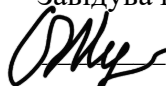


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Радіотехнічних пристроїв та систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЖУК

«12» квітня 2021р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

«Радіотехнічні інформаційні технології»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Алгоритм відеостеження за безпілотним літальним апаратом з
використанням міжкадрових різниць»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи РТ-71
Неделяй Анастасія Костянтинівна



Керівник:

д.т.н., проф.,
Жук Сергій Якович



Рецензент:

ст.в.каф.ТОР
Булашенко Андрій Васильович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Радіотехнічних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні інформаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЖУК

«12» квітня 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Неделяй Анастасії Костянтинівні

1. Тема роботи «Алгоритм відеостеження за безпілотним літальним апаратом з використанням міжкадрових різниць», керівник роботи Жук Сергій Якович, д.т.н., проф.,
затверджені наказом по університету від «18» травня 2021 р. №1205-с
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2021р.
3. Вихідні дані до роботи: тактико-технічні характеристики та зображення типових малорозмірних БПЛА, характеристики оптичних систем відеоспостереження.
4. Зміст роботи: провести аналіз систем відеостеження; виконати аналіз методу виділення рухомих об'єктів на послідовності відеозображень з використанням міжкадрових різниць; розглянути можливості застосування методу калманівської фільтрація для стеження за об'єктом; розробити алгоритм відеостеження за БПЛА з використанням міжкадрових різниць; оцінити ефективність розробленого алгоритму за допомогою моделювання на ЕОМ.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 21 ілюстрація, презентація 18 слайдів

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 12 квітня 2021р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз існуючого матеріалу	20.04.2021	
2.	Аналіз актуальності заданої теми	26.04.2021	
3.	Аналіз систем протидії малорозмірним БПЛА	03.05.2021	
4.	Дослідження застосування оптико-електронних систем стеження	06.05.2021	
5.	Аналіз методу виділення рухомих об'єктів на послідовності відеозображень з використанням міжкадрових різниць	13.05.2021	
6.	Аналіз методу калманівської фільтрації щодо стеження за об'єктом на послідовності відеозображень	19.05.2021	
7.	Розробка алгоритму відеостеження за БПЛА з використанням міжкадрових різниць	27.05.2021	
8.	Аналіз розробленого методу за допомогою статичного моделювання	02.06.2021	
9.	Аналіз точності розробленого алгоритму	06.06.2021	

Студент



Анастасія НЕДЕЛЯЙ

Керівник



Сергій ЖУК

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота на тему «Алгоритм відеостеження за безпілотним літальним апаратом з використанням міжкадрових різниць» складається з 5 розділів, 60 сторінок, 1 додатку, 21 ілюстрації по тексту роботи та 2 таблиць. Використано 12 посилань.

Актуальною проблемою сьогодення є розробка систем відеоспостереження для протидії малорозмірним БПЛА. При цьому, однією із основних задач при побудові таких систем є розробка алгоритмів стеження за БПЛА.

Метою дослідження є розробка алгоритму відеостеження за безпілотним літальним апаратом з використанням міжкадрових різниць і аналіз його точностних характеристик.

Об'єкт дослідження – процес відеостеження за малорозмірними БПЛА.

Предмет дослідження – метод відеостеження за малорозмірними БПЛА з використанням міжкадрових різниць.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз систем відеоспостереження для протидії малорозмірним БПЛА;
- виконати аналіз методів виділення рухомих об'єктів на послідовності відеозображень з використанням міжкадрових різниць та калманівської фільтрації щодо стеження за об'єктами;
- розробити алгоритм відеостеження за БПЛА з використанням міжкадрових різниць та провести аналіз його ефективності.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, різницеве зображення, модель руху, фільтр Калмана, відеостеження.

ANNOTATION

The topic of master thesis is “Algorithms for unmanned aerial vehicle video surveillance using inter-frame difference”. The research work consists of 5 paragraphs, 60 pages, 1 appendix, 21 illustrations and 2 tables. In total, 12 references links were used.

An urgent problem today is the development of video surveillance systems to counter small UAVs. At the same time, one of the main tasks in the construction of such systems is the development of UAV tracking algorithms.

The aim of the work is to develop a video surveillance algorithm for an unmanned aerial vehicle using inter-frame differences and analysis of its accuracy characteristics.

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

The research subject is the methods of monitoring UAVs by the video surveillance system using inter-frame difference.

To achieve these goals have been resolved following tasks:

- to analyze video surveillance systems to counteract small UAVs;
- to analyze the methods of selection of moving objects on the sequence of video images using inter-frame difference and Kalman filtering for object tracking;
- to develop an algorithms for unmanned aerial vehicle video surveillance using inter-frame difference and to analyze its effectiveness.

Key words: unmanned aerial vehicles, difference image, motion model, Kalman filter, video surveillance.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
1 Актуальність розробки систем відеоспостереження для протидії малорозмірним БПЛА.....	10
2 Аналіз методу виділення рухомих об'єктів на послідовності відеозображень з використанням міжкадрових різниць.....	23
3 Аналіз методу калманівської фільтрації щодо стеження за об'єктами на послідовності відеозображень.....	31
4 Розробка алгоритму відеостеження за безпілотним літальним апаратом з використанням міжкадрових різниць.....	40
5 Аналіз розробленого алгоритму відеостеження за БПЛА з використанням міжкадрових різниць.....	48
Висновки.....	57
Перелік джерел посилань.....	59
Додаток А.....	61

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ГШ – гаусівський шум;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

МРС – міжкадровий різницевий сигнал;

ОЕР – оптико-електронна розвідка;

РЛС – радіолокаційна станція;

СКВ – середнє квадратичне відхилення;

СК – система координат;

ЩЙ – щільність ймовірності.

ВСТУП

Незважаючи на первісну прерогативу використання БПЛА переважно для вирішення військових завдань, технології малорозмірних БПЛА сьогодні знаходять все більше застосування в багатьох галузях народного господарства, а також для задоволення потреб комерційних і приватних споживачів, а саме: автономне спостереження і моніторинг промислових процесів і навколишнього середовища; аварійно-рятувальні операції; моніторинг надзвичайних ситуацій та їх наслідків; доставка вантажу; охорона об'єктів і районів, т.д..

З іншого боку, розвиток і поширення малорозмірних БПЛА призвели до появи нового класу загроз: шпигунство, тероризм, транспортування заборонених вантажів, ускладнення повітряного руху, пошкодження майна. На сьогодні в провідних країнах світу рішення задач нейтралізації загроз від використання малорозмірних БПЛА і створення відповідних систем захисту виведено на рівень національної безпеки. Тому важливими завданнями є відстеження БПЛА і контроль за дозволеною для них діяльністю.

Важливою складовою системи комплексного захисту від БПЛА є системи відеоспостереження. Для реалізації супроводу рухомих об'єктів застосовується метод міжкадрових різниць, який дозволяє ефективно виявляти такі об'єкти на неоднорідному незмінному фоні. В основу методу покладено знаходження різницевого зображення на основі сусідніх кадрів відеопослі-довності.

Метою дослідження є розробка алгоритму відеостеження за безпілотним літальним апаратом з використанням міжкадрових різниць і аналіз його точностних характеристик.

Об'єкт дослідження – процес відеостеження за малорозмірними БПЛА.

Предмет дослідження – метод відеостеження за малорозмірними БПЛА з використанням міжкадрових різниць.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз систем відеоспостереження для протидії малорозмірним БПЛА;
- виконати аналіз методу виділення рухомих об'єктів на послідовності відеозображень з використанням міжкадрових різниць;
- виконати аналіз методу калманівської фільтрації щодо стеження за об'єктами на послідовності відеозображень;
- розробити алгоритм відеостеження за безпілотним літальним апаратом з використанням міжкадрових різниць;
- провести аналіз розробленого алгоритму відеостеження за БПЛА з використанням міжкадрових різниць.

1 АКТУАЛЬНІСТЬ РОЗРОБКИ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ ПРОТИДІЇ МАЛОРОЗМІРНИМ БПЛА

Не дивлячись на первісну прерогативу використання для вирішення військових завдань, технології безпілотних літальних апаратів (БПЛА) – дронів – сьогодні знаходять все більше застосування у багатьох галузях народного господарства, а також для задоволення потреб комерційних і приватних споживачів. Компанія VI Intelligence прогнозує, що в 2021 році рівень продажів комерційних дронів перевищить \$12 мільярдів, що еквівалентно сукупному відсотку росту 7,6% по відношенню до \$8,5 мільярдів у 2016 [1].

Одна з основних загроз, що інтенсивно розвивається як у військовій, так і в громадянській сферах діяльності, це малорозмірні комерційні БПЛА. Передумовою цього, перш за все, є мініатюризація і здешевлення електронних компонентів, таких як мікропроцесори, сенсори, елементи живлення і системи безпроводного зв'язку. Комерційний ринок БПЛА відкриває широкий доступ до даної технології для приватних споживачів, урядових і неурядових організацій, здешевлює їх виробництво при одночасному розширенні можливостей і поліпшенні характеристик.

Починаючи з середини 2000-х років в засобах масової інформації стали регулярно з'являтися повідомлення про небезпечність використання малих БПЛА в районах аеропортів, а з середини 2010-х – про застосування малих БПЛА для ведення несанкціонованого спостереження важливих об'єктів, проведення терактів і диверсій, транспортування заборонених вантажів (зброї, наркотиків), і широке використання БПЛА у військовій справі.

На сучасному етапі розвитку БПЛА призначені для вирішення широкого спектра завдань: спостереження (розвідки), нанесення ударів, транспортування вантажів, цілевказівки іншим засобам ураження,

ретрансляції даних і т.д. при їх дистанційному управлінні оператором, або шляхом автономних дій за задалегідь закладеною програмою.

У більшості випадків БПЛА вирішують такі основні завдання :

- ведення спостереження і розвідки, в тому числі і в реальному часі;
- нанесення ударів по наземним/надводним цілям, самостійно або носійними засобами ураження;
- постановка радіоелектронних перешкод;
- цілевказівки для інших засобів ураження, а також коригування їх застосування;
- транспортування і доставка вантажів і засобів в заданий район;
- ретрансляція даних між віддаленими абонентами мереж зв'язку;
- відволікання уваги або використання їх в якості помилкових повітряних цілей.

Терористичні угруповання і особи, які ведуть протизаконну діяльність, застосовують БПЛА (переважно – малі БПЛА) для вирішення наступних завдань:

- доступу за периметр охоронюваних об'єктів і ведення там спостереження;
- точкове знищення окремих важливих осіб;
- закидання саморобних засобів ураження;
- нанесення ушкоджень будівлям, пам'ятникам культури, об'єктів інфраструктури і транспортних засобів;
- транспортування заборонених засобів або їх закидання на територію, що охороняється;
- перешкоджання повітряному руху в аеропортах.

За типом платформи МНМ БПЛА поділяються на:

- БПЛА літакового типу (ЛТ), Які мають фіксоване крило и часто вимагають для запуску злітно-посадкову смугу або спеціальний катапультуючий пристрій.

– БПЛА роторного типу (РТ), також відомі як гвинтокрили або БПЛА з вертикальним зльотом і посадкою, перевагами яких є можливість зависання в повітрі і висока маневреність. Ці якості обумовлюють широке застосування платформ даного типу для вирішення ряду практичних завдань. У таких БПЛА можуть бути різні конфігурації: з головним і рульовим гвинтами (звичайний вертоліт), співвісними гвинтами, тандемними гвинтами, мультироторами і т. д.

В табл.1 наведено категорії малорозмірних БПЛА залежно від максимальної злітної ваги (МЗВ) і основних характеристик, властивих усім типам платформ [2].

Таблиця 1 – Категорії МНМ БПЛА

Категорії	МЗВ [кг]	Тип	Навантаження [кг]	Дальність дії [км]	Швидкість [км/год]	Тривалість польоту [год]	Висота [км]
Нано	< 0.5	МК, ЛТ, РТ	< 0.1	< 1.5	0...80	< 0.5	< 0.1
Мікро	< 2	ЛТ, РТ	< 1	< 10	0...100	< 1.5	< 1.5
Міні легкі	< 10	ЛТ, РТ	< 5	< 25	0...150	< 3	< 3
Міні важкі	< 20	ЛТ, РТ	< 12	< 50	0...180	< 5	< 4

Основними перевагами БПЛА, що ускладнюють їх виявлення і можливість протидії, є:

1. Можливість віддаленого виконання завдань на безпечній відстані для оператора та надання оператору інформації про хід виконуваного завдання практично в реальному часі.

2. Застосування широкого спектра малогабаритних цільових навантажень на сучасній елементній базі (радіолокаційних станцій (РЛС), засобів радіоелектронної розвідки (РЕР), бойових частин зі спрямованим ураженням і ін.).

3. Можливість тривалого перебування над зоною бойових дій, а також можливість самостійного придушення або ураження засобів протиповітряної оборони (ППО).

4. Низька помітність БПЛА в радіолокаційному та оптичному діапазонах за рахунок більш низьких масогабаритних характеристик в порівнянні з пілотованими літальними апаратами (ЛА), і широкого застосування в конструкції БПЛА пластикових і композитних матеріалів.

5. Можливість здійснювати маневри з високими перевантаженнями і використовувати режими польоту, що призводять до зниження ефективності існуючих і перспективних засобів ППО – можливість польоту на гранично малих висотах (до 50 м) з використанням захисних властивостей рельєфу місцевості, а також на низьких швидкостях польоту (10-30 м / с). При цьому більшість сучасних ЗРК мають обмеження на обстріл повітряних цілей при їх мінімальній висоті до 1 км і мінімальній швидкості до 100 м/с. Крім того, при прийомі відбитих сигналів РЛС від малорозмірних, малошвидкісних БПЛА можливо їх потрапляння в строб захисту РЛС від пасивних перешкод і стаціонарних предметів (що робить БПЛА нерозпізнаними для РЛС на фоні місцевості або в хмарі пасивних перешкод).

6. Малі геометричні розміри, що зумовлюють низькі значення ймовірностей поразки снарядами зенітної артилерії, а також призводять до неспрацьовування радіодетонаторів зенітних керованих ракет (ЗРК) при їх підльоті в район малорозмірної цілі.

7. Скритність застосування БПЛА, що забезпечується відносною безшумністю їх двигунів, а також за рахунок польоту в режимі «радіомовчання» до виходу їх в зону безпосереднього бойового застосування.

Специфіка льотно-технічних характеристик БПЛА обумовлює ряд додаткових, вкрай важливих, переваг їх побудови і експлуатації:

1. Застосування класичної аеродинамічної схеми, яка забезпечує стійкість і простоту управління.

2. Можливість оснащення БПЛА електричними двигунами, що вигідно відрізняються простотою в експлуатації.

3. Можливість використання нетрадиційних видів енергії для двигунів (сонячні батареї, криогенне паливо та ін.), що дозволяють застосовувати БПЛА без обмеження їх польоту за часом.

4. Значне зниження загального рівня витрат пов'язаних з перекиданням і тимчасовим базуванням досить компактних підрозділів БПЛА в райони бойового призначення, ремонтом та обслуговуванням БПЛА і забезпеченням апаратури в польових умовах.

5. Низька вартість розробки і експлуатації БПЛА, яка менша за вартість сучасних пілотованих ЛА, що виконують багато аналогічних бойових завдань. При цьому зберігаються дорогий льотний склад, літаки, вертольоти та ін.

Перспективним напрямком підвищення ефективності БПЛА є групове застосування малих дешевих БПЛА у вигляді «зграї» («рою»), коли вони об'єднуються в групи і за умови чіткого розподілу ролей. Такі групи БПЛА за рахунок своєї масовості можуть ефективно долати засоби радіоелектронної протидії РЕП і ППО і виконувати різні бойові завдання.

Основними недоліками БПЛА є:

1. Обмеження щодо застосування в залежності від часу доби і погодних умов для окремих категорій БПЛА.

2. Низька інтелектуальність дій в автономному режимі.

3. Низька зашифрованість каналів радіокерування (КРК) і передачі даних.

4. Низька живучість конструкції.

5. Схильність КРК і каналу супутникової навігації БПЛА впливу радіоелектронних перешкод.

