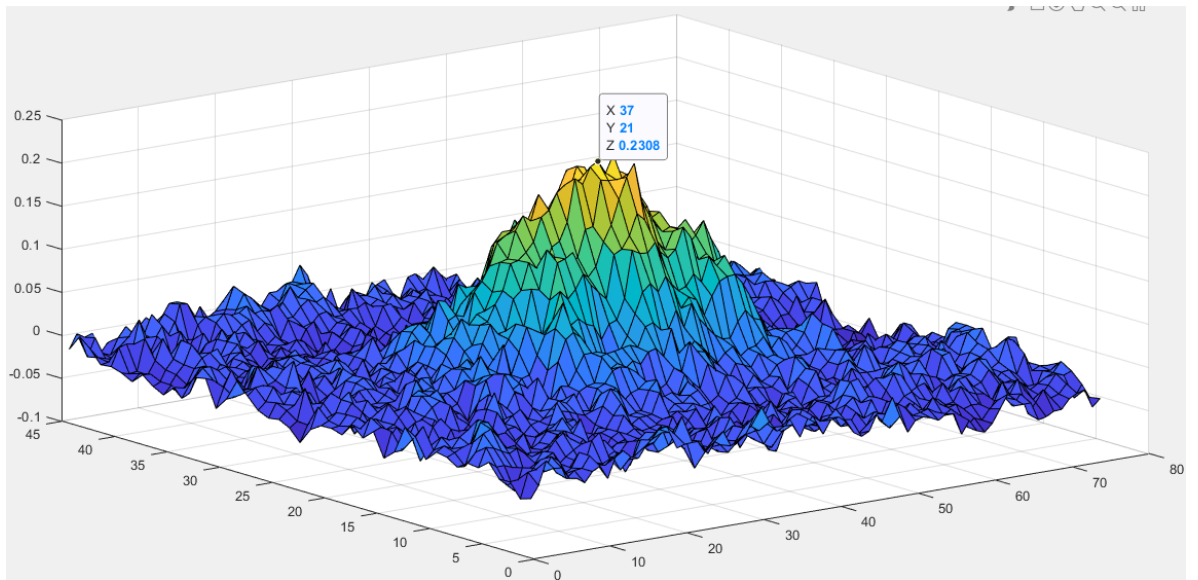
Рис.6.9 Зашумлені поточні зображення

а) 50 на 30 пікселів, б) 25 на 15 пікселів, в) 10 на 6 пікселів

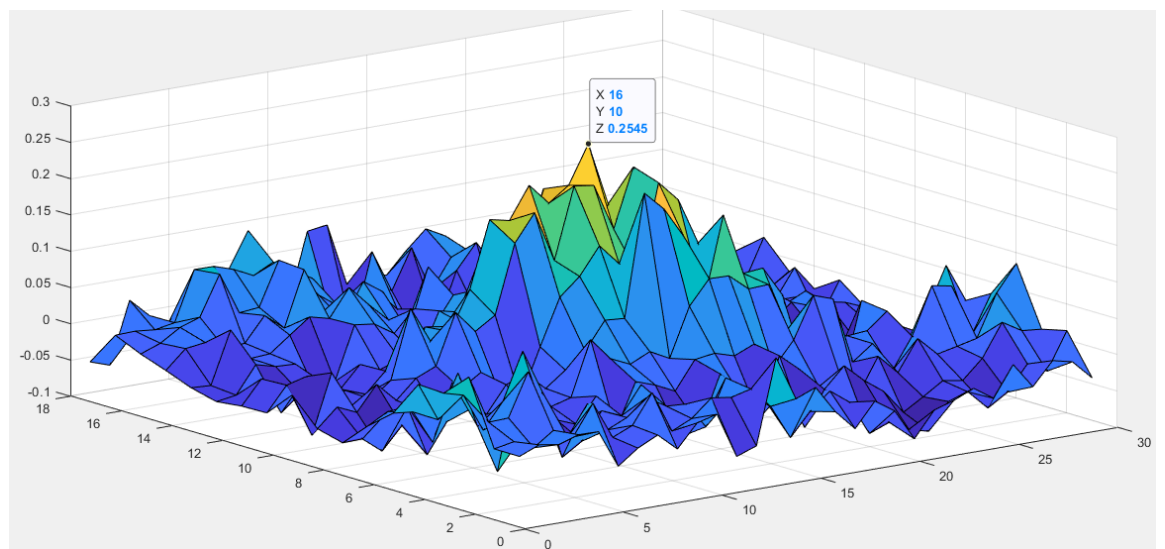
На рис. 6.10 представлені результати обчислення взаємної кореляційної функції еталонних зображень рис.5 і поточних зображень рис.9, спотворених шумом.



а)



б)



в)

Рис.6.10. - Нормовані взаємні кореляційні функції зашумлених зображень

а) 50 на 30 пікселів, б) 25 на 15 пікселів, в) 10 на 6 пікселів

Наявність геометричних спотворень поточного зображення призводить до збільшення негативного впливу шуму. При однакових енергетичних характеристиках зображень коефіцієнт кореляції зображень зменшується, а хибні викиди кореляційних функцій збільшуються. Це призводить до збільшення можливих похибок (хибних рішень) у визначенні зсуву поточного зображення відносно еталонного зображення.

Методом Монте-Карло по 10000 реалізацій оцінювалось СКВ  $\sigma_X$  і  $\sigma_Y$  похибок позиціонування БПЛА по осям X і Y. З метою порівняння точності позиціонування для різних тестових зображень розраховувались нормовані СКВ  $\bar{\sigma}_X$  і  $\bar{\sigma}_Y$  похибок позиціонування БПЛА по формулам

$$\bar{\sigma}_X = 2\sigma_X/l_X, \quad \bar{\sigma}_Y = 2\sigma_Y/l_Y, \quad (2)$$

де  $l_X, l_Y$  - розміри спостережуваних зображень по відповідним осям.

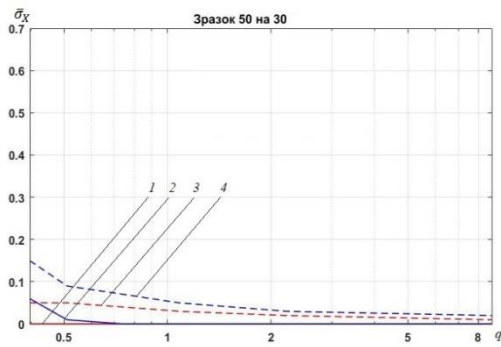
Результати моделювання наведено на рис.6.11. Криві 1 і криві 2 – характеризують ситуації коли еталонне зображення є ідеальним і спотворене завадою відповідно при відсутності повороту БПЛА на зображенні, що спостерігається, а криві 3 і криві 4 – при наявності повороту.

Як впливає з кривих 1 кореляційно-екстремальний метод забезпечує субпіксельну точність оцінювання. Зашумленість еталонного зображення призводить до появи шумової складової похибки позиціонування, яка значно зростає при зменшенні розмірів зображення і відношення сигнал-шум  $q$ . Поворот спостережуваного зображення БПЛА відносно еталонного (геометричне спотворення) посилює зростання похибки позиціонування при зменшенні відношення сигнал-шум  $q$ .

