

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БЄЛЯЄВ ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.397.48: 004.383.5

ДИСЕРТАЦІЯ
**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ
ТА ЗОБРАЖЕНЬ У МУЛЬТИМЕДІЙНИХ СТРІЛЕЦЬКИХ
ТРЕНАЖЕРАХ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ О.В. Бєляєв

Науковий керівник Карташов Володимир Михайлович, доктор технічних наук, професор

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Беляєв О.В. Удосконалення методів обробки сигналів та зображень у мультимедійних стрілецьких тренажерах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності функціонування МСТ шляхом розробки і дослідження методів і алгоритмів виявлення та вимірювання геометричних і кінематичних характеристик об'єктів на проекційному екрані МСТ при використанні неоднорідних динамічних сцен.

Проаналізовано і досліджено функціонування МСТ в двох режимах роботи: з лазерним імітатором і з використанням бойової зброї; удосконалено математичні моделі оптичних сигналів та шумів на зображенні в мультимедійних стрілецьких тренажерах, які на відміну від відомих враховують форму та розміри лазерної плями і кульового отвору на фоні фотонного дробового шуму, шуму зчитування та шуму квантування для двох режимів роботи МСТ: з лазерним імітатором і з використанням бойової зброї, що дозволило сформулювати вимоги до точності вимірювань кульових отворів і характеристик правильного виявлення сигналів. Методом теорії статистичних рішень синтезований оптимальний алгоритм виявлення корисного сигналу. Розроблено оптимальний, за критерієм максимуму правдоподібності, метод оцінки просторових координат кульових отворів і відміток лазерного променя на зображенні проекційного екрану МСТ. Запропоновано використання методу контурного аналізу зображень для попередньої фільтрації фону по кадрам відеопотоку, одержуваного з камери МСТ. У якості детекторів контуру використовується узгоджено-вибірковий фільтр, який дозволяє проводити фільтрацію фону, що швидко змінюється.

Вперше запропоновано метод обробки зображень в МСТ з використанням слідування за процесом прицілювання, який відрізняється наявністю трьох послідовних етапів: екстраполяція положення лазерної плями, стробування зони вимірювання та обробка зображення в стробованій зоні, що дозволяє збільшити швидкість обробки даних під час динамічного режиму роботи МСТ. Метод обробки зображень зі стробуванням може бути використаний спільно з будь-якими іншими відомим методом виявлення для збільшення ефективності системи розпізнавання образів. Правильно сформований строб дозволяє підвищити ймовірність правильного виявлення корисного сигналу робочим алгоритмом внаслідок зменшення зони пошуку і зменшити ймовірність помилкової тривоги, оскільки зменшується кількість помилкових об'єктів на зображенні, сформованих шумами камери і неоднорідним фоном в відеосюжеті МСТ.

Отримані у роботі результати можуть бути використані для удосконалення існуючих та створення нових стрілецьких тренажерів, або будь-яких інших аналогічних мультимедійних систем. Запропонований метод контурного аналізу зображень для фільтрації відеопотоку у сукупності з алгоритмами виявлення та визначення координат точки влучення дозволяє використовувати всього один комплект відеоапаратури без застосування додаткової системи підсвічування екрану та вирішена проблема нездатності існуючих методів проводити обробку відеосюжетів з фоном, що швидко змінюється. Це дозволяє розширити функціонал МСТ новими тренувальними відеосюжетами та ускладнити існуючі відеосюжети використанням рівневої структури сучасної ігрової індустрії. Запропоновані методи обробки сигналів і зображень реалізовані і протестовані з використанням мультимедійного стрілецького тренажера кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем Харківського національного університету радіоелектроніки.

Розроблені математичні моделі, методи та алгоритми впроваджені в навчальний процес на кафедрі «Медіаінженерії та інформаційних

радіоелектронних систем» Харківського національного університету радіоелектроніки та при виконанні двох планових науково-дослідних робіт, які виконувалися в Харківському національному університеті радіоелектроніки відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України.

Ключові слова: мультимедійний стрілецький тренажер, контурний аналіз, обробка зображень, метод стробування

Список публікацій здобувача:

1. Беляєв О.В., Карташов В.М. Виявлення об'єктів заданої форми та визначення їх координат на зображенні мультимедійного стрілецького тренажеру. *Системи обробки інформації* : зб. наук. пр. Харків, 2015. № 10. С. 16–21.