6. Порівняно невелика дальність дії дистанційного керування БПЛА з пунктів управління (ПУ) при відсутності додаткових засобів ретрансляції.

7. Обмеження по масі і складу корисного навантаження.

Засобами виявлення БПЛА, які використовують відповідні демаскуючі ознаки можуть бути:

- засоби радіолокаційної розвідки (РЛР) – різні РЛС;
- засоби радіо- і радіотехнічної розвідки (РРТР) – станції контролю радіовипромінювання, пеленгаторні пости;
- засоби оптико-електронної розвідки (ОЕР) – засоби теле- і фото-спостереження у видимому і інфрачервоному (ІК) діапазоні;
- засоби акустичної розвідки (АР) – мікрофони і звуковловлювачі.

Наведені засоби, як правило, використовуються комплексно, взаємно доповнюючи один одного, при цьому основними засобами цілевказівки для комплексів ППО є засоби РЛР – РЛС, а для комплексів РЕП – засоби РРТР.

У таблиці 2 наведені порівняльні можливості вищевказаних засобів виявлення БПЛА.

Таблиця 2 – Можливості різних типів засобів розвідки при вирішенні завдань, ідентифікації та супроводу малих БПЛА [4]

Характеристика	Радіо		Оптичні			Акусти чні
	Засоби РЛР (РЛС)	Засоби РРТР	Засоби ОЕР у видимому діапазоні	Засоби ОЕР в ІЧ- діапазоні	Лазер ні засоб и	Засоби АР
Виявлення у денний час	+	+	+	–	+	+

Виявлення в нічний час	+	+	–	+	+	+
Виявлення в умовах природніх завад	+	+	+	+	+	+
Виявлення БПЛА серед природніх об'єктів (перш за все - птахів)	–	+	–	–	–	±
Виявлення за складних погодних умов	±	+	–	–	–	–
Ідентифікація БПЛА	–	+	±	±	–	+
Селекція поодиноких та групових цілей	+	+	+	+	+	+
		(по різним каналам)				(для БПЛА різних типів)
Супроводження та формування траєкторії	+	+	+	+	+	+
		(для багатопозиційної системи)				(для багатопозиційної системи)
Дальність дії	висока	висока	середня	середня	середня	низька

Засоби ОЕР видимого діапазону являють собою досить надійний засіб виявлення малорозмірних малошвидкісних БПЛА, що представляють складності для засобів РЛР. Однак, ефективність оптичного виявлення БПЛА істотно залежить від чинників навколишнього середовища, перш за все, від часу доби і погодних умов. Виявлення БПЛА засобами ОЕР допустимо при можливості побудови проекції його візуального вигляду на картинну площину після використання всіх можливих способів підвищення контрастності і відновлення пропущених елементів графічного образу. Збільшення дальності виявлення досягається за рахунок звуження поля зору

засобу ОЕР, зменшення зони його огляду і збільшення часу пошуку. Тому засоби ОЕР у видимому діапазоні являються не надто ефективними пристроями для проведення пошуку БПЛА. Однак, під час надходження зовнішніх цілевказівок, наприклад, від РЛС, ці засоби можуть бути ефективно використані для супроводу БПЛА. У порівнянні з пілотованим ЛА контрастність БПЛА, щодо фону у видимому діапазоні, є невисокою через менші габарити, відсутність на БПЛА світлових маяків, зменшення або відсутність факела двигуна і меншу поверхню відображення. Критерії виявлення і розпізнавання типу БПЛА засобами ОЕР представлені в роботі .

На рис. 1.1 показані границі виявлення БПЛА за даними з роботи . Ці границі розраховані для БПЛА з різними масогабаритними параметрами для ОЕР, який оснащений об'єктивом з кутом поля зору 20° і фокусною відстанню $f = 230$ мм при метеорологічній дальності видимості не менше 100 км (коефіцієнт розсіювання в видимій області спектра $g_n = 0,0392$).

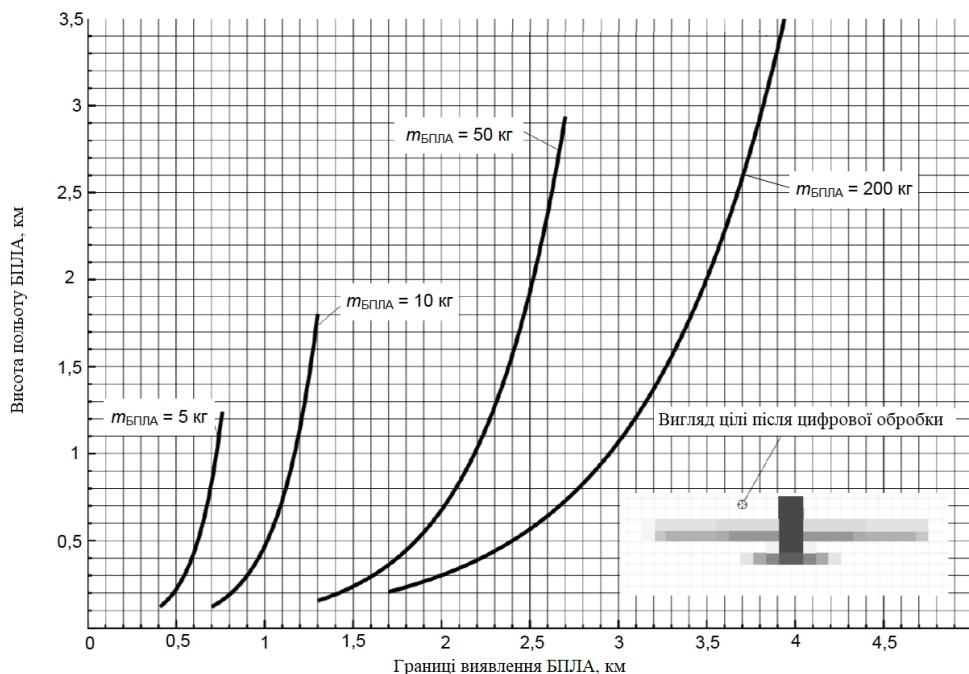


Рисунок 1.1 – Границі виявлення БПЛА засобами ОЕР [4]

Із зазначеними на рис. 1.1 даними узгоджується інформація про розрахункову дальності виявлення БПЛА, що представлена в роботі [5]:

- нано, мікро БПЛА: 300-500 м;
- середні БПЛА (типу «Тахіон», «Орлан»): 500-5000 м.

В працях [6, 7] показано, що за даними полігонних випробувань середня дальність візуального виявлення БПЛА наявними засобами ОЕР становить:

- при спостереженні польоту БПЛА у фронт: 100-400 м;
- при спостереженні з бічних ракурсів: 150-700 м.

Досвід полігонних випробувань показав, при фактичних висотах польоту малих БПЛА 300-1000 м навіть при застосуванні яскравого забарвлення їх візуальне виявлення вкрай ускладнене.

Застосування оптичного збільшення в засобах ОЕР, що використовуються в даний час у вітчизняних ЗРК і ЗАК в якості дублер-прицілів, систем виявлення і супроводу повітряних цілей, дозволяють збільшити дальність виявлення БПЛА в 4,5-14 разів, зокрема [6]:

- при збільшенні 4,5-крат – до 2,2 км;
- при збільшенні 14-крат – до 6,7 км.

Однак очевидно, що при оптичному збільшенні буде знижуватися ймовірність виявлення БПЛА через звуження області оглядового простору [6].

При розгляді зазначених значень необхідно врахувати, що ці дальності отримані для відносно ідеальних погодних умов та відсутності різних випадкових перешкод або шумів, що виникають в ОЕС [6]. Зменшення дальності виявлення в конкретних умовах по відношенню до дальності в наближено ідеальних умовах можна оцінити по зміні сили оптичного випромінювання (потужність випромінювання на одиницю тілесного кута) для приймача засобу ОЕР. Димка, вологість, опади призводять до істотного зниження прозорості атмосфери в областях спектра, в яких працюють приймачі ОЕР, що робить їх застосування неефективним.

Аналізуючи тактико-технічні характеристики (ТТХ) засобів ОЕР додатково необхідно відзначити наступне. У засобах ОЕР з дискретним скануванням, час огляду робочої області (зони, сектори) простору, як

правило, вимірюється одиницями секунд. Так, засіб ОЕР на зенітному ракетно-артилерійському комплексі (ЗРАК) «Палаш / Пальма», при миттєвому полі зору ТВ-системи 2° - 3° , забезпечує виявлення повітряних цілей на дальності 6-10 км, необхідний час автоматичного пошуку в кутовому полі-секторі 60° становить близько 3 с. При азимутальному куті огляду 180° , час одноразового перегляду простору буде наближатися до 10 с, а при азимутальному куті 360° , необхідному, наприклад, для відбиття групової атаки з різних напрямків, час огляду стає неприпустимо великим. Існуючі тенденції розвитку засобів ОЕР припускають перехід до багатоканального виявлення БПЛА, проте, на існуючих комплексах протидії БПЛА такі засоби не отримали широкого поширення.

Крім засобів ОЕР, що працюють у видимому діапазоні, виявлення БПЛА можливо засобами ОЕР, які працюють в ІЧ-діапазоні. Засоби ОЕР ІЧ-діапазону особливо ефективні в нічний час. Тепло від БПЛА виділяється, в основному, силовою установкою і, в меншій мірі, електронними компонентами, а також точками гальмування на несучих краях крил, пропелерів і гвинтів. Розробники БПЛА намагаються знизити випромінювання в ІЧ-діапазоні в напрямку розміщених на землі приймачів і перенапрямити це випромінювання вгору. Крім того, в конструкції БПЛА можуть використовуватися матеріали з високою теплопровідністю, такі як срібло і алюміній. У кожному конкретному випадку можливість БПЛА бути виявленим в ІЧ-діапазоні визначається його тепло-випромінювальною здатністю, контрастом і площею випромінювання.

Необхідно відзначити, що ефективність ОЕР ІЧ-діапазону суттєво залежить від погодних умов. В умовах димки, вологості, опадів помітність БПЛА в ІЧ-діапазоні істотно знижується, особливо для довжин хвиль $\lambda = 0,76 \dots 5$ мкм. Це відбувається тому, що за винятком польоту БПЛА з повітряно-реактивним двигуном (ПРД) на форсованих режимах і БПЛА з ракетним двигуном твердого палива (РДТП), основним джерелом інфрачервоного випромінювання є елементи корпусу БПЛА, які прикривають

відсіки з силовою установкою і деталі вихлопної системи. Проте, ці ділянки конструкції БПЛА відрізняються невисокими значеннями теплових потоків $q \leq 25 \dots 50$ Вт/ср, і, відповідно, низька сила їх випромінювання з урахуванням зниження прозорості атмосфери не дозволяє використовувати ОЕР ІЧ-діапазону для підвищення ймовірності виявлення БПЛА. При цьому БПЛА з електро-двигунами принципово відрізняються гранично низькими рівнями ІЧ-помітності [8].

Додатково потрібно відзначити, що для зниження помітності БПЛА можуть вибиратися профілі і напрямки їхнього польоту, що знижують ефективність засобів ОЕР видимого і ІЧ-діапазону, наприклад, захід на ціль з боку сонця або іншого потужного джерела видимого світла і ІЧ-випромінювання.

Стрімке зростання продуктивності обчислювальних систем дає можливість проектувати і впроваджувати все більш складні відеосистеми виявлення і супроводу рухомих об'єктів. Можна виділити дві характерні риси цих систем технічного зору: необхідність роботи в реальному масштабі часу і автономність режиму функціонування цих систем при незначних зусиллях оператора.

Розглянемо ієрархію рівнів обробки інформації, яка присутня в системах виявлення і супроводу об'єктів. Зазвичай розглядаються такі рівні обробки інформації: відновлення зображень, виділення об'єктів, оцінка параметрів сегментів, стеження за об'єктами, оцінка параметрів, виявлення і розпізнавання. Під сегментом тут розуміється пов'язана сукупність точок бінарного зображення, отриманого в результаті тієї або іншої обробки. Під об'єктами маються на увазі зображення реальних спостережуваних об'єктів. Сегменти бінарного зображення зазвичай є вихідними даними для подальшого виявлення об'єктів.

Ієрархія рівнів обробки інформації в системах виявлення і супроводу об'єктів представлена у вигляді піраміди на рис.1.2. Поруч з блоками, що представляють рівні ієрархії, наведені короткі описи результатів аналізу, що

отримуються на кожному рівні. Відновлення зображень полягає в реконструкції зображення, яке було до цього спотворено внаслідок дефектів і шумів датчика зображення, нерівномірності частотних характеристик каналу передачі і тд. Виділення об'єктів полягає в ухваленні рішення про наявність об'єкта для кожної точки зображення. Оцінка параметрів сегментів полягає у визначенні таких характеристик сегментів як координати центру, розміри, яскравість, форма. Стеження полягає в оцінці траєкторій руху об'єктів в часі, ґрунтуючись на аналізі поведінки сегментів в часі. Оцінка параметрів об'єктів полягає у визначенні таких характеристик об'єктів, як координати центру, розміри, яскравість, форма, швидкість, прискорення. Оцінені характеристики можуть бути використані для прийняття рішення про виявлення об'єктів заданого типу. Результати оцінки параметрів можна використовувати для вирішення завдання супроводу об'єктів, що не має безпосереднього відношення до аналізу зображень. Розпізнавання об'єктів полягає у віднесенні зображень об'єктів, що спостерігаються, до одного з заданих класів.

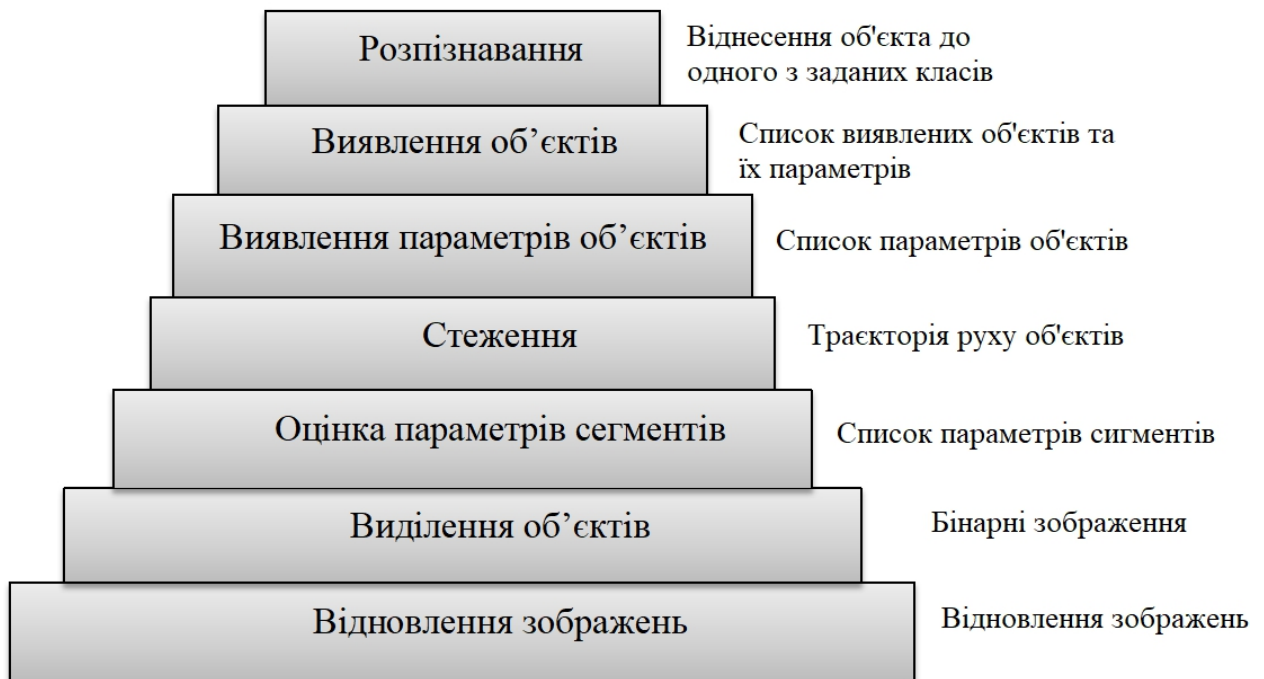


Рисунок 1.2 – Ієрархія рівнів обробки інформації в системах виявлення і супроводу об'єктів [2]

Зазвичай в системі виявлення і супроводу об'єктів здійснюється перехід від одного рівня ієрархії до іншого і, врешті-решт, досягаються один або обидва верхні рівні ієрархії - супровід і розпізнавання об'єктів. Залежно від завдань, що вирішуються системою виявлення і супроводу, а також в залежності від підходів, що використовуються для вирішення, деякі рівні ієрархії в конкретній системі можуть бути відсутні.