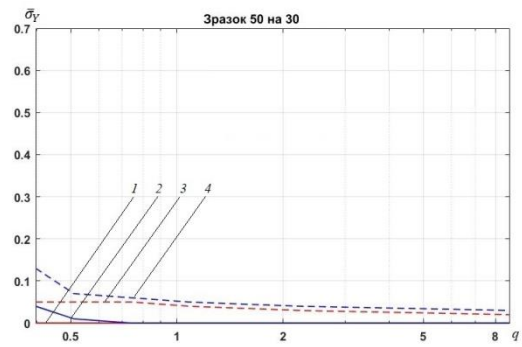
Отримані результати стають зрозумілими, якщо порівняти вихідні відношення сигнал/шум  $h^2$ , які отримуються в результаті використання кореляційно-екстремального алгоритму. Вихідне відношення сигнал/шум  $h^2$  розраховується по формулі

$$h^2 = E_D / 2\sigma_n^2, \quad (3)$$

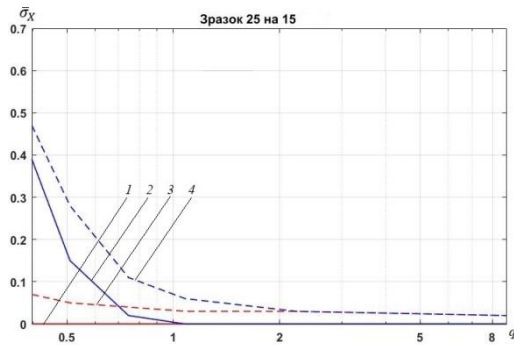
де  $E_D$  - енергія зображення БПЛА.



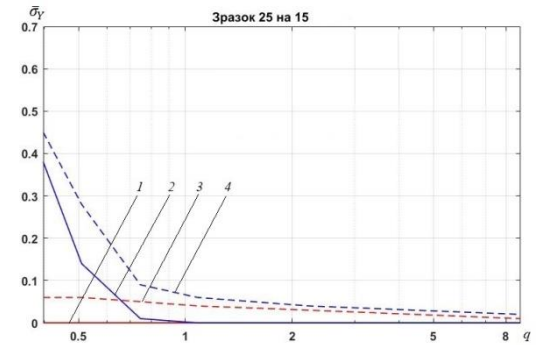
а)



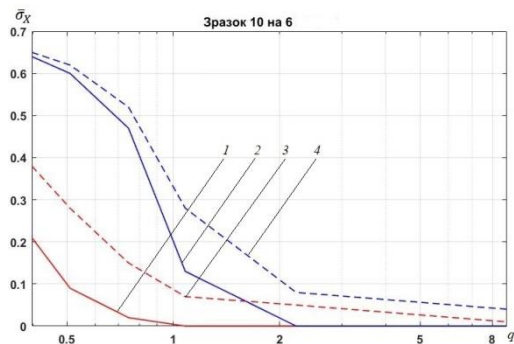
б)



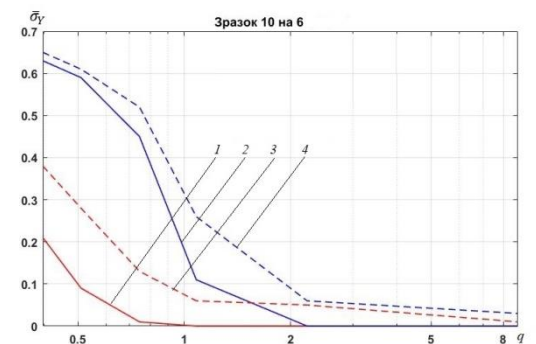
в)



г)



д)



е)

Рис 6.11. Результати експериментів для зображень а),б) 50 на 30 пікселів, в),г) 25 на 15 пікселів, д),е) 10 на 6 пікселів; ( 1 - без шуму еталону, без повороту зображення, 2 - з шумом еталону, без повороту зображення, 3 – без шуму еталону, з поворотом зображення, 4 – з шумом еталону, з поворотом зображення)

В таблиці 2 розраховані значення вхідного  $q$  і вихідного  $h^2$  відношення сигнал/шум при різних значеннях СКВ шуму для трьох тестових зображень БПЛА рис. 6.1.

Таблиця 2. Вхідні і вихідні відношення сигнал/шум

$\sigma_n$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
50 x30	$q$	9.10/ 9.59 дБ	2.27/ 3.57 дБ	1.01/ 0.05 дБ	0.57/ -2.44 дБ	0.36/ -4.38 дБ	0.25/ -5.96 дБ
	$h^2$	6831/ 38.34 дБ	1707/ 32.32 дБ	759.02/ 28.8 дБ	426.95/ 26.3 дБ	273.24/ 24.36 дБ	189.75/ 22.78 дБ
25 x15	$q$	9.81/ 0.31 дБ	2.45/ 3.89 дБ	1.09/ 0.37 дБ	0.61/ -2.12 дБ	0.39/ -4.06 дБ	0.27/ -5.64 дБ
	$h^2$	1839/ 32.64 дБ	459.88/ 26.62 дБ	204.39/ 23.10 дБ	114.97/ 20.60 дБ	73.58/ 18.66 дБ	51.09/ 17.08 дБ
10 x6	$q$	8.66/ 9.38 дБ	2.1/ 3.35 дБ	0.96/ -0.17 дБ	0.54/ -2.7 дБ	0.34/ -4.6 дБ	0.24/ -6.2 дБ
	$h^2$	259.7/ 24.1 дБ	64.9/ 18.1 дБ	28.8/ 14.6 дБ	15.2/ 12.1 дБ	10.4/ 10.2 дБ	7.2/ 8.6 дБ

Відомо, що дисперсія похибки позиціонування зменшується при збільшенні вихідного відношення сигнал/шум, а значення залежить від енергії корисного сигналу. Енергія тестового зображення «50x30» в 26.3 рази більше, ніж енергія тестового зображення «10x6». Енергія тестового зображення «25x15» в 7.1 раз більше, ніж енергія тестового зображення «10x6». Саме тому, точність позиціонування тестового зображення «10x6» при збільшенні дисперсії шуму значно погіршується.

Отримані результати дають можливість визначати умови прийняттого визначення положення БПЛА та вірогідні умови, коли супровід БПЛА буде зірвано, що в свою чергу дозволяє з'ясувати умови ефективного використання кореляційно-екстремальних систем супроводження БПЛА в системах відеоспостереження.

### ***6.2 Аналіз ефективності алгоритму стеження за БПЛА на основі фільтру Калмана***

Аналіз роботи алгоритму супроводження БПЛА на основі фільтру Калмана виконано за допомогою метода Монте-Карло, який заснований на одержанні великої кількості реалізацій певного випадкового процесу для отримання статистичних характеристик процесу, що розглядається.

У програмі моделювався рух слабо маневруючої цілі в прямокутній системі координат із початковими становищем  $x_1=100$  пікс (пікселів),  $y_1=100$  пікс. і швидкістю  $\dot{x}=10$  пікс./такт,  $\dot{y}=10$  пікс./такт. Інтенсивність маневру встановлено  $\sigma_a=1$  пікс./такт<sup>2</sup>. Кількість відліків траєкторій  $N=50$ . Розмір кадру дорівнював  $1000 \times 1000$  пікселів. Темп надходження інформації  $T=1$  такт. Помилки вимірювання прямокутних координат цілі кореляційно-екстремальним методом встановлено  $\sigma_x=\sigma_y=1$  пікс. Кількість реалізацій метода Монте-Карло дорівнює  $M=1000$ .

На рис. 6.12 показано кадр із тестовим зображенням БПЛА  $25 \times 15$  пікселів і стробом стеження, який виділено сірим кольором. Строб стеження співпадає з поточним зображенням, яке використовується для визначення кореляційно-екстремальним методом координат БПЛА на поточному кадрі. Кадр спотворений дискретним білим гаусівським шумом з СКВ  $\sigma_n=0.1$ .