2. Bieliaiev, O., Kartashov, V., Loutouangou, F. Strobing the moving objects marks in the image processing system with stationary video camera // *Science Rise*. 2017. №3. pp. 66–71.

3. Карташов В.М., Беляєв О.В. Виявлення об'єктів заданої форми та визначення їх координат на зображенні мультимедійного стрілецького тренажеру. *Радіотехніка* : зб. наук. пр. Харків, 2015. № 182. С. 58-64.

4. Беляєв О.В., Зубков О.В., Карташов В.М. Застосування методу контурного аналізу зображень в системі обробки мультимедійного стрілецького тренажеру. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 20(1242). С. 109-118.

5. Беляєв О.В., Зубков О.В., Тарасов К.С., Карташов В.М. Обробка сигналів в універсальному мультимедійному стрілецькому тренажері. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 16(1238). С. 23-29.

6. Беляев А.В., Карташов В.М. Моделі сигналів в універсальному мультимедійному стрілецькому тренажері. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 44. С. 23-29.

7. Пат. № 80324 UA. Удосконалений електронний лазерний стрілецький тренажер. МПК F41G3/26 / Карташов В. М., Сідоров Г. І., Беляєв О. В.; заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u201213148; заявл. 19.01.2013; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10.

8. Пат. № 83387 UA. Удосконалений електронний лазерний стрілецький тренажер. МПК F41G3/26 / Сліпченко М. І., Карташов В. М., Сідоров Г. І., Беляєв О. В.; заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u201301988; заявл. 18.02.2013; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.

9. Беляев А.В., Карташов В.М., Корытцев И.В., Сидоров Г.И., Сидоров Я.Г. Универсальный мультимедийный стрелковый тренажер для подготовки силовых структур. *Науково-технологічне забезпечення оборонно-промислового комплексу України* : зб. матеріалів інформаційно-комунікативного заходу, Київ, 2014. С. 30-34.

10. Беляев А.В., Карташов В.М., Сидоров Г.И. Лазерный стрелковый тренажер для подготовки снайперов *Науково-технологічне забезпечення оборонно-промислового комплексу України* : зб. матеріалів інформаційно-комунікативного заходу, Київ, 2014. С. 35-38.

11. Карташов В.М., Беляев А.В. Задача обнаружения объектов заданной формы и определение их координат на изображении в мультимедийном стрелковом тренажере. *4-а Міжнародна науково-технічна конференція "Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних* : тези доп. (м. Харків, 13-16 жовтня 2015 р.). Харків : ХПІ, 2015. С. 13.

12. Беляев А.В., Карташов В.М. Предварительная фильтрация изображений в алгоритмах обработки информации мультимедийного

стрелкового тренажера. *70-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів* : тези доп. (м. Одеса, 1-3 грудня 2015 р.). Одеса : ОНАЗ, 2015. С. 9-12.

13. Беляєв О.В., Сідоров Г.І., Карташов В.М. Мультимедійні тренажери. *I Науково-практична конференція «Сучасні технології кіно»* : тези доп. (м. Шахтарськ, 2013 р.). Шахтарськ : Шахтарський кінотехнікум, 2013. С. 25-33.

14. Беляєв А.В., Сідоров Г.И. Метод имитации стрельбы из огнестрельного оружия в лазерном стрелковом тренажере. *17-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 22-24 квітня 2013 р.). Харків : ХНУРЕ, 2013. С. 104-105.

15. Беляєв А.В., Сідоров Г.И. Метод определения координат точки попадания лазерного луча в электронную мишень лазерного стрелкового тренажера. *18-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 14-16 квітня 2014 р.). Харків : ХНУРЕ, 2014. С. 99-100.

16. Беляєв А.В., Карташов В.М. Обнаружение объектов на изображении и измерение их координат. *19-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 20-22 квітня 2015 р.). Харків : ХНУРЕ, 2015. С. 24-25.

17. Беляєв А.В., Карташов В.М. Предварительная обработка сигналов и изображений в мультимедийном стрелковом тренажере. *20-й юбилейный международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 19-21 квітня 2016 р.). Харків : ХНУРЕ, 2016. С. 24-25.