Таким чином актуальною проблемою сьогодення є розробка систем відеоспостереження для протидії малорозмірним БПЛА. При цьому, однією із основних задач при побудові таких систем є розробка алгоритмів стеження за БПЛА.

2 АНАЛІЗ МЕТОДУ ВИДІЛЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ НА ПОСЛІДОВНОСТІ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ МІЖКАДРОВИХ РІЗНИЦЬ

Одним із класичних методів виділення рухомих об'єктів є знаходження різницевого зображення на основі сусідніх кадрів відеопослідовності (далі – «різницевий метод»).

Розглянемо в якості прикладу випадок виявлення рухомих об'єктів на нерухомому фоні. У загальному вигляді процес автоматичного виділення інформації про рухомі об'єкти на основі алгоритму міжкадрової обробки передбачає аналіз не одного, а декількох (як мінімум двох) зображень, отриманих в різні моменти часу або, точніше, відповідних їм сигналів. В результаті такого аналізу може здійснюватися не тільки виявлення об'єктів, а й визначення деяких інформаційних параметрів об'єктів: габарити, координати, швидкість і напрямок переміщення в просторі. Основна складність, яка виникає при цьому, зазвичай пов'язана з тим, що рухомі об'єкти часто менш контрастні, ніж нерухомі предмети, що знаходяться в полі зору ВС, і, отже, не є можливим за допомогою простої амплітудної селекції виділити корисний сигнал від рухомої цілі на фоні заважають фонових сигналів. Тому процес виділення інформації про рухомі об'єкти поділяється на два етапи:

- 1) формування міжкадрового різницевого сигналу (MPC), в якому зосереджена вся інформація про зміни, що відбуваються в зображенні, і в той же час відсутні (або значно пригнічені) перепади рівня, що відповідають нерухомим об'єктам, які знаходяться в кадрі;

- 2) оптимальна обробка MPC з метою виділення необхідної інформації з максимальною достовірністю.

Нехай, наприклад, на деякому неоднорідному фоні, містяться нерухомі об'єкти, переміщається об'єкт А (рисунок 2.1).

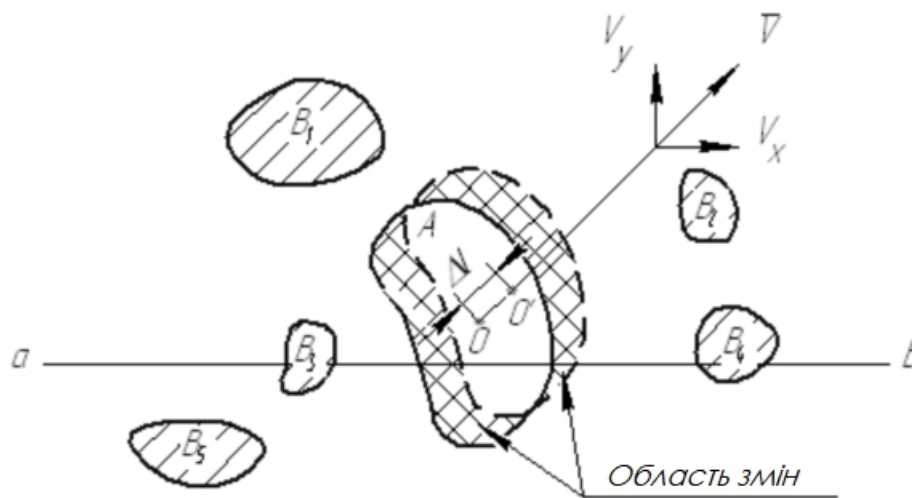


Рисунок 2.1 – А – рухомий об'єкт; B1, ... B5 –нерухомі предмети, що знаходяться в зоні спостереження

За час, рівний періоду проходження кадрів, що порівнюються, ΔT_K , об'єкт зміщується на деяку відстань Δl .

В загальному випадку $\Delta T_K = k T_K$ де $k = 1, 2, 3, \dots$ – цілі натуральні числа; T_K – період проходження суміжних кадрів. Конкретне значення k вибирається з урахуванням динаміки переміщення об'єкта, виходячи із оптимальних умов формування МРС.

На рисунку 2.2 показані осцилограми відеосигналів, що відповідають виділеному рядку « ab » на виході телевізійного датчика, в двох суміжних кадрах. Намери цих кадрів умовно позначаються індексами « n » и « n + k ».

Як видно з рисунка 2.2, різницевий сигнал $I_{ab}(D)$, отриманий при порівнянні сигналів, що відповідають рядку « ab » n -го и (n + k) -го кадрів, являє собою біполярні імпульси. Тривалість біполярних імпульсів τ пов'язана з горизонтальною складовою V_x швидкості руху зображень об'єкта; інтервал часу між імпульсами ΔT_x – з горизонтальними розмірами об'єкта;

інтервал часу, що відлічується від моменту початку прямого ходу рядкової розгортки до появи додатнього імпульсу T_x – з положенням об'єкта в просторі і т.д.

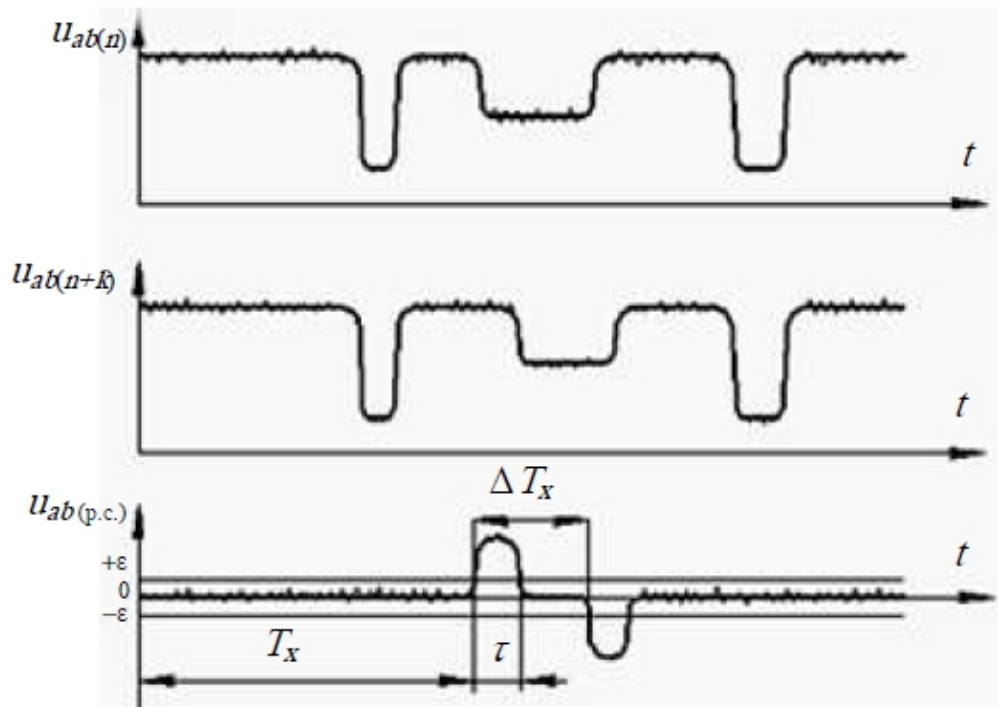


Рисунок 2.2 –Відеосигнали, що відповідають рядку « ab » в двох суміжних кадрах (а) і (б) відповідно; міжкадровий різницевий сигнал, отриманий від рядку « ab » (в)

Важливо відмітити, що між інформаційними параметрами об'єкта (координати, габарити, швидкість і напрямок руху об'єкта) і параметрами МРС, існує лише ймовірнісний зв'язок.

Чіткий функціональний зв'язок відсутній, так як у вхідному сигналі завжди наявні завади, що носять випадковий характер. Тому в роботі СВ, як і в роботі будь-якої оптико-електронної системи, завжди можливі помилки.

Часто на практиці різницеве зображення I_D формується за формулою

$$I_D(x, y) = |I_i(x, y) - I_{i-1}(x, y)|, \quad (2.1)$$

де x, y – координати пікселя; I_i – зображення з поточного кадру; I_{i-1} – зображення з попереднього кадру.

Приклад різницевого зображення наведено на рисунку 2.3в [9].

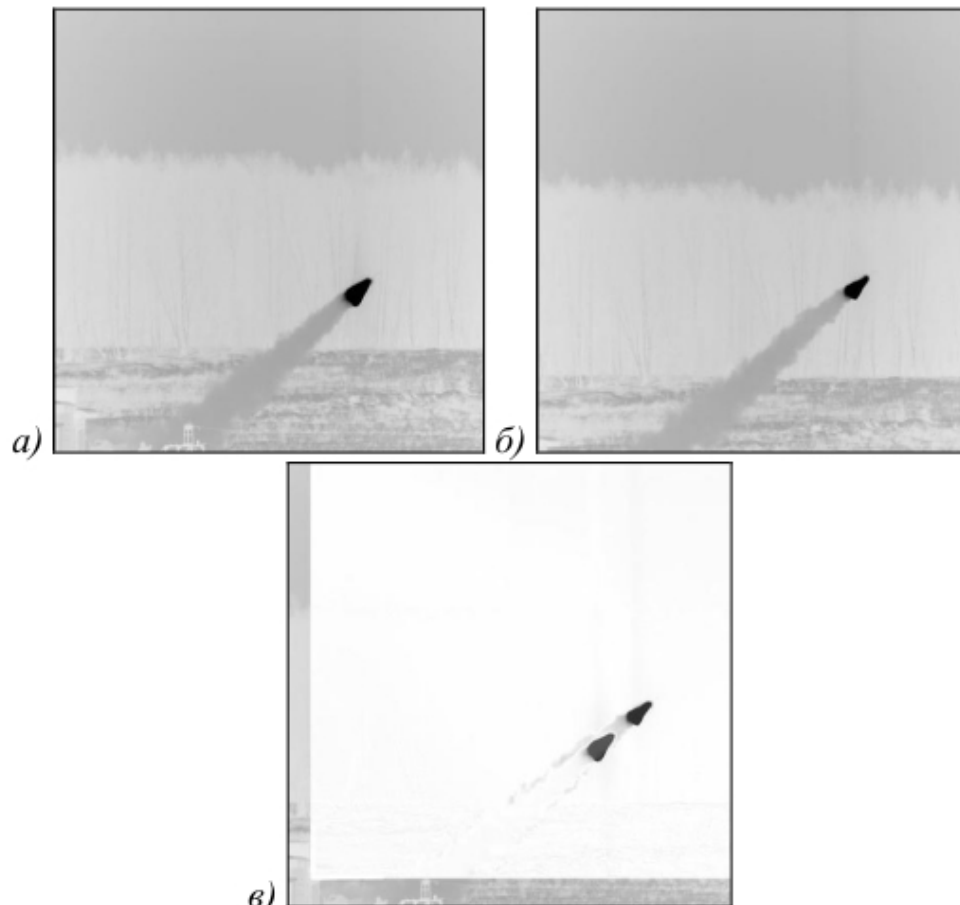


Рисунок 2.3 – Метод міжкадрових різниць по двом кадрам (зображення інвертовані): попередній кадр (а); поточний кадр (б); різницевий кадр (в)

Як видно з рисунків, в результаті віднімання кадрів відбувається відсікання нерухомого фону. Також різницевий кадр має два зображення рухомої цілі – пряме й інверсне, яке затримується щодо першого на час, що дорівнює періоду проходження кадрів.

Цей ефект не є критичним для систем автосопроводу, що працюють по одиночній цілі, проте в контексті ідентифікації та оцінювання координат групових об'єктів може викликати деякі труднощі. Зокрема, інверсне зображення може бути розпізнано як самостійний об'єкт, що небажано.

В роботі запропановано два методи вирішення цієї проблеми [9]. Перший спосіб полягає в формуванні моделі фону I_G за одною з формул:

$$I_G(x, y) = \min(I_i(x, y); I_{i-1}(x, y)); \quad (2.2)$$

$$I_G(x, y) = \max(I_i(x, y); I_{i-1}(x, y)). \quad (2.3)$$

Отримана модель фону I_G складається з мінімальних (або максимальних) значень відповідних пікселей двох послідовних кадрів. З урахуванням (2.2) або (2.3) формула (2.1) матиме вигляд:

$$I_D(x, y) = |I_i(x, y) - I_G(x, y)|, \quad (2.4)$$

Незручність цього підходу полягає в тому, що для об'єктів, які світліше фону, потрібно використовувати формулу (2.2), а для об'єктів, які темніше - формулу (2.3). В іншому випадку положення об'єкта на різницевому зображенні буде відповідати моменту часу попереднього кадру.

Другий запропонований спосіб полягає у використанні трьох кадрів для виявлення об'єкту. Розглянемо різницеві зображення I_{D1} і I_{D2} , отримані згідно (2.1) з трьох послідовних кадрів I_i, I_{i-1}, I_{i-2} :

$$I_D^1(x, y) = |I_i(x, y) - I_{i-1}(x, y)|; \quad (2.5)$$

$$I_D^2(x, y) = |I_{i-1}(x, y) - I_{i-2}(x, y)|. \quad (2.6)$$

Кожне з отриманих різницевих зображень буде містити як прямі, так і інверсні зображення об'єктів для відповідної пари кадрів. Сформуємо результуюче різницеве зображення наступним чином:

$$I_D(x, y) = (I_D^1(x, y) - I_D^2(x, y))\theta(I_D^1(x, y) - I_D^2(x, y)); \quad (2.7)$$

де $\theta(x)$ – функція Хевісайда.

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1, & x \geq 0. \end{cases} \quad (2.8)$$

Заданий таким чином кадр не буде містити інверсних зображень об'єктів, при цьому наявні в ньому зображення об'єктів будуть відповідати поточному кадру I_i незалежно від їх яскравості. Таким чином усуваються основні

недоліки як методу, так і формули (2.4), однак з'являється вимога наявності додаткового третього кадру.

За отриманим різницевим зображенням I_D можна здійснювати виділення рухомих об'єктів. Для цього пропонується піддати різницеве зображення бінаризації, в результаті якої виходить чорно-біле зображення I_B (рис.2.4). Це дозволить локалізувати об'єкти і відсікти малозначущі коливання яскравості, що залишилися після віднімання кадрів.



Рисунок 2.4 – Бінарне зображення (інвертоване)

Експерименти показали, що в більшості випадків достатньо простої бінаризації з глобальним порогом, який розраховується за формулою:

$$P = \frac{(\max(I_D(x, y)) - \min(I_D(x, y)))}{2}. \quad (2.9)$$

Якщо ж різницеве зображення зашумлено (таке можливо, наприклад, при зйомці за складних погодних умов), має сенс проводити додаткову обробку зображення і використовувати адаптивні алгоритми бінаризації з локальним порогом [10].

Розробка методів додаткової обробки різницевого зображення, отриманого за складних умов, виходить за рамки бакалаврської роботи і являє собою окрему тему для дослідження.

Однією з важливих характеристик об'єкта, що рухається, є його форма. В якості характеристики форми об'єкту пропонується використовувати його контур. Для простеження контурів об'єктів за бінарним зображенням можна рекомендувати алгоритм Розенфельда [9].

Як відомо, основним завданням вимірювальної СВ є визначення кутових координат об'єктів, що потрапляють в поле її зору [9]. Для розрахунку кутових координат об'єкту спостереження необхідно знати положення його центру в системі координат датчика зображення.