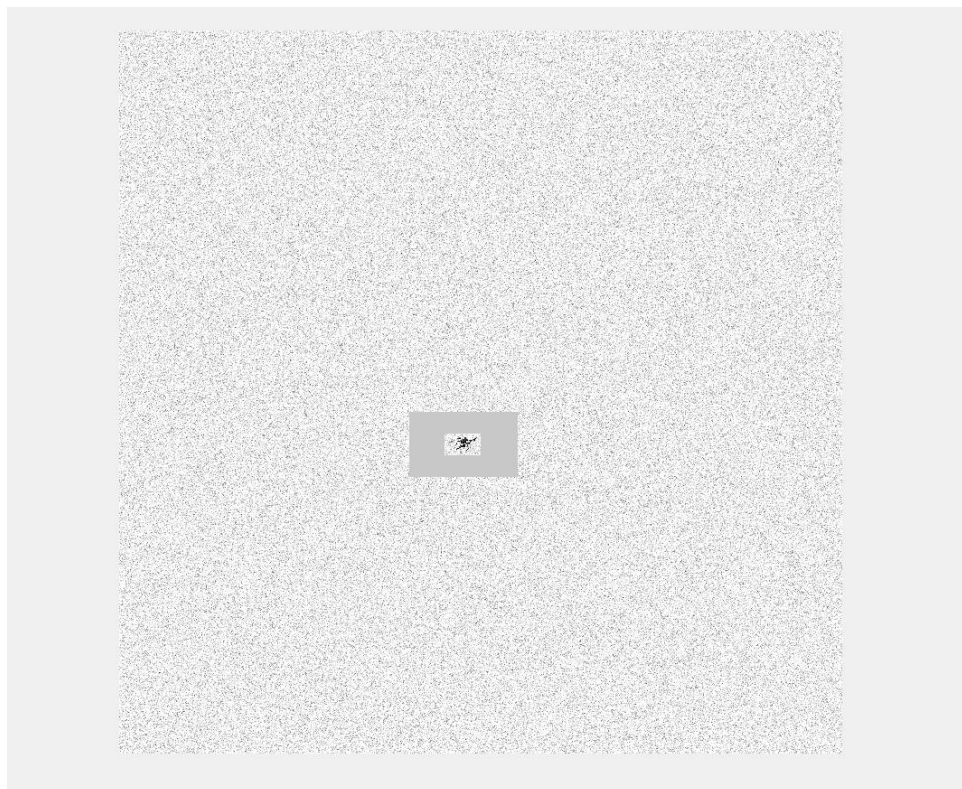


Рис 6.12. - Кадр із зображенням БПЛА і стробом стеження.

Для аналізу особливостей алгоритму фільтрації використано тестове зображення БПЛА 10х6 пікселів, точність позиціонування якого кореляційно-екстремальним методом суттєво залежить від потужності шуму на зображенні. СКВ шуму на зображенні  $\sigma_n = 0.1$ . На рис. показані істина (зелена) та відфільтрована (червона) траєкторії БПЛА в координатах ХУ. Враховуючи високу точність вимірювання координат БПЛА кореляційно-екстремальним методом істина та відфільтрована траєкторії БПЛА фактично співпадають.

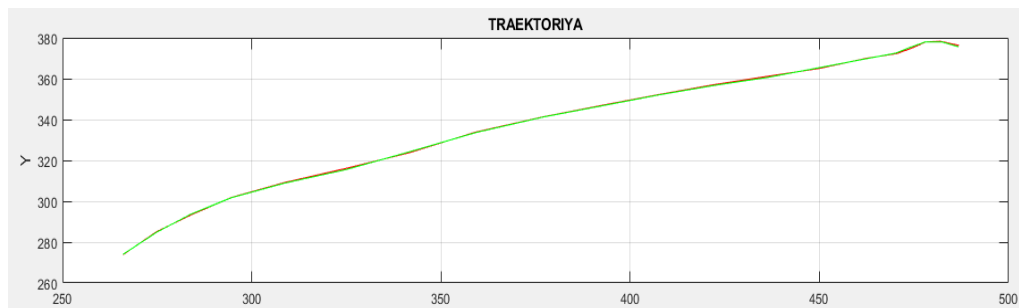


Рис.6.13

На рис.6.14 показані математичні очікування (зелена, криві 1), СКВ помилок вимірювання положення цілі (синя, криві 2) кореляційно-екстремальним алгоритмом, що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок вимірювання координат цілі, які було встановлено при побудові фільтра Калмана (червона, криві 3). Фактичне СКВ помилок вимірювання координат цілі не перевищує задане СКВ, що забезпечує працездатність алгоритму калманівської фільтрації.

На рис.6.15 показані математичні очікування  $m_x^*, m_y^*$  (зелена криві 1), СКВ помилок прогнозу положення цілі  $\sigma_x^*, \sigma_y^*$  (синя криві 2), що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок прогнозу положення цілі, що розраховані фільтром  $\sqrt{p_x^*}, \sqrt{p_y^*}$  (червона криві 3). На рис. 6.15 показані математичній очікування  $\hat{m}_x, \hat{m}_y$  (криві 1), СКВ помилок оцінки положення

цілі  $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y$  (криві 2), що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок прогнозу положення цілі, що розраховані фільтром  $\sqrt{\hat{p}_x}, \sqrt{\hat{p}_y}$  (криві 3).

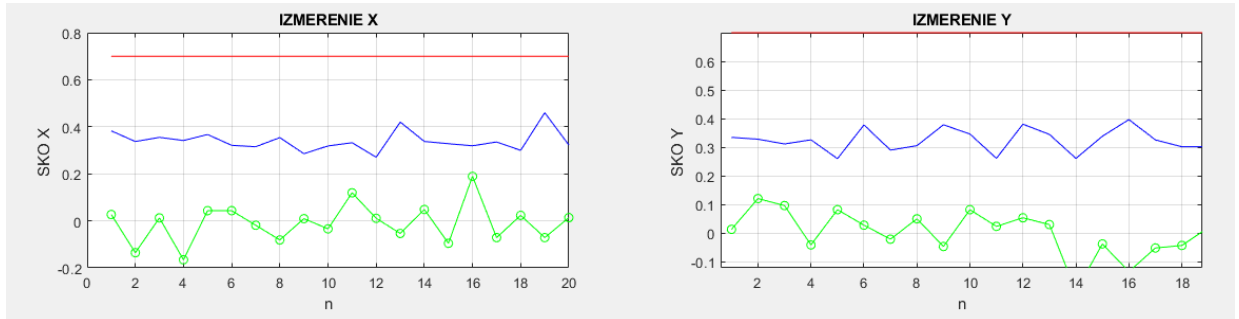


Рис. 6.14 - Математичні очікування (зелена, криві 1), СКВ помилок вимірювання положення цілі (синя, криві 2) кореляційно-екстремальним алгоритмом.