ABSTRACT

Bieliaiev O.V. Signals and images processing methods improvement in multimedia shooting simulators. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical science by specialty 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2018.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and applied problem of increasing the efficiency of the operation of the MSS by developing and studying the methods and algorithms for recognizing images of geometric and kinematic characteristics of objects on the projection screen of the MSS using heterogeneous dynamic scenes.

The operation of the MSS in two operating modes has been analyzed and investigated: with a laser simulator and using a weapon of combat; Improved mathematical models of optical signals and noise in the image in multimedia infantry simulators, which, unlike the known ones, take into account the shape and size of laser spots and bullet holes on the background of photonic fractional noise, noise reading and quantization noise for two modes of operation of the MSS: with a laser simulator and with using weapons of warfare, which made it possible to formulate requirements for accuracy of bullet hole measurements and characteristics of correct detection of signals. The method of the theory of statistical solutions synthesized an optimal algorithm for detecting a useful signal. The optimum method for estimating the spatial coordinates of bulb holes and laser beam marks on the image of the projection screen of the MSS is developed, based on the criterion of maximum likelihood. The use of the method of contour analysis of images for the preliminary filtering of the background by frames of a video stream received from the camera of the MST is proposed. As a contour detector, a coherent-selective filter is used, which allows for fast-changing background filtering.

For the first time, the method of image processing in MSS was proposed using observation by the aiming process, which differs by the presence of three successive stages: extrapolation of the position of the laser spot, gating of the measuring zone and image processing in the stroke zone, which allows to increase the speed of data processing during the dynamic mode of operation of the MSS. The stroke image processing method can be used in conjunction with any other known detection method to increase the efficiency of the image recognition system. A properly formed strobe can increase the likelihood of the correct detection of a useful signal by a working algorithm due to the reduction of the search zone and reduce the probability of false alarms, as the number of erroneous objects in the image decreases with the noise generated by the camera and the heterogeneous background in the video of the MSS.

The results obtained in the work can be used to improve the existing and create new infantry simulators, or any other similar multimedia systems. The proposed method of contour analysis of images for filtering the video stream in combination with the algorithms for detecting and determining the coordinates of the point of impact allows you to use only one set of video equipment without the use of an additional screen backlighting system and solved the problem of the inability of existing methods to process video clips with a rapidly changing background. This allows you to expand the functionality of the MSS with new training video clips and complicate existing video clips using the level structure of the modern gaming industry. The proposed methods for processing signals and images are implemented and tested using multimedia infantry simulator of the Department of Media Engineering and Informational Radioelectronic Systems of the Kharkiv National University of Radio Electronics.

The developed mathematical models, methods and algorithms are implemented in the educational process at the Department of Mediaengineering and Informational Radioelectronic Systems of the Kharkiv National University of Radioelectronics and in the course of two scheduled research works carried out at

the Kharkiv National University of Radio Electronics in accordance with the thematic plan of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Key words: multimedia shooting simulator, contour analysis, image processing, gating method.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ МУЛЬТИМЕДІЙНИХ СТРІЛЕЦЬКИХ ТРЕНАЖЕРІВ.....	21
1.1 Оцінка завдань, що вирішуються за допомогою мультимедійних тренажерів	21
1.2 Особливості побудови стрілецьких тренажерів та мультимедійних стрілецьких тренажерів (МСТ)	23
1.3 Аналіз методів визначення координат влучання на сформованому зображенні.....	36
1.4 Обґрунтування вимог, щодо основних характеристик МСТ	41
1.4.1 Визначення вимог щодо точності вимірювання координат точок попадання.....	41
1.4.2 Вимоги до швидкодії блоку обробки зображень.....	44
Висновки по розділу 1	48
РОЗДІЛ 2	
СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ КООРДИНАТ КУЛЬОВИХ УТВОРЕНЬ І ВІДМІТОК ЛАЗЕРНОГО ПРОМЕНЯ НА ПРОЕКЦІЙНОМУ ЕКРАНІ МСТ	49
2.1 Удосконалення математичних моделей оптичних сигналів та шумів на зображенні в МСТ.....	49
2.1.1 Модель лазерної плями під час роботи МСТ в імітаційному режимі..	51
2.1.2 Модель кульового отвору під час роботи МСТ в бойовому режимі....	57
2.1.3 Вплив складових шуму на якість оптичного сигналу (зображення)....	60