Обчислення координат центра об'єкта можна здійснювати двома способами, кожен з яких має певні переваги і недоліки.

Координати геометричного центру об'єкта можна обчислювати безпосередньо за бінарним зображенням як середнє арифметичне координат точок, що належать контуру об'єкта. Це дозволяє істотно скоротити обсяг обчислень, що важливо при роботі в реальному масштабі часу.

У випадку протяжних об'єктів, що мають нерівномірний розподіл яскравості, має сенс обчислювати координати енергетичних центрів об'єктів. Такий спосіб краще використовувати на етапі післясеансної обробки. Для цього потрібні додаткові кроки. Перш за все, необхідно по зображенню I_B знайти фрагмент зображення, в якому можна знайти об'єкт.

Потім координати енергетичних центрів можна обчислити за допомогою просторового фільтра [11] по зображенню поточного кадру I_i :

$$X_M = \frac{\sum_x \sum_y x b_{xy}}{\sum_x \sum_y b_{xy}}, \quad (2.10)$$

$$Y_M = \frac{\sum_x \sum_y y b_{xy}}{\sum_x \sum_y b_{xy}} \quad (2.11)$$

де X_M , Y_M – оцінки координат об'єкту в системі координат матриці; b_{xy} –

значення яскравості пікселя з координатами (x, y) ; x, y – координати пікселя на матриці.

Такий підхід дозволяє враховувати яскравість всіх пікселів, що належать об'єкту, і визначати координати його центру з субпіксельною точністю.

Таким чином, на виході алгоритму для кожного об'єкта формується наступна структура даних:

$$O_i = \{x_c, y_c, k, \Gamma_i\}, \quad (2.12)$$

де i – порядковий номер об'єкта; x_c, y_c – координати центру об'єкта на матриці; k – довжина контура об'єкта; $\Gamma_i = (\gamma_0, \gamma_1, \gamma_{k-1})$ – вектор-контур об'єкта в комплекснозначному вигляді [9].

За отриманими координатами геометричного або енергетичного центру об'єкта на матриці можна отримати кутові координати об'єкта за методикою, описаною в [11].

Надалі, на етапі міжкадрової ідентифікації об'єктів, така структура даних дозволяє проводити селекцію цілей за формою і розміром, що істотно підвищує достовірність отриманих результатів.

3 АНАЛІЗ МЕТОДУ КАЛМАНІВСЬКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЩОДО СТЕЖЕННЯ ЗА ОБ'ЄКТАМИ НА ПОСЛІДОВНОСТІ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ

Супровід (трекінг) рухомих об'єктів – це один зі складових компонентів багатьох систем реального часу таких, як системи спостереження, аналізу відео і інших. Вхідними даними будь-якого алгоритму супроводу є послідовність зображень (кадрів відео) з наростаючим обсягом інформації, яку необхідно обробляти і аналізувати.

Задача супроводу полягає в тому, щоб побудувати траєкторію руху цільових об'єктів на вхідній послідовності кадрів. Траєкторією руху об'єкта називається послідовність його положень на послідовності кадрів, починаючи з кадру, на якому було виявлено об'єкт. В залежності від методу супроводження положення об'єкту може визначатися по-різному (координати та розмір сторін обмежувального прямокутника, координати центру мас контура і т.п.).

Існує декілька категорій методів супроводження об'єктів:

1. Методи супроводу особливих точок (point tracking). В таких методах приймається, що положення об'єкта визначається розташуванням набору характерних точок. Один і той же об'єкт на послідовних кадрах представляється наборами відповідних пар точок. Данная група методів розділяється на две підгрупи:

Детерміністські методи використовують якісні евристики руху (невелика зміна швидкості, незмінність відстані в тривимірному просторі між парою точок, що належать об'єкту), по суті завдання зводиться до мінімізації функції відповідності наборів точок. Методи, засновані на обчисленні щільного і розрідженого оптичного потоку, а також методи зіставлення

(matching) дескрипторів ключових точок є типовими представниками детерміністських методів.

Імовірнісні методи використовують підхід, заснований на понятті простору станів. Вважається, що об'єкт, що рухається має певний внутрішній стан, що вимірюється на кожному кадрі. Щоб оцінити наступний стан об'єкта, потрібно максимально узагальнити отримані вимірювання, тобто визначити новий стан за умови, що отримано набір вимірів для станів на попередніх кадрах. Типовим прикладами таких методів є методи на базі фільтра Кальмана і фільтра часток (particle filter).

2. Методи супроводу компонент (kernel tracking). Під компонентою розуміється форма об'єкта. У найпростішому випадку компонента може бути представлена шаблоном прямокутної або овальної форми, в більш складних - тривимірною моделлю об'єкта, спроектований на площину зображення. Як правило, методи даної групи застосовуються, якщо рух визначається звичайним зміщенням, поворотом або афінним перетворенням. Трекінг компонент - ітеративна процедура локалізації, заснована на максимізації деякого критерію подібності. На практиці реалізується з використанням зсуву середнього (mean shift) і його безперервної модифікації (Continuous Adaptive Mean Shift, CAM Shift).

3. Методи супроводу силуету (silhouette tracking). Силует може бути заданий контуром або набором пов'язаних простих геометричних примітивів. Завдання трекерів силуету полягає в тому, щоб на кожному кадрі визначити область, в якій знаходиться об'єкт, з використанням моделі його силуету, побудованої на підставі попередніх кадрів. Можна виділити дві групи методів:

Методи зіставлення і супроводження фрагментів зображення, що містять об'єкт. При зіставленні природним чином повинна бути введена міра подібності пари областей, обмежених контуром. На практиці використовується відстань Хаусдорфа, також значення оціночної функції може обчислюватися з використанням декількох заходів, включаючи,

наприклад, кросскореляції, відстань Бхачатарія. Визначення положення фрагмента на наступному кадрі послідовності виконується за допомогою обчислення оптичного потоку для внутрішніх точок області.

Методи супроводження контуру. Дозволяють прогнозувати стан контуру на наступному кадрі. Перший підхід полягає у використанні моделей простору станів (по типу фільтра Кальмана), другий - в мінімізації функції енергії контуру з використанням прямих технік таких, як градієнтний спуск.

Метод міжкадрової різниці дозволяє визначити координати геометричного, а також енергетичного центру об'єкта, що дозволяє ефективно застосувати для розв'язання задачі його супроводу алгоритм калмановської фільтрації [12], що широко застосовується при вирішенні подібних завдань в різних радіотехнічних системах.

В задачі багатовимірної калманівської фільтрації модель процесу, що підлягає фільтрації, описується лінійною стохастичною динамічною системою в дискретному часі

$$x(k) = F(k, k-1)x(k-1) + G(k)\omega(k), \quad (3.1)$$

де $x(k)$ — l -мірний вектор стану динамічної системи; ω_k — r -мірний векторний гаусівський шум збудження динамічної системи; що є некорельованою послідовністю гаусівських векторів з нульовим математичним очікуванням і кореляційною матрицею $Q(k)$; $F(k, k-1)$ — матриця переходу; $G(k)$ — відома матриця.

Рівняння спостереження, що описує процес вимірювання, має вигляд

$$y(k) = H(k)x(k) + v(k), \quad (3.2)$$

де $y(k)$ — m -мірний вектор спостереження; $v(k)$ - вектор помилок вимірювання, який є некорельованою послідовністю гаусівських векторів з нульовим математичним очікуванням і кореляційною матрицею $R(k)$; $H(k)$ — матриця спостереження.

Задача фільтрації полягає в тому, щоб за послідовністю вимірювань $Y(k) = y(1), \dots, y(k)$ знайти оптимальну оцінку вектору стану $\mathbf{x}(k)$, що задовольняє критерію мінімуму середньоквадратичної похибки. Позначимо похибку оцінки як

$$\Delta \mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k). \quad (3.3)$$

З точки зору теорії оцінювання вважається, що оцінка вектору стану, що задовольняє вищезазначеному критерію, є умовним середнім

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = E\{x(k) | Y(k)\}. \quad (3.4)$$

Кореляційна матриця похибки оцінки $\hat{\mathbf{P}}(k)$ визначається по формулі

$$\hat{\mathbf{P}}(k) = E\{(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k))(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k))^T | Z_k\} = E\{\Delta \mathbf{x}(k) \Delta \mathbf{x}^T(k) | Y(k)\} \quad (3.5)$$

Згідно критерію мінімуму середньоквадратичної похибки матриця $\hat{\mathbf{P}}(k)$ є також кореляційною матрицею апостеріорної ЩЙ $W(x(k))$.

Отже, для знаходження оцінки вектору стану $\hat{\mathbf{x}}(k)$, необхідно знайти апостеріорну щільність розподілу $W(x(k))$. Цю щільність можна отримати безпосередньо, використовуючи формулу Байеса:

$$f(x(k) | Y(k)) = \frac{f(y(k) | x(k), Y(k-1)) f(x(k) | Y(k-1))}{f(y(k) | Y(k-1))}. \quad (3.6)$$

Перш за все, зазначимо, що $f(y(k) | x(k), Y(k-1)) = f(y(k) | x(k))$, оскільки $v(k)$ – білий гаусівський шум та, відповідно, при фіксованому значенні $x(k)$ вектор $y(k)$ не залежить від послідовності попередніх вимірювань $Y(k-1)$. З рівняння спостереження безпосередньо випливає, що

$$f(y(k) | x(k)) = N(H(k)x(k), R(k)), \quad (3.7)$$

де $R(k)$ – кореляційна матриця помилки вимірювання, а $N(a, A)$ використовується для запису гаусівської щільності ймовірності з вектором середнього a та кореляційною матрицею A .

Для знаходження параметрів умовної щільності $f(x(k)|Y(k-1))$, що входить до чисельника виразу, що розглядається (3.6), введемо наступні позначення:

$$E\{x(k)|Y(k-1)\} = x_k^*; \quad (3.8)$$

$$E\{(x^*(k)-x(k))(x^*(k)-x(k))^T|Y(k-1)\} = E\{\Delta x^*(k)\Delta x^{*T}(k)|Y(k-1)\} = P^*(k), \quad (3.9)$$

де $x^*(k)$ — математичне очікування умовної щільності $f(x(k)|Y(k-1))$; $P^*(k)$ — кореляційна матриця умовної щільності $f(x(k)|Y(k-1))$.

Згідно критерію мінімуму середньоквадратичної похибки вектор $x^*(k)$ є оцінкою екстраполяції (прогнозу) на один крок вперед, а $P^*(k)$ — кореляційна матриця помилок екстраполяції.

Підставляючи у вищезазначені рівняння (3.8), (3.9) вектор $x(k)$ з рівняння стану (3.1) отримуємо:

$$\begin{aligned} x^*(k) &= E\{F(k, k-1)x(k-1) + G(k)\omega(k)|Y(k-1)\} = \\ &= F(k, k-1)E\{x(k-1)|Y(k-1)\} = F(k, k-1)x(k-1) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} P^*(k) &= E\{(x^*(k)-x(k))(x^*(k)-x(k))^T|Y(k-1)\} = \\ &= E\{(F(k, k-1)x(k-1) + G(k)\omega(k))(F(k, k-1)x(k-1) + G(k)\omega(k))^T|Y(k-1)\} = \\ &= F(k, k-1)P_{k-1}F^T(k, k-1) + G(k)Q(k)G^T(k) \end{aligned} \quad (3.11)$$

де P_{k-1} — кореляційна матриця помилок фільтрації на попередньому кроці.

При виводі рівнянь вважається рівним нулю середнє значення вектору шумів збудження $\omega(k)$, а також відсутня кореляція між цим вектором та вектором стану $x(k-1)$. Таким чином,

$$\begin{aligned} f(x(k)|Y(k-1)) &= N(x^*(k), P^*(k)) = \\ &N(F(k, k-1)x(k-1), F(k, k-1)P_{k-1}F^T(k, k-1) + G(k)Q(k)G^T(k)) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Визначимо параметри гаусівської щільності $f(y(k)|Y(k-1))$. Використовуючи рівняння спостереження (3.2) та приймаючи до уваги

відсутність кореляції між вектором стану $x(k)$ та шумом спостереження $v(k)$ отримаємо:

$$E\{y(k)|Y(k-1)\} = E\{H(k)x(k) + v(k)|Y(k-1)\} = H(k)x^*(k), \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} E\{(y(k) - H(k)x^*(k))(y(k) - H(k)x^*(k))^T\} &= E\{\Delta z(k)\Delta z^T(k)\} = \\ &= E\{H(k)(x(k) - x^*(k))(x(k) - x^*(k))^T H^T(k) + v(k)v^T(k)\} = \\ &= H(k)P^*(k)H^T(k) + R(k). \end{aligned} \quad (3.14)$$

де $\Delta z(k)$ — вектор, який розраховується по формулі

$$\Delta z(k) = y(k) - H(k)x^*(k). \quad (3.15)$$

В теорії калманівської фільтрації вектор $\Delta z(k)$ називають «оновлюючим процесом». Таким чином,

$$f(y(k)|Y(k-1)) = N(H(k)x^*(k), H(k)P^*(k)H^T(k) + R(k)). \quad (3.16)$$

Отже, підставляючи отримані щільності ймовірності (3.7), (3.12) та (3.16) в формулу (3.6) для знаходження апостеріорної щільності ймовірності $f(x(k)|Y(k))$, і використовуючи процедуру доповнення до повного квадрата, можна показати, що ця щільність є гаусівською з вектором середніх $\hat{x}(k)$, що є оцінкою фільтрації вектора стану, і кореляційною матрицею $\hat{P}(k)$.

Таким чином, оптимальний алгоритм оцінювання вектору стану описується системою рекурентних рівнянь наступного вигляду:

$$x^*(k) = F(k, k-1)\hat{x}(k-1); \quad (3.17)$$

$$\hat{x}(k) = x^*(k) + K(k)(y(k) - H(k)x^*(k)), \quad (3.18)$$

де $x^*(k)$, $\hat{x}(k)$ - вектори прогнозу і оцінки вектору стану $x(k)$ динамічної системи у момент часу k ; $K(k)$ - матричний коефіцієнт посилення фільтру Калмана, який визначається на основі рекурентних рівнянь

$$P^*(k) = F(k, k-1)\hat{P}(k-1)F^T(k, k-1) + G(k)Q(k)G^T(k); \quad (3.19)$$

$$K(k) = P^*(k)H^T(k)(H(k)P^*(k)H^T(k) + R(k))^{-1}; \quad (3.20)$$

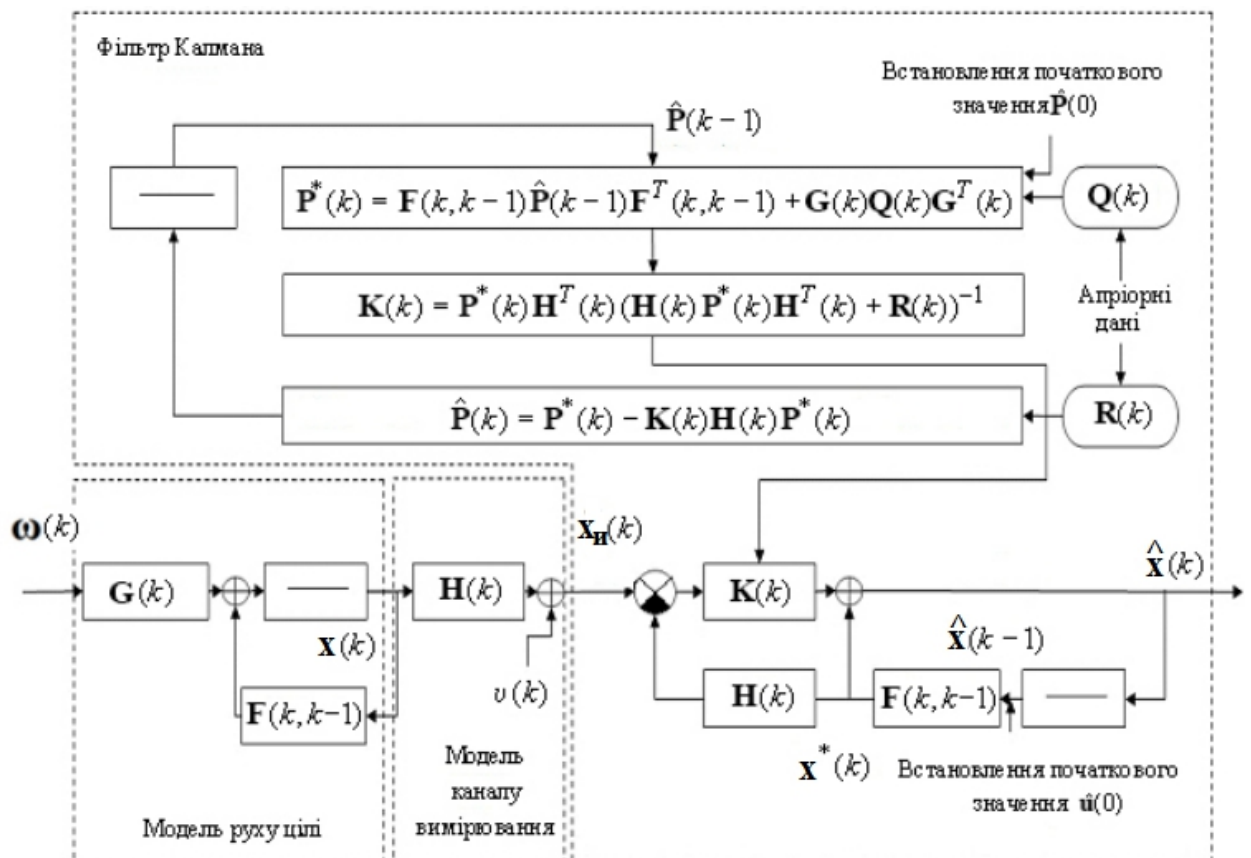
$$\hat{P}(k) = P^*(k) - K(k)H(k)P^*(k), \quad (3.21)$$

де $P^*(k)$ — кореляційна матриця помилки прогнозу $\Delta x^*(k) = x^*(k) - x(k)$;
 $\hat{P}(k)$ — кореляційна матриця помилки оцінки $\Delta \hat{x}(k) = \hat{x}(k) - x(k)$;

Початкова умова має вигляд $\hat{x}(0) = \bar{x}(0)$, $\hat{P}(0) = \bar{P}(0)$.