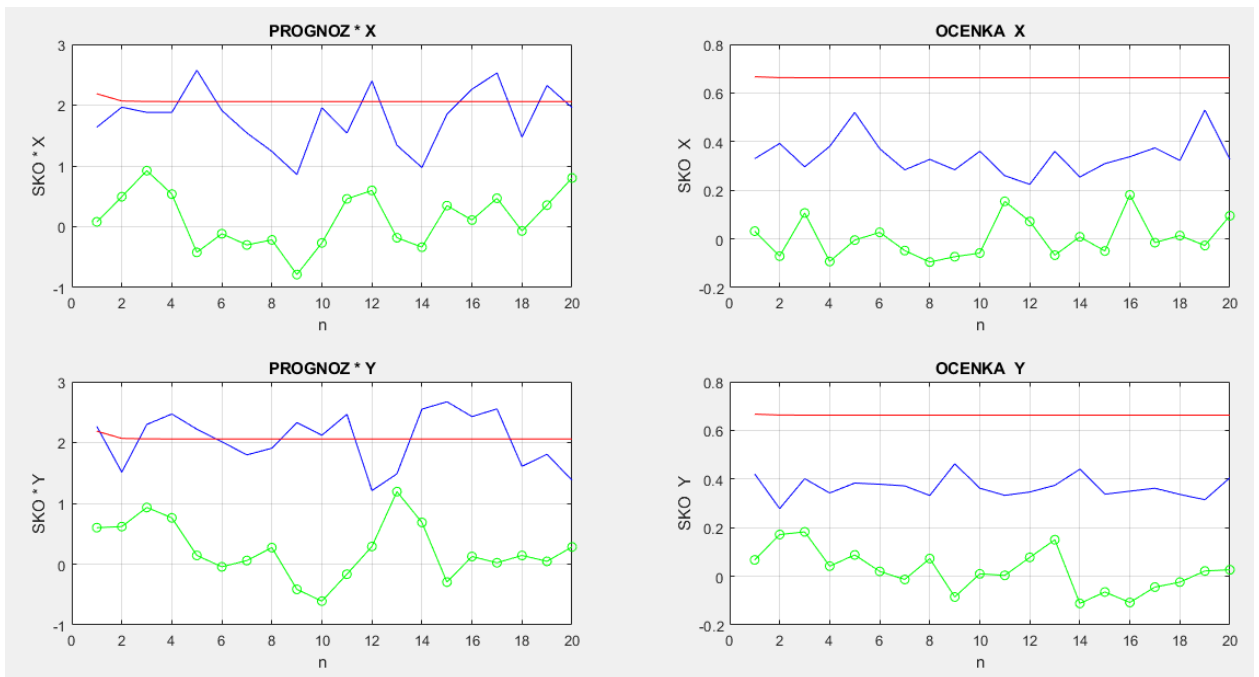


Рис. 6.15 - Залежності математичного очікування і СКВ похибок прогнозу і оцінки координат БПЛА по осям X і Y.

В наступному експерименті СКВ шуму на зображенні було збільшено до  $\sigma_n=0.3$ . На рис. 6.16 показані істина (зелена) та відфільтрована траєкторії



БПЛА в координатах XY при наявності зриву супроводження. В результаті зриву супроводження зелена і червона траєкторії розходяться.

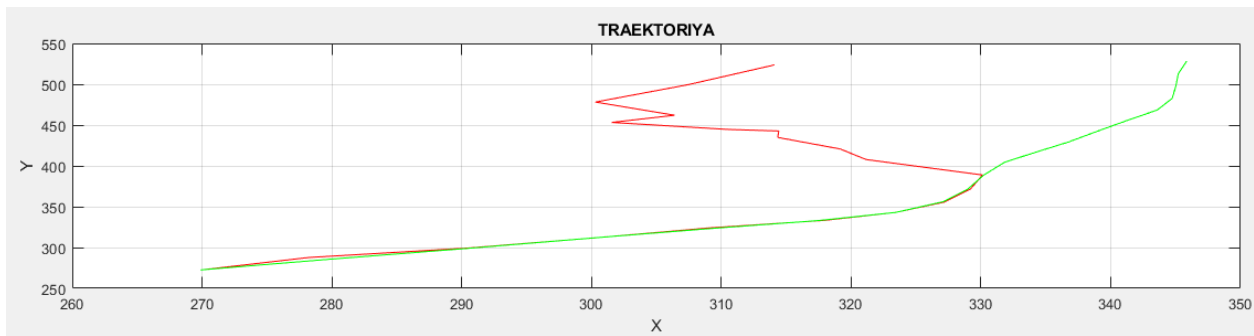


Рис.6.16

На рис.6.17 показані математичні очікування  $m_x^6, m_y^6$  (зелена, криві 1), СКВ помилок вимірювання положення цілі  $\sigma_x^6, \sigma_y^6$  (синя, криві 2) кореляційно-екстремальним алгоритмом, що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок вимірювання координат цілі  $\sigma_x, \sigma_y$ , які було встановлено при побудові фільтра Калмана (червона, криві 3). В результатів зривів супроводження фактичні математичні очікування і СКВ помилок вимірювання положення цілі значно перевищують встановлені СКВ помилок вимірювання координат цілі  $\sigma_x, \sigma_y$ .

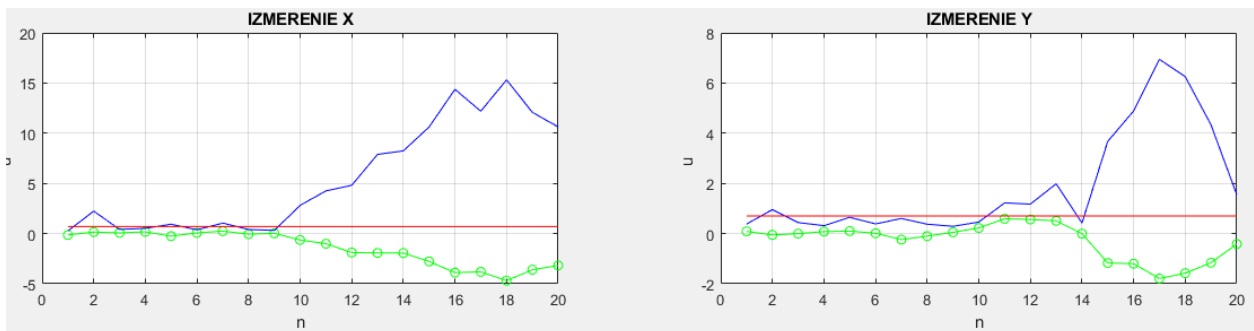


Рис. 6.17

На рис 6.18 показані математичні очікування  $m_x^*, m_y^*$  (зелена, криві 1), СКВ помилок прогнозу положення цілі  $\sigma_x^*, \sigma_y^*$  (синя, криві 2), що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок прогнозу положення цілі, що розраховані фільтром  $\sqrt{p_x^*}, \sqrt{p_y^*}$  (червона, криві 3). На рис.6.18 показані математичній очікування  $\hat{m}_x, \hat{m}_y$  (криві 1), СКВ помилок оцінки положення цілі  $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y$  (криві 2), що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок прогнозу положення цілі, що розраховані фільтром  $\sqrt{\hat{p}_x}, \sqrt{\hat{p}_y}$  (криві 3). В результатів зривів супроводження фактичні математичні очікування і СКВ помилок оцінювання положення цілі значно перевищують розраховані фільтром і СКВ помилок оцінювання координат цілі.

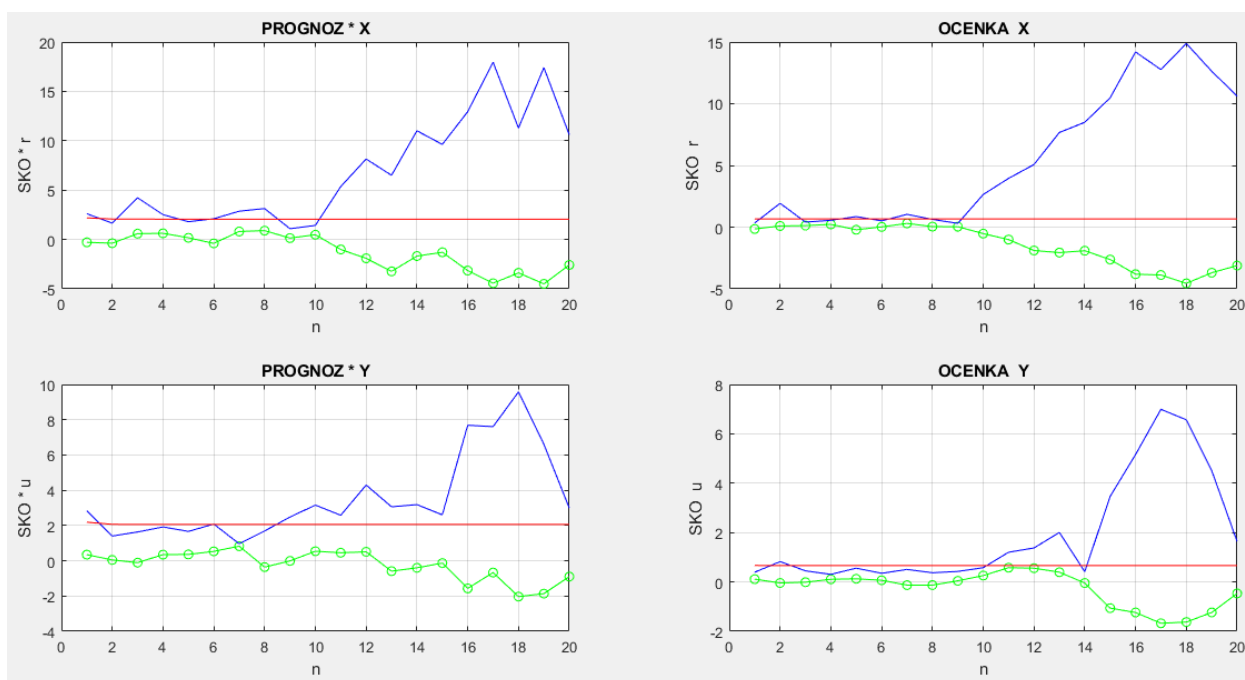


Рис. 6.18

З використанням методу Монте-Карло було розраховано ймовірність зриву  $p_z$  супроводження БПЛА в залежності від вхідного відношення сигнал/шум  $q$ . Моделювалось переміщення БПЛА без повороту зображень. Еталонне зображення також було спотворене шумом. Рішення про зрив

супроводження приймається за умови виходу тестового зображення за межі стробу супроводження. Результати моделювання наведено в таблиці 3 для трьох тестових зображень:

Таблиця 3. Ймовірності зриву супроводження БПЛА

$\sigma_n$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$p_z, 50 \times 30$	0	0	0	0	0	0.033
$p_z, 25 \times 15$	0	0	0	0	0.13	0.8
$p_z, 10 \times 6$	0	0	0.1	1	1	1

В таблиці 4 для трьох тестових зображень наведено математичні очікування  $m_t$  і СКВ  $\sigma_t$  кількості тактів супроводження БПЛА при різних значеннях СКВ похибки шуму  $\sigma_n$ .

Таблиця 4. Середня кількість тактів супроводження БПЛА

$\sigma_n$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$m_t / \sigma_t$ 50x30	20/0	20/0	20/0	20/0	20/0	19.45/3.3
$m_t / \sigma_t$ 25x15	20/0	20/0	20/0	20/0	17.03/5.54	9.55/5.94
$m_t / \sigma_t$ 10x6	20/0	20/0	18.01/5.41	8.15/4.4	3.54/1.29	3.4/2.1

## 7. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНОГО АЛГОРИТМУ

Розглянемо вимоги, що необхідні для реалізації естремально-кореляційного алгоритму для виявлення та стеження БПЛА базуючись на об'ємі обрахунків та пам'яті. У роботі представлені результати комп'ютерного моделювання при тестування розробленого алгоритму зображень із шумом та без шуму, а також із поворотом та без повороту. Головними характеристиками для аналізу складності обрахунків є:

- Обчислювальна потужність;
- Час обчислень;
- Споживна пам'ять;
- Чутливість до шуму;
- Геометрична форма цілі.

За результатами комп'ютерного моделювання у середовищі матлаб встановлено, що чутливість алгоритму до шуму є високою Рис 6.11., а геометричні спотворення значно впливають на результати роботи алгоритму. Для достовірності результатів необхідно знати форму цілі заздалегідь. Іншим параметром є пам'ять, оскільки необхідно зберігати константи. Час обчислень на один крок алгоритму є ще однією важливою характеристикою, що визначається швидкістю ЕОМ та загальним числом операцій. Для більш точного аналізу швидкодії необхідно знати точні характеристики системи ЕОМ, що реалізує даний алгоритм.

Визначимо необхідним об'єм пам'ять ОЗП, що відповідає кількості векторів та матриць, що входять до рівняння алгоритму на основі фільтру Калмана. Використовуючи матричну алгебру, можливо обрахувати кількість необхідних операцій множення і додавання для обчислення оптимальної оцінки за один крок на основі моделей  $\mathbf{u}(k) = \mathbf{F}\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{G}(k)\boldsymbol{\omega}(k)$  і  $\mathbf{u}_И(k) = \mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k)$ , (5.2)-(5.6). У загальному випадку, складність алгоритму

зростає із збільшенням розмірності вхідних даних  $n$ , тим самим збільшуючи час виконання алгоритму.

Розглянемо випадок для змінної  $F(k, k-1)$ , де для кожної із ітерацій  $n$  зовнішнього циклу, виконується внутрішній цикл ту саму кількість разів –  $n$ . Таким чином загальна кількість операцій внутрішнього циклу дорівнює  $n \times n$ . Це і визначає складність даної операції.

Стандартний алгоритм Гауса вимагає для реалізації  $s^3$  ( $S \times S$  є розмірністю матриці) операцій множення і ділення. Обіг матриці виконується за алгоритмом Гауса.

Таблиця 7.1. Кількість операцій для кожного із параметрів алгоритму.

Змінна алгоритму	Розмірність вхідних даних	Необхідне число комірок ЗП
$F(k, k-1)$	$n \times n$	$n^2$
$K(k)$	$n \times s$	$ns$
$s(k)$	$s \times 1$	$s$
$H(k)$	$s \times n$	$sn$
$R(k)$	$s \times s$	$s^2$
$G(k)$	$n$	$n$
$Q(k)$	$r \times r$	$r^2$
$\mathbf{u}(k)$	$n \times 1$	$n$
$\mathbf{u}_И$	$n \times 1$	$n$

Зауважимо, що для оцінки порядку складності операції необхідно враховувати лише ту частину, що зростає найшвидше. Розгляд швидко зростаючої функції дозволяє оцінити поведінку алгоритму при збільшенні  $n$ . У випадку фільтра Калмана, найбільш складними частинами програми є виконання циклів та виклик процедур. Якщо одна процедура викликає іншу, то необхідно уважно оцінити складність останньої. Якщо в ній буде

виконуватися  $n$  процедур, то функція значно збільшує складність усього алгоритму. Оскільки фільтр Калмана є лінійним, коефіцієнт підсилення може бути розрахований заздалегідь, а тому не впливати на обчислювальну складність алгоритму. Таким чином варто брати до розрахунків лише поточні оцінки алгоритму, тобто два останні рядки таблиці, рівняння (5.2)-(5.6). В таблиці 7.2. приведена необхідна кількість операцій для кожного із параметрів алгоритму, де  $mr$  – порядок фільтру.