Оптимальний фільтр, алгоритм якого заснований на рівняннях (3.17)-(3.21) був запропонований у 1960 році Рудольфом Калманом і відповідно його називають фільтром Калмана.

Структурна схема фільтра Калмана показана на рис.3.1. Вектор стану системи $x(k)$, моделюється у вигляді випадкового процесу, одержуваного шляхом пропускання білого гаусівського шуму $\omega(k)$ через лінійний фільтр у загальному випадку із залежними від часу параметрами. Ці параметри визначаються перехідними матрицями системи $F(k, k-1)$ і шумів збудження $G(k)$.



Рисунк 3.1 — Структурна схема фільтра Калмана [12]

Вектор вимірювання $y(k)$ формується шляхом перетворення вектору стану $x(k)$ і адитивного накладання шуму вимірювання $v(k)$.

Робота фільтру починається з установки початкових значень $\hat{x}(0) = \bar{x}(0)$, $\hat{P}(0) = \bar{P}(0)$, відомих на основі апіорної інформації і введення величин елементів кореляційних матриць шумів збудження $Q(k)$ і шумів вимірювання $R(k)$. Оцінки вектору стану $\hat{x}(k)$ обчислюються рекурентно по мірі надходження нових вимірювань $y(k)$. При цьому, як видно з (18), для обчислення поточного значення оцінки $\hat{x}(k)$ немає необхідності запам'ятовувати всі попередні вимірювання $Y(k-1)$, оскільки вся інформація міститься в оцінці $\hat{x}(k-1)$, отриманої на попередньому кроці.

Часова діаграма, що ілюструє механізм оцінки в фільтрі Калмана наведена на рис.3.2.

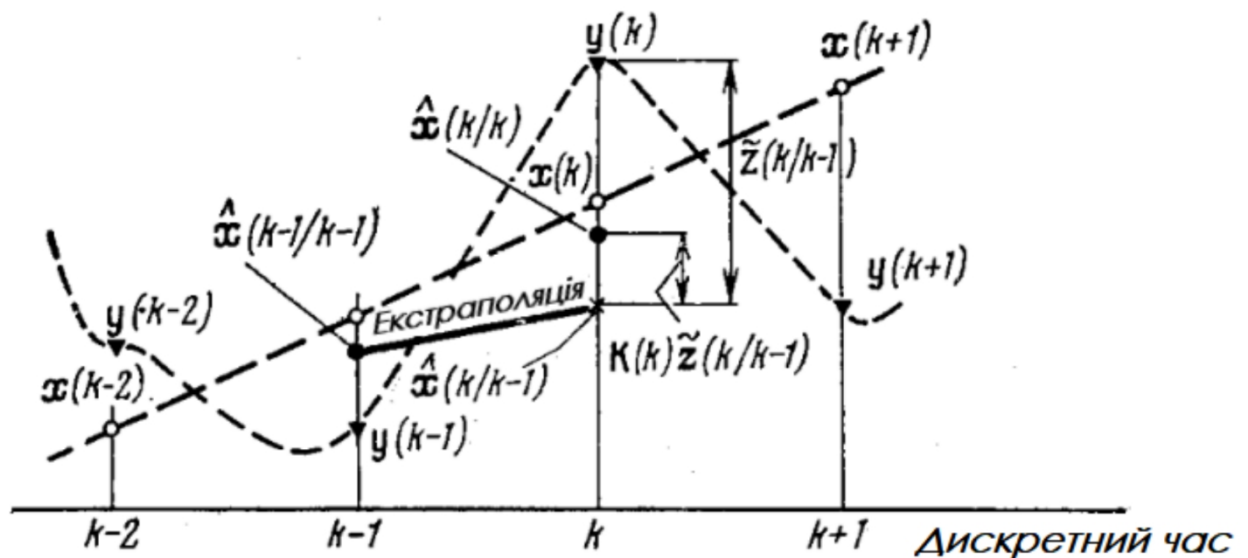


Рис 3.2 — Часова діаграма процесу роботи фільтру Калмана

Фільтр Калмана є динамічною системою із змінним матричним коефіцієнтом посилення $K(k)$, величина якого залежить від точності поточних оцінок і рівня шумів вимірювань. Коефіцієнт посилення $K(k)$ на кожному кроці k визначається рекурентно на основі рівнянь (3.19) - (3.21). При цьому також визначаються кореляційні матриці помилок прогнозу $P^*(k)$

і оцінки $\hat{x}(k)$, які характеризують точносні характеристики алгоритму фільтрації.

Основними перевагами фільтру Калмана є наступні:

1. фільтр є рекурентний, зручний для реалізації на ЕОМ, алгоритм обчислення оцінки стану динамічної системи при повністю відомій її моделі;
2. оцінка $\hat{x}(k)$ є лінійною щодо спостереження;
3. кореляційна матриця помилок фільтрації $\hat{P}(k)$ унаслідок лінійності фільтру не залежить від спостережень $y(k)$ і, отже, може бути обчислена наперед (тому наперед можна обчислити і коефіцієнт посилення $K(k)$);
4. алгоритми фільтрації легко розповсюджуються на багатовимірний випадок (для багатоканальних систем);
5. оскільки параметри фільтру Калмана змінюються в часі, то такий фільтр мінімізує СКВ помилки фільтрації нестационарних процесів.
6. в стаціонарному режимі роботи фільтр Калмана збігається з фільтром Вінера. Фільтр Калмана вирішує завдання фільтрації нестационарних випадкових процесів, а фільтр Вінера – стаціонарних випадкових процесів. Таким чином для стаціонарних випадкових процесів фільтр Калмана мінімізує СКВ похибки оцінки як стаціонарному, так і перехідному режимах роботи.

Аналіз можливостей практичної реалізації лінійного фільтру Калмана показав, що для цього не вимагається значних обчислювальних витрат.

4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВІДЕОСТЕЖЕННЯ ЗА БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ З ВИКОРИСТАННЯМ МІЖКАДРОВИХ РІЗНИЦЬ

Як зазначалося в розділі 3 завдання супроводу полягає в тому, щоб побудувати траєкторію руху цільового об'єкта на вхідній послідовності кадрів. Траєкторією руху об'єкта є послідовність його положень на послідовності кадрів.

Малорозмірний БПЛА є високоманевровим об'єктом, який у процесі руху може повертатися чи виконувати різноманітні маневри. Як наслідок, зображення БПЛА на послідовності кадрів можуть різко змінювати свої розміри та форму. Це ускладнює задачу супроводження БПЛА як рухомого об'єкта за його формою. Тому для більшості практичних задач проблема супроводження БПЛА может быть сведена к задаче супроводження их ограничивающих прямоугольников.

Виділення рухомого БПЛА на поточному кадрі засноване на формуванні бінаризованого міжкадрового різницевого сигналу в стробі супроводу. Як правило БПЛА супроводжується на тлі неба і є темніше фону. Тому для усунення різницевого сигналу, що відповідає положенню БПЛА на попередньому кадрі, бінаризований міжкадровий різницевий сигнал в стробі супроводу обчислюється за формулою

$$B(x, y) = \begin{cases} 0, & I_D(x, y) \leq H \\ 1, & I_D(x, y) > H \end{cases}, \quad (x, y) \in S(x, y) \quad (4.1)$$

де H – порогова величина, що визначає чутливість методу до міжкадрових відмінностей; $S(x, y)$ – область стробу супроводу; $I_D(x, y)$ – міжкадровий різницевий сигнал, що обчислюється за формулою

$$I_D(x, y) = I_i(x, y) - I_{i-1}(x, y) \quad (4.2)$$

Для наочності процес формування бінаризованого міжкадрового різницевого сигналу в стробі супроводу за строкою y_0 схематично показаний на рис. 4.1.

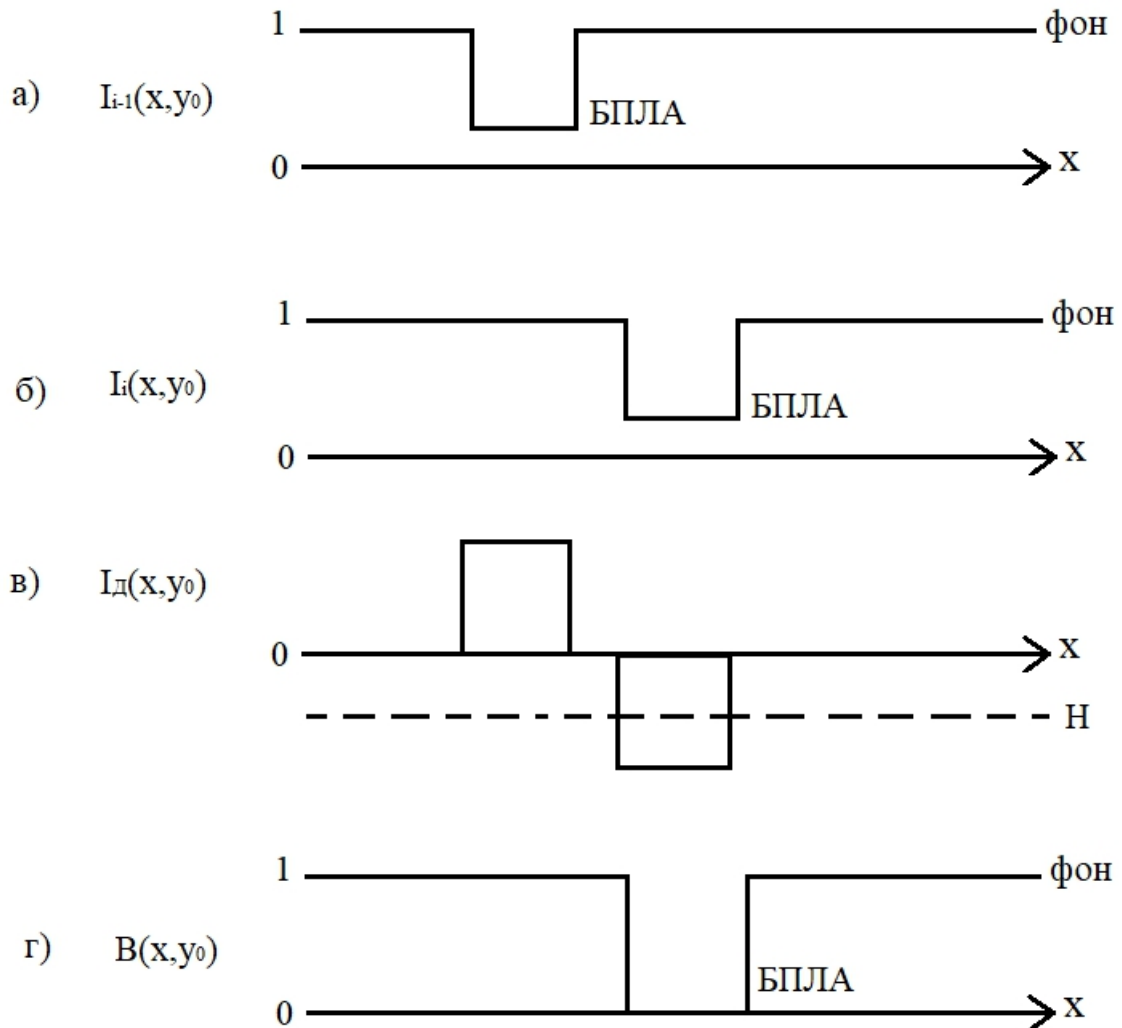


Рис.4.1 — Процес формування бінаризованого міжкадрового різницевого сигналу в стробі супроводу за строкою y_0

Як випливає з рис.4.1.в бінаризованому міжкадровому різницевому сигналі БПЛА відповідає рівень яскравості – 0, а фону – 1.

Координати масиву $V(x, y) = 0$ з нульовою яскравістю визначаються положенням БПЛА, що рухається, в поточному кадрі.

Для визначення прямокутника, що обмежує цю область, визначаються масиви X та Y , що містять відповідно всі значення координат x та y , для яких $B(x,y)=0$. Тоді координати вершин прямокутника, що обмежує, визначаються за формулами:

$$x_1 = \min X; \quad (4.3)$$

$$x_2 = \max X; \quad (4.4)$$

$$y_1 = \min Y; \quad (4.5)$$

$$y_2 = \max Y. \quad (4.6)$$

Геометрична інтерпретація побудови прямокутника на кадрі зображення з використанням бінаризованого міжкадрового різницевого сигналу показана на рис.4.2.