Таблиця 7.2

Параметр	Кількість операцій множення	Кількість операцій додавання
$\mathbf{u}(k)$	$m_r^2$	$m_r^2 - m_r$
$\mathbf{u}_И(k)$	$2m_r$	$2m_r$
Разом	$M(mr) = mr^2 + 2mr,$	$A(mr) = mr^2 + 2mr - mr.$

Представимо результати таблиці 7.2 у матричному вигляді згідно таблиці 7.1:

$$M(n, s) = n^2 + 2ns, \quad (8.1)$$

$$A(n, s) = n^2 + 2ns - n. \quad (8.2)$$

У даній роботі розглядався випадок:

$$M(4, 2) = 32, \quad (8.1)$$

$$A(4, 2) = 28.$$

Всього операцій:  $\Sigma = M(4, 2) + A(4, 2) = 60$  . Одна операція комплексного множення виконується за одну операції множення і одну операцію додавання. Одна операція комплексного додавання виконується за дві операції додавання. Тому за один такт виконання алгоритму необхідно виконати 64 операції множення та 84 операцій додавання. Розрахунки виконуються для випадку виявлення у супроводження однієї цілі, у реальному масштабі часу може виконуватися 1000 операцій при

мінімальній швидкості надходження інформації 1 с. Типова смуга частот радіолокаційного сигналу дорівнює 2 мГц. Тому тактова частота дискретизації складає 500 нс. Якщо врахувати, що за один такт виконується 5 операцій множення або додавання, то 64 операції множення та 84 операції додавання виконуються за 14,8 нс. Це дозволяє виконувати обробку сигналів у реальному масштабі часу.

Серед сучасних DSP процесорів для обробки чисел з плаваючою точкою можна виділити моделі компаній Analog Devices [10], у рамках поставленої задачі для вимірювань і комплексної обробки інформації може бути використаний сигнальний процесор ADSP-SC570. Даний чіп має два DSP ядра з супергарвардською архітектурою та одне ядро ARM, швидкість обчислень будуть забезпечувати ядра SDP, дана архітектура є однією із останніх модифікацій ядра для DSP, що призначена для реалізації складних алгоритмів обробки сигналів. Ядро ARM може виконувати задачі по надсиланню даних на сервер, робота з пам'яттю, різне оповіщення, і забезпечувати наступний цикл обробки радіолокаційної інформації [10]. Тактова частота даного процесору досягає 500 МГц, від частоти буде залежати швидкодія і потенціал, тобто скільки інформації він зможе обробити за одиницю часу. Структурна схема [10] ADSP-SC570 представлена на рис. 8.1.

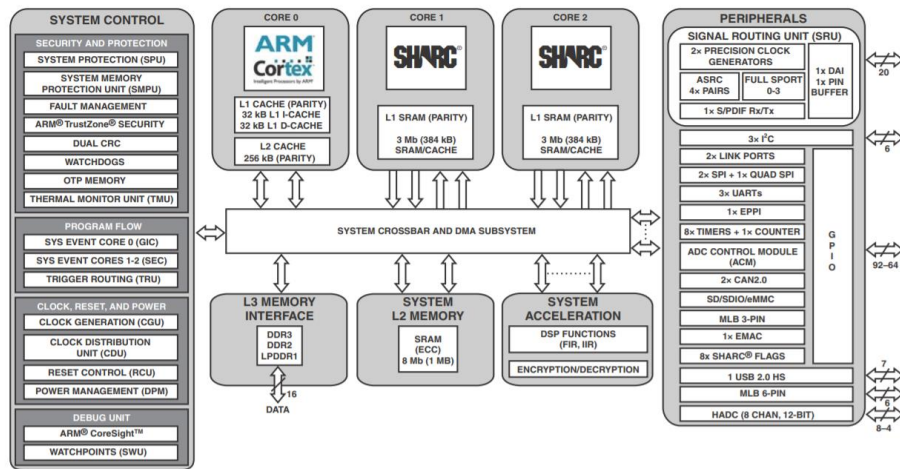


Рис. 8.1 Структурна схема процесору ADSP-SC570

## 8. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «АЛГОРИТМ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОГО СТЕЖЕННЯ ЗА БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ ЗА ДАНИМИ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕНЬ»

У даному розділі буде розглянуто питання реалізації «Алгоритм кореляційно-екстремального стеження за безпілотним літальним апаратом за даними відеоспостережень» у якості стартап-проекту. Процес поділяється на наступні етапи [11]:

1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту, що включає опис самої ідеї, визначаються напрями використання, аналізуються ринкові можливості, та розробляється стратегія ринкового впровадження.

2. Організація стартап-проекту, в межах якого складається календарний план-графік, розраховуються потреби проекту, обраховується плановий обсяг та розраховуються потреба в матеріальних та людських ресурсів, та розраховуються початкові витрати.

3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту, що передбачає визначення інвестиційних витрат, обрахування фінансово-економічних показників (обсяг, собівартість, ціна реалізації, чистий прибуток, тощо), визначається рівень ризику проекту, шляхи їх запобігання та заходи комерціалізації проекту.

В межах даного розділу розглядається лише перший етап розроблення стартап-проекту [11], а саме розгляд маркетингових сторін впровадження стартапу, опису його ідеї, концепції майбутнього продукту, визначення переваг та майбутні перспектив.

### 8.1 *Опис ідеї проекту*

<b>1. Назва проекту</b>	Алгоритм кореляційно-екстремального стеження за безпілотним літальним апаратом за даними відеоспостережень
-------------------------	--



<b>2. Автори проекту</b>	Литвинець О.Л.
--------------------------	----------------

<b>3. Коротка анотація</b> <i>(не більше 1/3 сторінки)</i>	<p>Під час роботи над магістерською роботою було розроблено алгоритм кореляційно-екстремального стеження за безпілотним літальним апаратом за даними відеоспостережень. Для реалізації даного алгоритму було розроблено код програми.</p> <p>Даний стартап проекту впроваджує продаж та вивід на світовий ринок алгоритму, оскільки результати тестування показали та підтвердили його працездатність. Також розроблено програмне забезпечення для даного алгоритму.</p>
---	--

<b>4. Термін реалізації проекту</b>	12
	<i>Тривалість проекту (в місяцях)</i>

<b>5. Необхідні ресурси</b>	<p><b>Інтелектуальні:</b> робота інженера – конструктора(15 000-20 000грн.), робота ІТ-спеціаліста(20 000-25 000грн.), робота менеджера(10 000 грн.).</p> <p><b>Матеріальні:</b> ПК</p> <p><b>Фінансові:</b> ~ 75 000 грн</p>
	<i>Перелік усіх необхідних ресурсів (фінансових, матеріальних інтелектуальній та ін.)</i>

<p><b>6. Опис проблеми, яку вирішує проект</b></p>	<p>Необхідність у використанні методів виявлення та супроводження зростає у зв'язку з розширенням області застосування БПЛА, що можуть бути об'єктами-правопорушниками. Підвищення ефективності оптико-електронних систем необхідно для задач охорони та захисту закритих територій від несакціонованого проникнення, забезпечення їх приватності від безпілотних літаючих апаратів.</p> <p>Головним продуктом є програмне забезпечення та алгоритм виявлення на супроводження БПЛА.</p>
--	--

<p><b>7. Головні цілі та завдання проекту</b></p>	<p>Цілями та завданнями є: виявлення нерухомих, рухомих, або тих, що з'являються на зображенні об'єктів, задачі оцінки параметрів, що характеризуються об'єкт, задачі оцінки параметрів, що характеризуються об'єкт, задачі слідкування та супроводження об'єктів, що включає в себе визначення координат, траєкторії та параметрів руху, задачі аналізу заводової обстановки.</p>
---	--

<p><b>8. Очікувані результати</b></p>	
<p><i>(Описати позитивні зміни, які відбудуться в результаті реалізації проекту після його завершення та в довгостроковій перспективі)</i></p>	
<p>Даний проект застосовується на виявлення та супроводження об'єктів. Об'єктами в межах даних задач зазвичай є літаки, гелікоптери, автомобілі, морські судна, люди і безпілотні літаючі об'єкти, зокрема дрони.</p> <p>Даний проект застосовується для подальших напрямів:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Радіолокаційна станції розвідки повітряних та балістичних цілей.</li> <li>- Мобільні радіолокаційні системи.</li> </ul>	

- Берегові оглядові радіолокаційні системи.