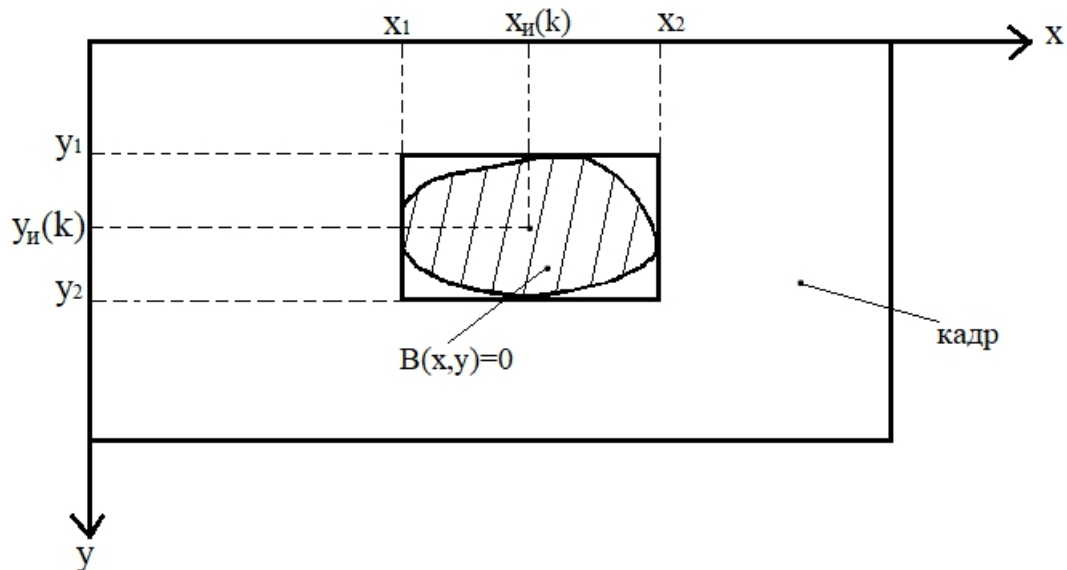


Рис.4.2 – Геометрична інтерпретація побудови прямокутника на кадрі зображення з використанням бінаризованого міжкадрового різницевого сигналу

На основі отриманих результатів, вимірними координатами центру БПЛА є координати центру прямокутної області, що визначаються за формулами

$$x_H(k) = \frac{x_1 + x_2}{2}; \quad (4.7)$$

$$y_H(k) = \frac{y_1 + y_2}{2}. \quad (4.8)$$

Для синтезу алгоритму калманівської фільтрації вирішенні задачі слідкування за ціллю необхідно визначити модель 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 прямокутної області в прямокутній системі координат у вигляді дискретної динамічної системи має вигляд:

$$u(k) = Fu(k-1) + G(k)\omega(k), \quad (4.9)$$

де $u^T(k) = (x(k), \dot{x}(k), y(k), \dot{y}(k))$ - 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; $\omega(k)$ - шум збудження з кореляційною матрицею

$$Q(k) = \text{diag}(\sigma_{ax}^2, \sigma_{ay}^2);$$

$$F = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (4.10)$$

$$G = \begin{pmatrix} \sigma_{ax} \frac{T^2}{2} & 0 \\ \sigma_{ax} T & 0 \\ 0 & \sigma_{ay} \frac{T^2}{2} \\ 0 & \sigma_{ay} T \end{pmatrix}. \quad (4.11)$$

$F(k-1)$ - матриця переходу системи.

$G(k)$ - 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:

$$\sigma_{ax}^2 = \frac{a_{mx}^2}{3}; \sigma_{ay}^2 = \frac{a_{my}^2}{3}, \quad (4.12)$$

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

В отриманій моделі (4.9) 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:

$$x_{II}(k) = x(k) + v_x(k); \quad (4.13)$$

$$y_{II}(k) = y(k) + v_y(k). \quad (4.14)$$

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

Рівняння спостереження у векторно-матричній формі мають наступний вигляд:

$$u_{II}(k) = Hu(k) + v(k), \quad (4.15)$$

де $u_{II}(k) = (x_{II}(k), y_{II}(k))$ – вектор спостереження, що включає, виміряні координати цілі в декартовій СК;

$v(k) = (v_x(k), v_y(k))$ – вектор похибок вимірювання з кореляційною матрицею

$R(k)$, що має вигляд:

$$R(k) = \begin{pmatrix} \sigma_x^2(k) & \sigma_{xy}^2(k) \\ \sigma_{xy}^2(k) & \sigma_y^2(k) \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

H — матриця спостереження, що має вигляд:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

Теоретично компоненти кореляційної матриці помилок вимірювання $R(k)$ 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.

На основі моделей (4.9), (4.15) лінійний дискретний фільтр Калмана четвертого порядку, що синтезується, описується рівняннями (3.17 - 3.21). 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:

$$\begin{aligned} \begin{matrix} x^*(k) \\ \dot{x}^*(k) \end{matrix} &= \begin{matrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{matrix} \begin{matrix} \hat{x}(k-1) \\ \hat{\dot{x}}(k-1) \end{matrix}; \\ \begin{matrix} \hat{x}(k) \\ \hat{\dot{x}}(k) \end{matrix} &= \begin{matrix} x^*(k) \\ \dot{x}^*(k) \end{matrix} + \begin{matrix} K_{x1}(k) \\ K_{x2}(k) \end{matrix} (x_H(k) - x^*(k)). \end{aligned} \quad (4.18)$$

де коефіцієнт підсилення фільтра Калмана $K_x^T(k) = (K_{x1}(k), K_{x2}(k))$ обчислюється по формулам (3.19)-(3.21),

де $H = [1 \ 0]$; $R_x(k) = \sigma_x^2(k)$;

$$G_x = \begin{matrix} \sigma_{ax} & T \\ \sigma_{ax} & T \end{matrix} \frac{T^2}{2}; \quad F = \begin{matrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{matrix}. \quad (4.19)$$

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

$$\hat{x}(1) = \frac{x_H(1) - x_H(0)}{T} \quad P_x(1) = \begin{matrix} \sigma_x^2(1) & \frac{\sigma_x^2(1)}{T} \\ \frac{\sigma_x^2(1)}{T} & 2\frac{\sigma_x^2(1)}{T^2} + \sigma_{mx}^2 \end{matrix}. \quad (4.20)$$

Рівняння фільтрації по координаті Y мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} y^*(k) \\ \dot{y}^*(k) \end{matrix} &= \begin{matrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{matrix} \begin{matrix} \hat{x}(k-1) \\ \hat{y}(k-1) \end{matrix}; \\
 \begin{matrix} \hat{x}(k) \\ \hat{y}(k) \end{matrix} &= \begin{matrix} y^*(k) \\ \dot{y}^*(k) \end{matrix} + \begin{matrix} K_{y1}(k) \\ K_{y2}(k) \end{matrix} (y_{II}(k) - y^*(k)).
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

де коефіцієнт підсилення фільтра Калмана $K_y^T(k) = (K_{y1}(k), K_{y2}(k))$ обчислюється по формулам (3.19)-(3.21),

де $H = [1 \ 0]$; $R_y(k) = \sigma_y^2$;

$$G_y = \begin{matrix} \sigma_{ay} \frac{T^2}{2} \\ \sigma_{ay} T \end{matrix}; \quad F = \begin{matrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{matrix}. \tag{4.22}$$

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

$$\hat{x}(1) = \frac{y_{II}(1) - y_{II}(0)}{T} \tag{4.23}$$

$$P_y(1) = \begin{matrix} \sigma_y^2(1) & \frac{\sigma_y^2(1)}{T} \\ \frac{\sigma_y^2(1)}{T} & 2\frac{\sigma_y^2(1)}{T^2} + \sigma_{my}^2 \end{matrix}. \tag{4.24}$$

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 рис.4.3. Центр стробу пошуку розміщується у точці прогнозованого положення цілі на поточному кадрі, тому координати центру дорівнюють $x^*(k)$, $y^*(k)$. Також на рис.4.3 штриховою лінією показаний обмежуваний прямокутник БПЛА, отриманий на попередньому $k-1$ такті.

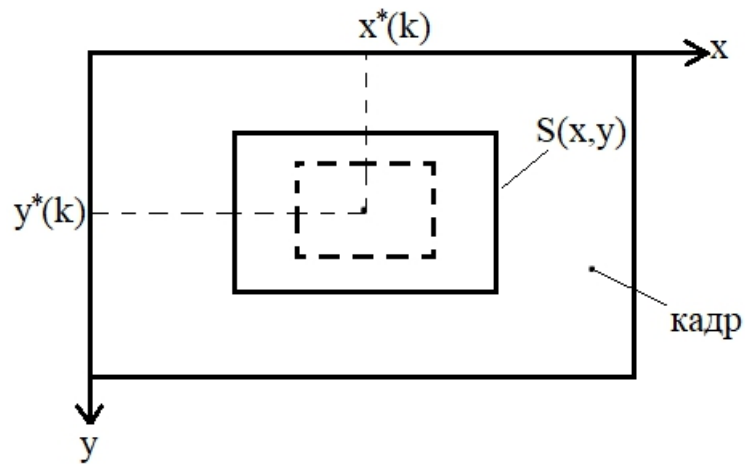


Рис.4.3 – Область стробу

Розміри стробу визначаються в залежності від ймовірності попадання об'єкта спостереження в цю область. Для розподіленої маневруючої цілі розрахувати таку ймовірність досить важко. Розподілена ціль повинна вписуватись в строб супроводу 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, розміри прямокутної області також можуть змінюватися у процесі слідкування. Як правило величина запасу визначається експериментально або шляхом статистичного моделювання.

5 АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОГО АЛГОРИТМУ ВІДЕОСТЕЖЕННЯ ЗА БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ МІЖКАДРОВИХ РІЗНИЦЬ

Аналіз розробленого алгоритму відеостеження за БПЛА з використанням міжкадрових різниць виконано на модельному прикладі шляхом статистичного моделювання у середовищі Matlab. Розмір кадру дорівнював 1500x1500 пікселів. Використано тестове зображення дрону (рис.5.1.) розміром 15x25 пікселів. Зображення БПЛА перетворено з формату RGB до монохромного. При виконанні моделювання зображення пронормовані до інтервалу [0,1] та представлені у форматі з плаваючою точкою. Вихідна яскравість пікселів кадрів, що творяться, дорівнює одиниці.



Рис.5.1 – Тестове зображення дрону

Моделювався рух цілі на основі поліноміальної моделі другого порядку по кожній осі 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 $\sigma_a = 2$ пікс./такт². Кількість відліків траєкторій $N=30$. Помилки вимірювання прямокутних координат цілі методом міжкадрових різниць встановлено $\sigma_x = \sigma_y = 0.7$ пікс. Кількість реалізацій метода Монте-Карло дорівнює 100.

Строб супроводження представляє собою прямокутник, сторони якого у три рази більше за сторони прямокутної обмежуючої області БПЛА, яка визначається шляхом виявлення області його руху на бінарізованому різницевому зображенні. Значення порогу, для побудови бінарізованого зображення дорівнює $H = -0.1$.

На рис.5.2,а представлено у відтінках сірого міжкадрове різницеве зображення, яке розраховане в області стробу супроводження. На ньому фон приймає нульове значення. Також чітко видно зображення БПЛА, яке належить попередньому кадру, оскільки інтенсивності яскравості його пікселів знаходяться в діапазоні $[0,1]$. Зображення БПЛА, яке належить поточному кадру, на різницевому зображенні приймає негативні значення. При виводі зображення у відтінках сірого негативні пікселі приводяться до нульового значення і співпадають з рівнем фону.



Рис. 5.2 – Різницеве і бінарізоване різницеве зображення в стробі супроводу

На рис.5.2,б показано бінарізоване міжкадрове різницеве зображення, яке розраховане в області стробу супроводження за формулою (2.9). На ньому фон приймає одиничне значення. Також чітко видно зображення БПЛА, яке належить поточному кадру, пікселі якого приймають нульові значення.

На рис.5.3 показано кадр із тестовим зображенням БПЛА і стробом стеження, який виділено прямокутником. В лівому верхньому куті показані

лінійні розміри обмежуючого область руху прямокутника 14x24 пикс. та кількість пикселів області руху 132 (що утворюють рисунок дрона на бінарізованому зображенні). В правому верхньому куті представлено номер кадру.

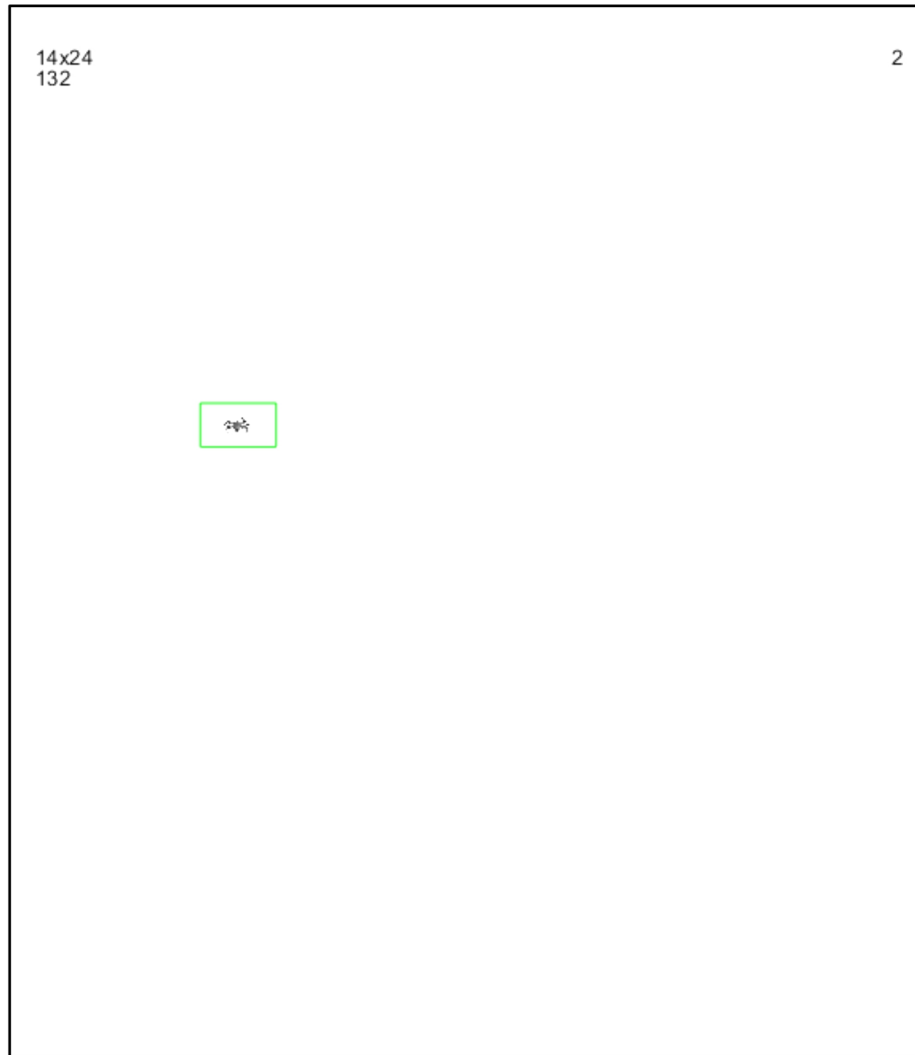


Рис.5.3 – Кадр із тестовим зображенням БПЛА

На рис.5.4 показані істина (зелена) та оцінена фільтром Калмана (червона) траєкторії БПЛА в координатах XY. Враховуючи високу точність вимірювання координат БПЛА методом міжкадрових різниць істина та відфільтрована траєкторії БПЛА фактично співпадають.

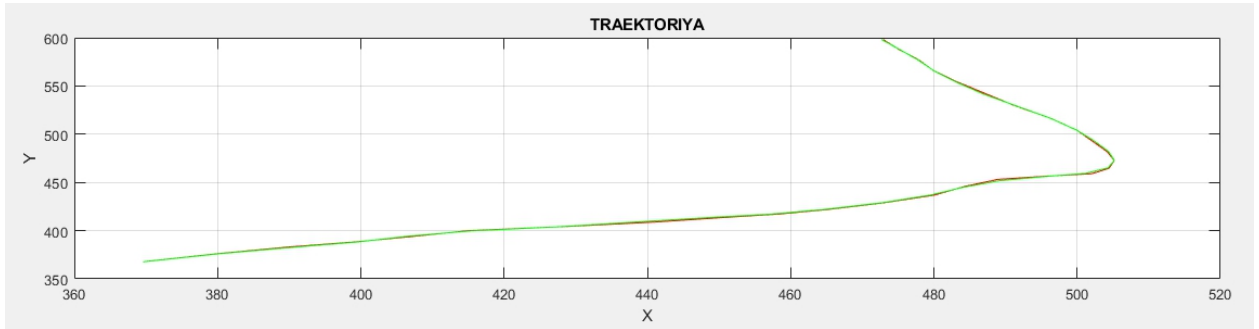


Рис.5.4 – Істина та оцінена фільтром Калмана траєкторії БПЛА

На рис.5.5 показані математичні очікування (зелена, криві 1), СКВ помилок вимірювання положення БПЛА (синя, криві 2) методом міжкадрових різниць, що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок вимірювання координат БПЛА, які було встановлено при побудові фільтра Калмана (червона, криві 3). Фактичне СКВ помилок вимірювання координат БПЛА не перевищує задане СКВ, що забезпечує працездатність алгоритму калманівської фільтрації.

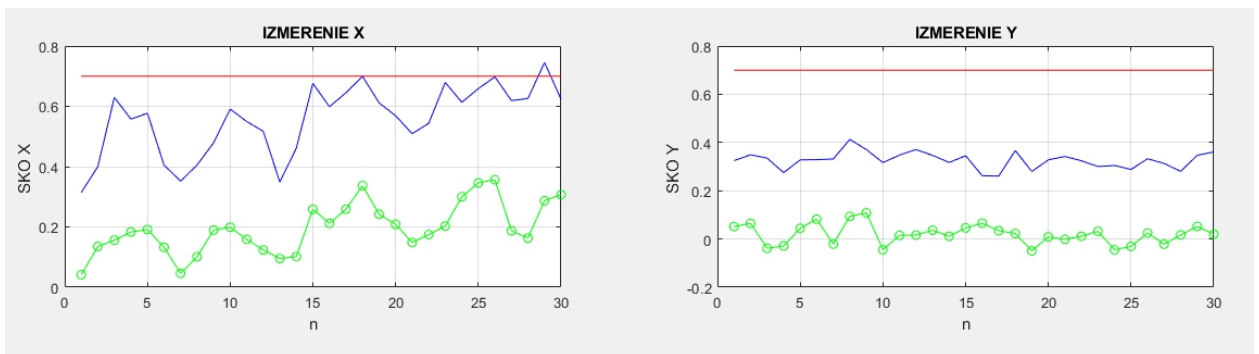


Рис.5.5 – Математичні очікування (зелена, криві 1), СКВ помилок вимірювання положення БПЛА (синя, криві 2) методом міжкадрових різниць

На рис.5.6 показані математичні очікування m_x^*, m_y^* (зелені криві 1), СКВ помилок прогнозу положення БПЛА σ_x^*, σ_y^* (сині криві 2), що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок прогнозу положення БПЛА, що розраховані фільтром $\sqrt{p_x^*}, \sqrt{p_y^*}$ (червоні криві 3). На рис.5.6 показані

математичній очікуванню $\hat{\mu}_x, \hat{\mu}_y$ (криві 1), СКВ помилок оцінки положення БПЛА $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y$ (криві 2), що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок прогнозу положення БПЛА, що розраховані фільтром $\sqrt{\hat{P}_x}, \sqrt{\hat{P}_y}$ (криві 3).

Фактичні і розраховані фільтром СКВ помилок прогнозу положення БПЛА добре узгоджуються між собою, що свідчить про вірну роботу алгоритму калманівської фільтрації і дозволяє якісно (без зривів) вирішувати завдання супроводження БПЛА. Крім того, фільтр Калмана забезпечує субпіксельну точність оцінювання його місцеположення на кожному кадрі.

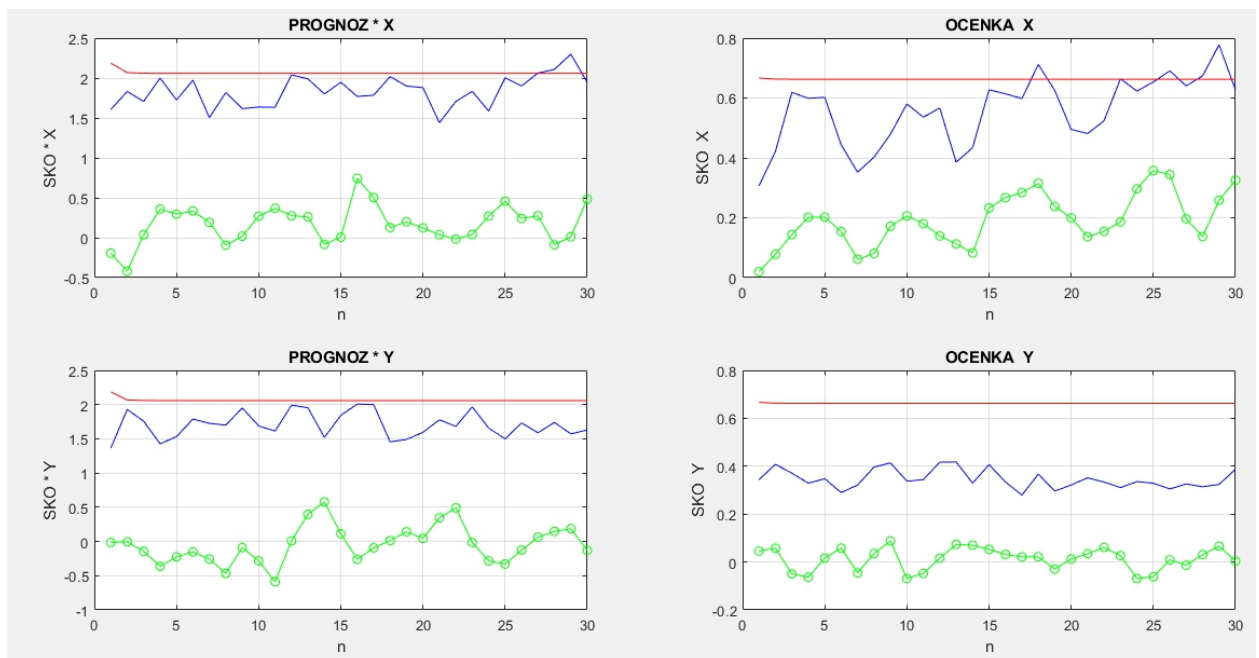


Рис. 5.6 – Залежності математичного очікування і СКВ похибок прогнозу і оцінки координат БПЛА по осям X і Y

На роботу алгоритму супроводження на основі міжкадрових різниць суттєвий вплив може оказати наявність перешкод на зображенні. Одним з найбільш поширених видів перешкод є адитивний некорельований шум. Так, наприклад, якщо СКВ адитивного шуму на зображенні дорівнює $\sigma_n = 0.8$, то СКВ шуму на різницевому зображенні збільшується і дорівнює

$\sigma_r = 1.41 \sigma_n = 1.13$. При умові, що рівень порогового значення при бінарізації становить $H = -0.1$, імовірність того, що шумова складова в різницевому зображенні прийме значення менше ніж H , розраховується на основі інтегралу ймовірності і дорівнює

$$P_\alpha = \int_{-\infty}^H f(r) dr = 0.5 - \Phi\left(\frac{|H|}{\sigma_r}\right) = 0.5 - \Phi(0.709) = 0.24 \quad (5.1)$$

На рис. 5.7 показаний фрагмент бінарізованого різницевого зображення при наявності адитивного некорельованого шуму з розглянутою дисперсією.

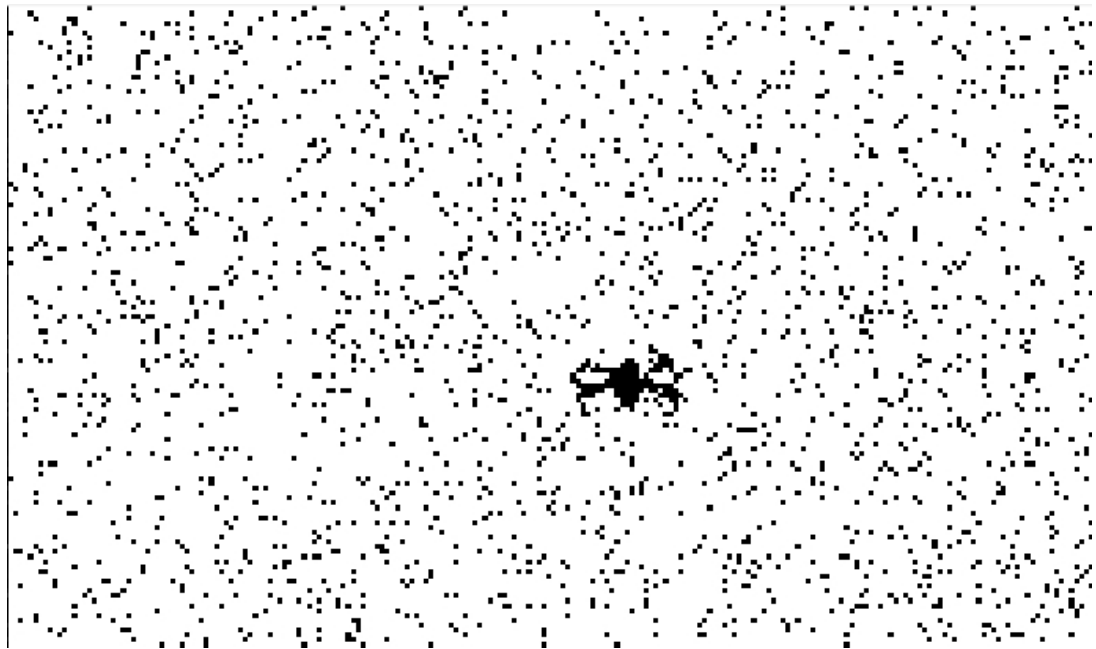


Рис.5.7 – Бінарізоване різницеве зображення при наявності адитивного некорельованого шуму

Як видно з рис.5.7. бінарізоване зображення спотворено імпульсними завадами, що не дозволяє використовувати алгоритм міжкадрових різниць для виявлення і супроводження БПЛА.

Як впливає з роботи алгоритму міжкадрових різниць, адитивна завада на різницевому зображенні має нульове математичне очікування, тобто її

значення групуються відносно нуля. Тому простим способом боротьби з цією завадою є збільшення по модулю негативного значення порогу H .

Покладемо значення порогу $H = -0.3$. Ймовірність того, що шумова складова в різницевому зображенні прийме значення менше ніж H , дорівнює

$$P_{\alpha} = \int_{-\infty}^H f(r) dr = 0.5 - \Phi\left(\frac{|H|}{\sigma_r}\right) = 0.5 - \Phi(2.13) = 0.016 \quad (5.2)$$

На рис.5.8 показано кадр із тестовим зображенням БПЛА і стробом стеження, який виділено прямокутником. В кадрі присутній адитивний некорельований гаусівський шум з СКВ $\sigma_n = 0.8$.

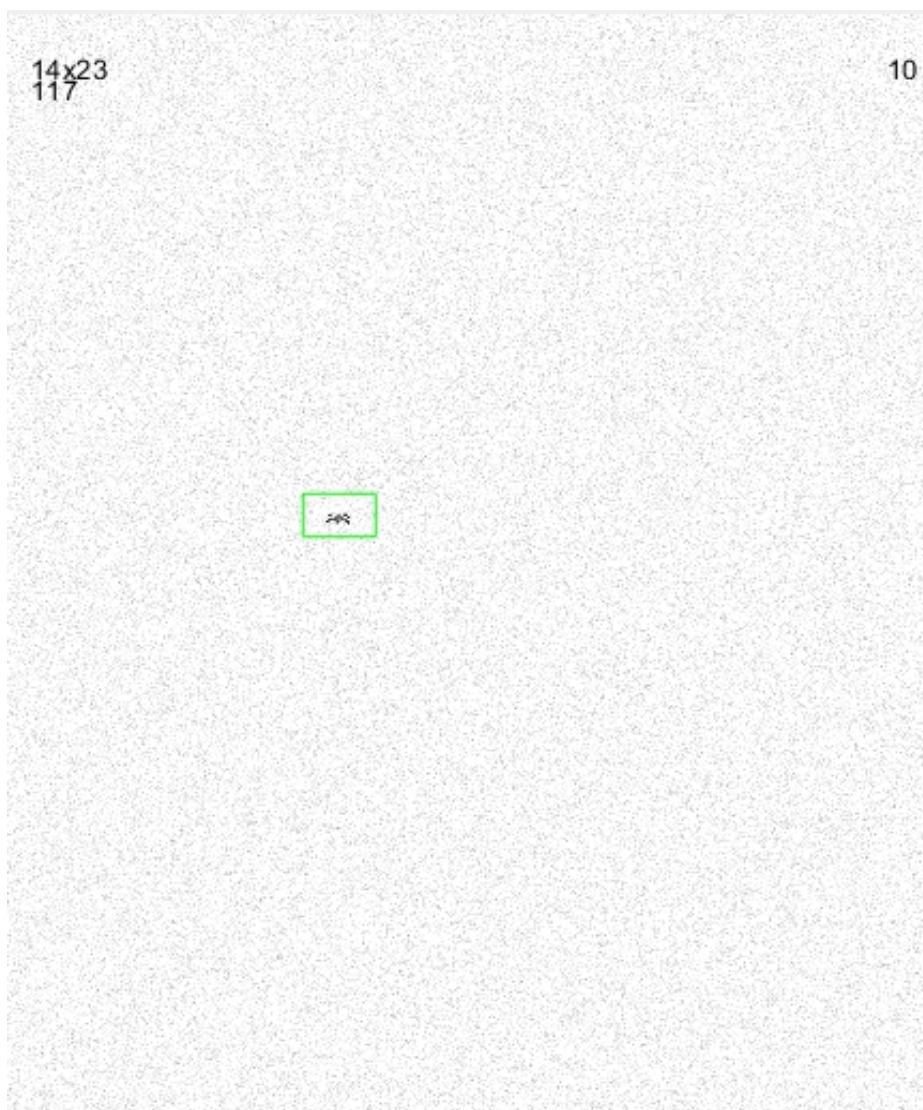


Рис. 5.8 – Кадр з адитивним шумом

На рис.5.9 показані істина (зелена) та оцінена фільтром Калмана (червона) траєкторії БПЛА в координатах ХУ.

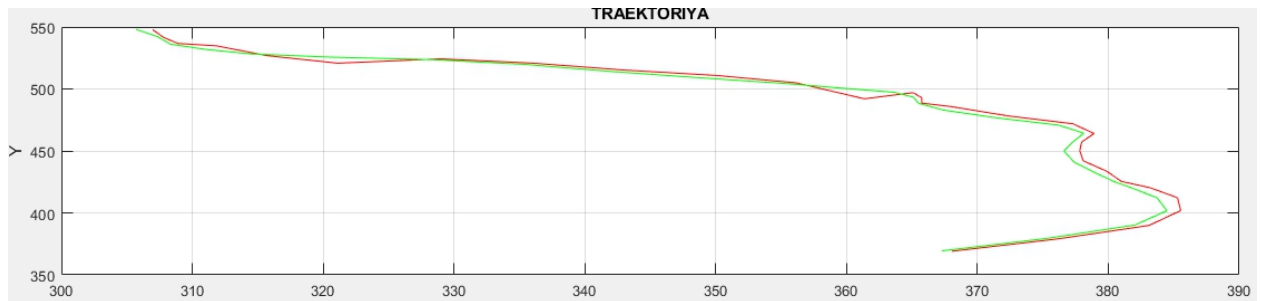


Рис.5.9. – Істина та оцінена фільтром Калмана траєкторії БПЛА

На рис.5.10 показані помилки вимірювання положення БПЛА (зелені криві) методом міжкадрових різниць та СКВ помилок вимірювання координат БПЛА, які було встановлено при побудові фільтра Калмана (червоні криві). На рисунках спостерігаються окремі виброси помилки вимірювання, що обумовлено наявністю імпульсних завад в стробі супроводження. Але ж, в цілому, як впливає з рис.5.8, алгоритм калманівської фільтрації на основі міжкадрових різниць забезпечує супроводження БПЛА.

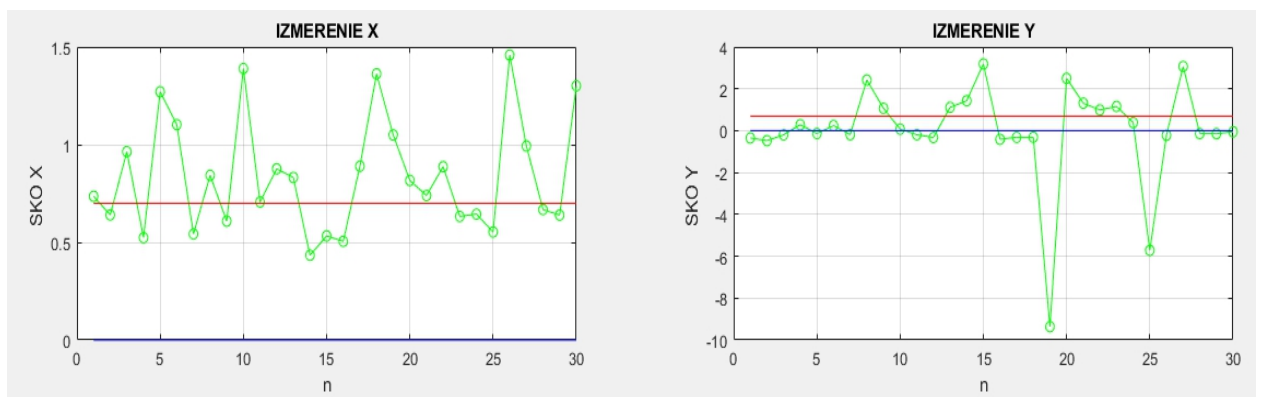


Рис.5.10 – Помилки вимірювання положення БПЛА при наявності адитивного шуму.