Таблиця 8.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Програмне забезпечення для виявлення на супроводження БПЛА	1. У військових радіолокаційних системах	ціна, індивідуальний підхід, висока надійність, висока продуктивність
	2. У громадських аеропортах	
	3. Для приватних особистостей	
	4. Для державних підприємств на установах	

Програмне забезпечення розробляється на основі досліджень даної магістерської роботи.

### 8.2 Технічний аудит ідеї проекту

Для подальшого реалізування стартап-проекту, необхідно провести технічний аудит технології, що складається із визначення переваг даного проекту.

Таблиця 8.2.1 – Переваги для реалізації стартап-проекту

№	Показники стану ринку(найменування)	Характеристика
n/n		

1	Ціна готового продукту (проект системи із програмним забезпеченням)	2 млн. грн. на противагу ціні аналогу, яка складає ~ 6 млн. грн.
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
3	Багатозадачність	Система здатна працювати одночасно з 63 радіолокаційними системами.
4	Висока продуктивність	Обробка 1000 цілей за мінімальний час
5	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	70% в межах України 90% на міжнародному ринку
6	Економічність	Для реалізації необхідна мала кількість обчислювальних машин

Технологічна реалізація проекту можлива наступним шляхом:

- моделювання;
- проектування;
- збірка програмних продуктів на раніше створених компонентах.

Перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 8.2.2 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>

1	Актуальна задача	Наразі виявлення та супроводження БПЛА є актуальною задачею, оскільки кількість БПЛА зростає, а їх контроль зменшується.
2	Новизна	Застосування систем виявлення та супроводження БПЛА приваблює потенційних закордонних клієнтів своєю новизною.
3	Гнучкість	Можливість зміни параметрів алгоритму, оскільки використовуються цифрові технології

Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення.

### 8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням станку ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Таблиця 8.3.1– Фактори можливості

№	Фактор	Зміст	Можлива реакція
---	--------	-------	-----------------

<i>n/n</i>		<i>можливості</i>	<i>компанії</i>
1	Вихід на міжнародний ринок	Запропонувати алгоритм та програмне забезпечення закордонним компаніям, що мають необхідне обладнання.	Успішна реалізація алгоритму, що збільшить точність визначення БПЛА, зменшить ймовірність зриву супроводу цілі.

За результатами аналізу таблиці 8.3. можна сформулювати висновок, що стартап-проект є конкурентоспроможним та вартий вкладу у його реалізацію не тільки на ринку України, а і для іноземних компаній.

Аналіз пропозиції:

Таблиця 8.3.2 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - монополія	Пропонуються інші алгоритми.	Впливає, зменшити ймовірність зриву супроводження цілі.
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний	Конкуренція зі світовими фірмами	Впливає, зменшити ймовірність зриву супроводження цілі.
3. За галузевою ознакою - внутрішньо галузева	Вузькоспеціалізований алгоритм	впливає
4. За характером	цінова	Зменшити ціну

конкурентних переваг - цінова / нецінова		
5. За інтенсивністю - марочна		Зробити власний бренд

#### 8.4 Розробка ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкових стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 8.4.1 – вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних споживачів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієн тован ий попи т в межа х цільов ої групи</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1.	Фізичні особи	Фізичні та приватні особи складають середні попит даного стартап-проекту, оскільки люди намагаються захистити свої приватні життя і території, а дрони є загальнодоступною технологією, для застосування якої не	50%	Наявна висока конкуренція.. Конкуренція полягає в тому, що на даний момент існує широкий вибір інших систем виявлення на	Просто, оскільки замовлення звичайних користувачів зазвичай відбувається у більше простих умовах з не такою динамічно

		потрібно мати спеціальних навичок і знань. Таким чином це питання є актуальним для приватних особистостей.		супроводженн я БПЛА о з новим продуктом є складною задачою.	ю ситуацією.
2.	Державні підприємства, установи та структури	Безпека державних установ є актуальним питанням для України на сьогоднішній день. Тому даний продукт є орієнтований на державні підприємства, зокрема державні військові структури, такі як ЗБУ, Служба Безпеки України, Внутрішні Війська Міністерства Внутрішніх Справ України, Державні прикордонні Служби, розвідувальні служби та спец підрозділи інших військових установ України. Перелічені державні є основними клієнтами стартап-проекту.	50%		Складно, але потрібно акцентувати увагу державних установ на перевагах даного продукту над аналогами
Які цільові групи обрано:					
Фізичні особи та державні підприємства.					



Використовується стратегія диференційного маркетингу. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку.

Таблиця 8.4.2 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1.	Вихід на внутрішній та зовнішній ринок шляхом реклами на тематичних	Наочна демонстрація переваг запропонованого алгоритму, реклама з вуст клієнтів та потенційних партнерів	Ефективність роботи алгоритму, його гнучкість	Стратегія спеціалізації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки .

Таблиця 8.4.3– Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих конкурентів</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і як?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки</i>
1	ні	так	Ні, не буде, оскільки алгоритми є	Стратегія наслідування лідеру

			унікальними	
--	--	--	-------------	--

Розробляється стратегія позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 8.4.4 – Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стратан проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувані комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Забезпечувати високий рівень виявлення БПЛА, їх супроводження та низьку ймовірність зриву цілі.	Стратегія спеціалізації	Ефективність роботи алгоритму, його гнучкість	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. унікальність алгоритму</li> <li>2. потрібність у будь-якій сфері (актуальність)</li> <li>3. новітність (використання цифрових технологій)</li> </ol>

### 8.5 Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Розробляється тривимірна маркетингова модель товару: уточняється ідея продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання.

Таблиця 8.5.1 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I Товар за задумом	Алгоритм виявлення та супроводження БПЛА		
II Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. гнучкість у застосуванні	Нм	Вр, Тх,
	2. Гарна фільтрація фону	М	Тл
	3. Стабільність роботи	М	Тх, Тд Тх, Тл
	Якість: постійне оновлення програмного забезпечення, тестування кожного оновлення		
	Пакування: програмне забезпечення		
III Товар із підкріпленням	передплата		
	гарантія		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Розроблено програмне забезпечення, що не дозволяє не працівникам компанії дивитися, редагувати, копіювати код програм. Доступ буде наданий до певних областей, що задовольняють потреби клієнта (зміна характеристик та параметрів використовуваної антени)			

#### 8.5.2 Визначення цінових меж.

№ n/n	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачі	Верхня та нижня межа встановлення ціни на товар/послугу
1	2-3 тисячі	2-3 тисячі	Фінансування	4 тисячі

	доларів	доларів	державою (секретна інформація)	доларів
--	---------	---------	--------------------------------------	---------

### 8.5.3 - Визначення оптимальної системи збуту.

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Пропонується продаж програмного забезпечення, заснований на використанні алгоритму	Встановити програмне забезпечення	Роздрібна торгівля	Прямий продаж клієнтам

### 8.5.4- Розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування.

<i>№ n/ n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікації, якими користують ся цілові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонуван ня</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концеп ція рекламн ого звернен ня</i>
1	Не знайомі з системами виявлення та супроводження БПЛА	Інтернет, пряма комунікація шляхом виставок, відгуки клієнтів	Тематичні виставки, семінари, конференції	Продемонструвати переваги алгоритму	Показ досягнених результатів тестування

## 8.6 *Висновки*

У даному розділі магістерської дисертації було проведено аналіз власного виробу у якості стартап-проекту:

- Проведено маркетинговий аналіз стартап-проекту, що включає опису самої ідеї проекту, напрями використання, обговорена унікальність та переваги даного проекту.

- Проаналізовано ринкові можливості щодо його реалізації, аналіз конкурентної бази та визначення цільових категорій.

- Розроблено маркетингову програму проекту, на основі якої визначаються стратегії охоплення ринку.

- Найявний попит та динаміка ринку, оскільки приватність життя та територій є надзвичайно важливою сферою, а в умовах вільного доступу до безпілотних літальних апаратів, дана концепція зростає у своїй актуальності. Даний алгоритм та його програмне забезпечення гарантує виявлення та супроводження БПЛА.

## ВИСНОВОК

В результаті досліджень, вирішена актуальна наукова задача покращення характеристик виявлення та супроводження безпілотних літальних об'єктів, шляхом розробки екстремально-кореляційного алгоритму.

Основні наукові та практичні результати роботи:

Важливим напрямком розвитку радіолокаційної техніки є відстеження БПЛА і контроль за дозволеною для них діяльністю. Оскільки малорозмірні БПЛА можуть виконувати ряд небезпечних задач (транспортування вибухових речовин, вчинення терористичних актів), а також бути використаними у цілях несанкціонованого проникнення, шпигунства, порушень та слідкування, у провідних країнах світу гостро поставлене питання розробки протидронових систем, що слугують для запобігання вище згаданих загроз. У зв'язку з цим, протидронові системи і спеціалізоване озброєння, призначене для знищення безпілотників, стрімко наповнює світовий ринок.

Для вирішення задачі автоматичного виявлення та супроводження БПЛА застосовуються широкопольні (панорамні) і вузькопольні системи відеоспостереження. Задача автоматичного виявлення об'єктів розбивається на два етапи. На першому етапі вирішується задача виділення області руху. На другому етапі алгоритму виконується виявлення БПЛА шляхом рішення задачі виявлення траєкторії руху типових об'єктів.

Для реалізації автоматичного супроводження рухомих об'єктів найбільш часто використовуються кореляційно-екстремальний алгоритм супроводження. Принцип роботи цифрової телевізійної кореляційно-екстремальної системи супроводження за даними відеоспостереження заснований на зіставленні фрагменту зображення об'єкту, що спостерігається, з еталонним зображенням, яке отримано у результаті автоматичного виявлення та розпізнавання цілі.

Для оцінки ступеня подібності зображень, використовується взаємнокореляційна функція. Естремум максимум функції знаходиться у тій області, де зображення співпадають найбільше. Можна поліпшити міру кореляції таким чином, щоб в ній враховувалися статистичні властивості зображень. Практично це зводиться до попередньої фільтрації зображень.

Одним із основних алгоритмів фільтрації вважається фільтр Калмана, коли задано апіорно відому інформації про характеристики системи, що збільшує точність обчислень.

Метод фільтрації Калмана базується на двох повторюваних кроках, першим з яких є передбачення, а другим корегування даних. Під час передбачення розраховується прогноз для наступного моменту часу, а на наступному кроці отримана інформація корегує зроблений прогноз і змінює ефективну смугу пропускання в процесі, що збільшує точність алгоритму.

Для реалізації екстремально-кореляційного алгоритму для виявлення та супроводження БПЛА створено програмне забезпечення у середовищі Matlab для дослідження його характеристик та моделювання поведінки оптико-електронної системи.

Дослідження було проведено для зображень різної розмірності (50 на 30 пікселів, 25 на 15 пікселів, 10 на 6 пікселів) для ситуацій із та без повороту дрона. В якості завади використовувався дискретний білий гаусівський шум. Повне співпадіння еталону із поточним зображенням практично не буває через постійну наявність шумів, завад і спотворень.

Наявність шуму призводить до зменшення коефіцієнту кореляції зображень, а також до появи додаткових локальних екстремумів. При зменшенні розміру зображення (енергії сигнальної складової) вплив шуму збільшується. Наявність локальних екстремумів призводить до можливих похибок (хибних рішень) у визначенні зсуву поточного зображення відносно еталонного зображення.

Головним недоліком кореляційних методів зіставлення зображень є їх висока чутливість до геометричних спотворень у порівнянні з еталонним, зокрема у випадку ракурсних спотворень при повороті об'єкта слідкування.

Для реалізації екстремально-кореляційного алгоритму за один такт виконується 5 операцій множення або додавання, тому 64 операції множення та 84 операції додавання виконуються за 14,8 нс. Серед сучасних DSP процесорів для обробки чисел з плаваючою точкою можна виділити моделі компаній Analog Devices. Тому для практичної реалізації поставленої задачі може бути використаний сигнальний процесор ADSP-SC570, тактова частота даного процесору досягає 500 МГц.

Сукупність отриманих в роботі наукових результатів, можна вважати сформульовану наукову задачу – покращення характеристик виявлення та супроводження малорозмірних безпілотних літальних апаратів, шляхом розробки екстремально-кореляційного алгоритму – досягнутою.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Алгоритмическое обеспечение оптико-электронных систем комплекса защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов / В.А. Бондаренко, Г.Э. Каплинский, В.А. Павлова, В.А. Тупиков // Известия ЮФУ. Технические науки.
2. Все, что вам нужно знать о дронах [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rb.ru/story/all-about-drones/> (27.10.20). — Загл. с экрана.
3. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Бабаян, Алпатов, Стапашкин, Балашов// Москва, 2008.
4. Телевизионные методы сопровождения объектов в сложных условиях наблюдения / в. И. Можейко, н. А. Обухова, б. С. Тимофеев, В. Т. Фисенко, т. Ю. Фисенко // Изв. Вузов. Приборостроение, 2009
5. Анализ алгоритмов обнаружения и измерения координат объектов в оптико-электронных системах / О.В. Корзунов, А.И. Лужинский // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 12. Ч. 3.
6. Алгоритмы совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов / Я.Н. Кожушко // Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков, 2007.
7. Обнаружение и сопровождение объектов в бортовых системах обработки изображений / А. П. Кирпичников, С. А. Ляшева, М. П. Шлеймович.
8. Волшебство корреляционного анализа. Часть 1. / Центр перспективных технологий, выпуск №003 /
9. Варфоломеев А. Ю. Методы та алгоритми автоматичного відслідковування об'єктів на відеопослідовностях: Монографія – 100 с.
10. Analog Devices / SHARC+ Dual-Core DSP with ARM Cortex-A5 // 2018.
11. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.