Таким чином, для функціонування алгоритму супроводження БПЛА на основі міжкадрових різниць значення порогу H повинно перевищувати СКВ адитивного шуму на зображенні не менше ніж в $3.75 \dots 4$ рази. При цьому інтенсивності пікселів БПЛА по модулю також повинні перевищувати поріг H . Якщо ця вимога не виконується, то супроводження БПЛА без попередньої обробки кадрів на основі метода міжкадрових різниць неможливе.

ВИСНОВКИ

Метод міжкадрових різниць дозволяє ефективно виявляти рухомі об'єкти у тому числі і малорозмірні на неоднорідному незмінному фоні. В основу методу покладено знаходження різницевого зображення на основі сусідніх кадрів відео послідовності з подальшою його бінарizaцією, в результаті чого отримується чорно-біле зображення.

Метод міжкадрової різниці дозволяє визначити координати геометричного, а також енергетичного центру об'єкта, що дозволяє ефективно застосувати для розв'язання задачі його супроводу алгоритм калмановської фільтрації, що широко застосовується при вирішенні подібних завдань в різних радіотехнічних системах.

Фільтр Калмана дозволяє отримати оптимальне по критерію мінімуму середньої квадратичної помилки рішення задачі траєкторної фільтрації руху об'єкта при лінійних моделях його руху і вимірювання координат. Він є рекурентним і зручним для реалізації на ЕОМ. Крім того, на основі фільтра Калмана визначаються екстрапольовані параметри руху об'єкта, що дозволяє організувати процес стеження за ним.

Для синтезу алгоритму стеження за малорозмірним БПЛА використано модель руху його геометричного центру в прямокутній СК кадру у вигляді дискретної динамічної системи четвертого порядку. При цьому вектор стану включає координати положення і швидкості зміни положення по відповідних осях прямокутної СК. Початкові умови для фільтра Калмана формуються на основі двох тактів спостереження.

Розроблений алгоритм відеостеження за безпілотним літальним апаратом з використанням міжкадрових різниць при відсутності завади на

зображенні забезпечує субпиксельну точність оцінювання його місцеположення на кожному кадрі.

Для боротьби з адитивною некорельованою завадою використано спосіб збільшення рівня поргового значення при формуванні бінарного зображення. Значення порогу H повинно перевищувати СКВ адитивного шуму на зображенні не менше ніж в 3.75...4 рази. При цьому інтенсивності пікселів БПЛА по модулю також повинні перевищувати поріг H . Якщо ця вимога не виконується, то супроводження БПЛА без попередньої обробки кадрів на основі метода міжкадрових різниць неможливе.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Commercial unmanned aerial vehicle market analysis – industry trends, companies and what you should know [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.businessinsider.com/commercial-uav-marketanalysis-2017-8>.
2. Сучасний стан та проблеми протидії маловисотним, низькошвидкісним та малорозмірним БПЛА / А.С. Дудуш, В.О. Тютюнник, О.А. Резніченко, С.Ю. Гогоняц // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони № 1(31)/2018
3. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов / Алпатов Б.А., Бабаян П.В. // Цифровая обработка сигналов №2/2006
4. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения / Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С // Системы управления, связи и безопасности №1/2020
5. Изделия и комплексы противодействия беспилотным летательным аппаратам [Доклад]. – СПб.: АО «НИИ «Вектор», 2018. – 51 с.
6. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 29.01.2015. № 6 (14). Режим доступу: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki>.
7. Зайцев А. В., Назарчук И. И., Красавцев О. О., Кичулкин Д. А. Особенности борьбы с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2013. № 5. С. 37-43.
8. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния //Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. Режим доступу:

[https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_problemy_i_perspektivy_protivostoan](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_problemy_i_perspektivy_protivostoaniia)
ia

9. Метод выделения быстро движущихся объектов при использовании цифрового оптического локатора следящего типа / Ваниев А.А., Емельянов Г.М. // Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

10. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт; пер. с англ. Кн. 2. – М.: Мир, 1982. – 480 с.

11. Математические аспекты определения движения летательных аппаратов / Ю.Г. Булычёв, А.П. Манин.

12. Жук С.Я. Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотного літального апарату на основі вимірювань сенсорної мережі : монографія / С.Я. Жук, І.О. Товкач. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. Вид-во «Політехніка», 2019, 172 с.

ДОДАТОК А

```
warning off;
clear all
clc;
close all;
M=1;%var
N=40;%input('Vvedite N=') %dlina traektorii
noiseSTD = 0.01 ;
k=1; %0.2;%1 0.5 Размер строка
My=1300;% число строк кадра
Nx=1300;% число столбцов кадра
h = 0.1;

x_dim_min=10;
y_dim_min=10;

X0=350; Vx0=10; Y0=350; Vy0=10;%Начальные условия движ БПЛА
Ax = 2; Ay =2; % СКО ускорения цели в модели движения
Gmr=2; Gmr2=Gmr^2; % СКО ускорения цели в ФК

bx=0.7; bx2=bx^2; % СКО измерения X
by=0.7; by2=by^2; % СКО измерения Y

%формирование изображения дрона
% DRON = imread ('DronEtalon.jpg'); %60na100 dron etalon
Etalon10na6
%DRON = imread ('Etalon10na6.jpg');
DRON = imread ('Etalon25na15.jpg');
%DRON = imread ('Etalon50na30.jpg');

bDRON = 0.0721*DRON(:, :, 1)+
0.7154*DRON(:, :, 2)+0.2125*DRON(:, :, 3);
bDRON = im2double(bDRON); %отсчеты яркости дрона в
диапазоне [0,1]
figure(1), imshow(bDRON); %!!!!!!!!!!!!
    %pause

[me,ne]=size(bDRON);% размеры изобр ДРОНА
dn=round(k*ne); dm=round(k*me);
m1=me+2*dm;n1=ne+2*dn;% размер строка
med=me; ned=ne; %размеры дрона !!!!!
    %[KADR,CENTERED,m1,n1,STROB0,STROB1] =
MATRIXIM2 (bDRON,My,Nx,me,ne,m1,n1);
```

```

T=1;%input('Vvedite T=') %temr izmireniy sek
% Матрицы ФК
F=[1 T;
   0 1];
Q=Gmr2*[(T^4)/4 T^3/2 ;
         T^3/2 T^2];

% Матрицы модели движ БПЛА
F_calc = [1 T 0 0;
          0 1 0 0;
          0 0 1 T;
          0 0 0 1];

G_calc = [Ax*T^2/2 0;
          Ax*T      0;
          0        Ay*T^2/2;
          0        Ay*T   ];

xom=zeros(1,N);
xod=zeros(1,N);
xzm=zeros(1,N);
xzd=zeros(1,N);
yom=zeros(1,N);
yod=zeros(1,N);
yzm=zeros(1,N);
yzd=zeros(1,N);
xim=zeros(1,N);
xid=zeros(1,N);
yim=zeros(1,N);
yid=zeros(1,N);

for i=1 : M ;
    %i,
    %Формир нач усл по 2 измерениям
    U0= [X0; Vx0; Y0; Vy0];
    xi1=X0+bx*randn;
    yi1=Y0+by*randn;

    W = randn(2, 1);
    U= F_calc * U0 + G_calc * W;
    xi2=U(1)+bx*randn;
    yi2=U(3)+by*randn;

    Ry=by2;
    Rx=bx2;
    Po=[Rx      Rx/T;
        Rx/T (2*Rx)/T^2+(Gmr2/3) *T^2];

```

```

xo=[xi2;(xi2-xi1)/T];

Poy=[Ry      Ry/T;
     Ry/T    (2*Ry)/T^2+Gmr2*T^2/3];

yo=[yi2;(yi2-yi1)/T];

% -\\- формируем изображение КАДРА с ДРОНОМ
Ux=round(U(1));Uy=round(U(3));
KADR10 = im2double(ones(My,Nx));
KADR10(Uy:med+Uy-1,Ux:ned+Ux-1) = bDRON(1:med,1:ned);%Dron
zapisuvaem v Kadre
np=0;
% Kalman po traektorii
for n=1 : N;
    % n
    % уравнение движения дрона
    W = randn(2, 1);
    U = F_calc * U + G_calc * W;
    % Сохраняем координаты положения дрона (x;y) в
    массив.Они содержат ненулевую дробную часть
    xm(n)=U(1); ym(n)=U(3);
    % -\\- округляем координаты дрона (x;y) до целых
    величин. Поскольку эти координаты отображают номер строки и
    номер столбца на изображении,
    Ux=round(U(1));Uy=round(U(3));

    % -\\- формируем изображение КАДРА с ДРОНОМ

KADR = im2double(ones(My,Nx));
KADR(Uy:med+Uy-1,Ux:ned+Ux-1) = bDRON(1:med,1:ned);%Dron
zapisuvaem v Kadre

%----- ВНОСИМ ШУМ В
КАДР %!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

%     for my = 1 : My
%         for nx = 1 : Nx
%
%             temp = KADR(my,nx) + noiseSTD * randn;
%
%             if( temp > 1 )
%                 temp = 1;
%             elseif ( temp < 0 );
%                 temp = 0;
%             end
%
%             KADR(my,nx) = temp;

```

```

%         end
%     end
%     % figure(2);
%     %imshow(KADR);
%     %pause;

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

% -//-   вычисляем прогноз параметров движения дрона
xz=F*xo;
yz=F*yo;
Pz=F*Po*F'+ Q;
Pzy=F*Poy*F'+ Q;

% -//-   вычисляем мат.ожидание ошибки прогноза и
дисперсию ошибки прогноза
[xzm(n), xzd(n)]=disper(i, xz(1)-xm(n), xzm(n), xzd(n));
[yzm(n), yzd(n)]=disper(i, yz(1)-ym(n), yzm(n), yzd(n));
pzd(n)=Pz(1,1); %теоретическая дисперсия ош. прогноза
pzdy(n)=Pzy(1,1); %теоретическая дисперсия ош. прогноза

xz1=round(xz(1)); yz1=round(yz(1));

figure(5)
    imshow(KADR); %plot(KADR);
    hold on
    plot([xz1-dn xz1-1+ne+dn], [yz1-dm yz1-dm], 'g')
    plot([xz1-1+ne+dn xz1-1+ne+dn], [yz1-dm yz1-1+me+dm], 'g')
    plot([xz1-1+ne+dn xz1-dn], [yz1-1+me+dm yz1-1+me+dm], 'g')
    plot([xz1-dn xz1-dn], [yz1-1+me+dm yz1-dm], 'g')

txt = sprintf('%dx%d', me, ne);
text(200, 50, txt)
txt2 = sprintf('%d', np);
text(200, 70, txt2)
txt3 = sprintf('%d', n);
text(1001, 50, txt3)

    pause;

hold off

% -//-   Получаем координаты положения дрона в Кадре

[xi1, yi1, x_dim, y_dim, pp, np]=MR_0(xz(1), yz(1), KADR, KADR10, ne,
me, n1, m1, dn, dm, h);
    %xi1, yi1, x_dim, y_dim, pp, np

```



```

    %pause;

    if (x_dim<x_dim_min) x_dim=x_dim_min; end
    if (y_dim<y_dim_min) y_dim=y_dim_min; end

    ne=x_dim;    me=y_dim;
    dn=round(k*ne);    dm=round(k*me);
    m1=me+2*dm;    n1=ne+2*dn;

    KADR10 = KADR;

    %Сохраняем измеренные координаты положения дрона (x;y) в
    массив.
    xi(n) = xil ; %+ bx*randn;
    yi(n) = yil ; % + by*randn;
    %вычисляем мат.ожидание и дисперсию ошибки измерения
    положения
    [xim(n),xid(n)]=disper(i,xi(n)-U(1),xim(n),xid(n));
    [yim(n),yid(n)]=disper(i,yi(n)-U(3),yim(n),yid(n));

    % -//- ---Фильтр Калмана (продолжение вычислений) ---
    Ry=by2;
    Rx=bx2;
    pRx(n)=Rx;pRy(n)=Ry;

    Kx=Pz(:,1)/(Pz(1,1)+Rx);
    Po=Pz-Kx*Pz(1,:);

    Ky=Pzy(:,1)/(Pzy(1,1)+Ry);
    Poy=Pzy-Ky*Pzy(1,:);

    pod(n)=Po(1,1);
    pody(n)=Poy(1,1);

    xo=xz+Kx*(xi(n) - xz(1));
    yo=yz+Ky*(yi(n) - yz(1));

    om(n)=xo(1);    оmy(n)=yo(1);
    %вычисляем мат.ожидание и дисперсию ошибки оценки
    положения
    [xom(n),xod(n)]=disper(i,xo(1)-xm(n),xom(n),xod(n));
    [yom(n),yod(n)]=disper(i,yo(1)-ym(n),yom(n),yod(n));
    end
    end

    t=1:N;
    figure(2)
    subplot(211);

```

```

    %plot(om,omy,'r',xm,ym,'b',xi,yi,'g'),title('TRAEKTORIYA
'),grid on,
plot(om,omy,'r',xm,ym,'g'),title('TRAEKTORIYA'),grid on,
xlabel('X'),ylabel(' Y '),
subplot(223);
plot(t,xim,'-
og',t,sqrt(xid),'b',t,sqrt(pRx),'r'),title('IZMERENIE
X'),grid on,
xlabel('n'),ylabel('SKO X '),
subplot(224);
plot(t,yim,'-
og',t,sqrt(yid),'b',t,sqrt(pRy),'r'),title('IZMERENIE
Y'),grid on,
xlabel('n'),ylabel('SKO Y '),%pause

    % subplot(121);
    %
plot(t,rm,'r',t,rmi,'b',t,om,'g'),title('RASTOYANIE'),grid
on,
    % xlabel('n'),ylabel('r ');
    % subplot(122);
    % plot(t,bm,'r',t,bmi,'b',t,omb,'g'),title('UGOL'),grid
on,
    % xlabel('n'),ylabel('u '),pause

figure(3)
subplot(221);
    %plot(t,rzm,'g',t,sqrt(rzd),'b',t,sqrt(pzd),'r'),title('OS
HIBKI * rastoytanie'),
plot(t,xzm,'-
og',t,sqrt(xzd),'b',t,sqrt(pzd),'r'),title('PROGNOZ *
X'),grid on,
xlabel('n'),ylabel('SKO * X');
subplot(222);
%plot(t,rom,'g',t,sqrt(rod),'b',t,sqrt(pod),'r'),title('OSH
IBKI ^ rastoyanie'),
plot(t,xom,'-
og',t,sqrt(xod),'b',t,sqrt(pod),'r'),title('OCENKA ^
X'),grid on,
xlabel('n'),ylabel('SKO ^ X');
subplot(223);
%plot(t,bzm,'g',t,sqrt(bzd),'b',t,sqrt(pzdb),'r'),title('OS
HIBKI * ugol'),
plot(t,yzm,'-
og',t,sqrt(yzd),'b',t,sqrt(pzdy),'r'),title('PROGNOZ *
Y'),grid on,
xlabel('n'),ylabel('SKO * Y');
subplot(224);

```

```
%plot(t,bom,'g',t,sqrt(bod),'b',t,sqrt(podb),'r'),title('OS  
HIBKI ^ ugol'),  
    plot(t,yom,'-  
og',t,sqrt(yod) , 'b',t,sqrt(pody),'r'),title('OCENKA ^  
Y'),grid on,  
    xlabel('n'),ylabel('SKO ^ Y');
```