2.2 Аналіз впливу умов розташування відеокамери МСТ на формоване зображення.....	67
2.2.1 Особливості освітлення тиру, що впливають на побудову МСТ	67
2.2.2 Вибір місця розташування відеокамери щодо проекційного полотна (екрану)	69
2.2.3 Вплив світлочутливості та відношення сигнал/шум відеокамери на якість зображення МСТ	71
2.3 Розробка методу виявлення відмітки від пострілу на проекційному екрані МСТ	72
2.4 Визначення координат центру точки влучення	77
Висновки по розділу 2	83

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПОПЕРЕДНЬОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ В МСТ 86

3.1 Визначення границь контуру відмітки в умовах відомих характеристик сигналу та фону	86
3.2 Визначення границь контуру відмітки в умовах апріорної невизначеності.....	98
3.3 Обґрунтування вибору границь контуру відмітки на екрані МСТ	101
3.4 Постобробка контурів.....	107
Висновки по розділу 3	112

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ СЛІДКУВАННЯ ЗА ТРАЄКТОРІЄЮ ПРИЦІЛЮВАННЯ В МСТ 114 |

4.1 Оцінка зміни координат лазерного променя під час процесу прицілювання.....	114
4.2 Організація стробування зони вимірювання в якій знаходиться лазерна ляма під час прицілювання	119

4.3 Аналіз ефективності розроблених методів обробки зображень МСТ.....	126
Висновки по розділу 4	132
ВИСНОВКИ.....	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	136
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертації	147
ДОДАТОК Б. Список наукових праць за темою дисертації.....	151

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АКФ – автокореляційна функція;
- ВКФ – взаємна кореляційна функція;
- ГП – графічний процесор;
- ІМО – імітатор мішеневої обстановки;
- ІХ – імпульсна характеристика;
- МІРЕС – кафедра медіаінженерії і інформаційних радіоелектронних систем;
- МО – Міністерство оборони;
- МСТ – мультимедійні стрілецькі тренажери;
- ПЗЗ – прибор із зарядовим зв'язком;
- ПК – персональний комп'ютер;
- УВФ – узгоджено-вибірковий фільтр;
- УМСТ – універсальний мультимедійний стрілецький тренажер;
- ФРТ – функція розсіювання точки;
- ФД – фотодіод, фотодіодний;
- ЧКП – частотний коефіцієнт передачі;
- ЦП – центральний процесор;
- ADU – analog-to-digital units – оцифрований рівень сигналу;
- HSL – Hue, Saturation, Lightness (тон, насиченість, яскравість) – колірна модель;
- HSV – Hue, Saturation, Value (тон, насиченість, значення) – колірна модель;
- ISO – International Organization for Standardization – одиниці вимірювання чутливості камери згідно стандарту (ISO);
- PRNU – Pixel response non-uniformity – нерівномірність у кількості зареєстрованих фотонів;
- S/N – співвідношення сигнал/шум;
- YUV – трикомпонентна колірна модель, де Y – яскравість, U і V – дві кольороворізносні компоненти;

Вб, Вв – серединні відхилення;

Г – границя зображення;

Сб, Св – серцевинні відхилення;

П – поперечник;

⊗ – символ операції двовимірної згортки;

⊖ – символ операції ерозії бінарного зображення.

ВСТУП

Актуальність теми.

Мультимедійні тренажерні системи і комплекси мають унікальні можливості надавати величезну кількість корисної інформації в максимально зручній, доступній формі і саме завдяки цьому знаходять широке застосування в різних сферах людської діяльності [1]. Особливу роль вони відіграють в процесі навчання: використання засобів мультимедіа для повторення, узагальнення та систематизації знань допомагає створити конкретне, наочно-образне уявлення про предмет, явище чи подію, дозволяє доповнити процес пізнання відтворенням та уточненням вже відомого, поглибленням знань, формуванням і вдосконаленням професійних навичок і компетенцій.

Мультимедійні тренажери знайшли широке застосування при навчанні керуванню транспортними засобами: літаками, гвинтокрилами, кораблями, при навчанні персоналу для управління складними виробничими процесами, або процесами, що пов'язані з підвищеною небезпекою, відпрацьовуванні дій в екстремальних ситуаціях тощо [2]. Особливу увагу подібним системам приділяють силові структури, застосовуючи їх для підготовки різних спеціалізованих загонів.

Значні можливості для формування навичок надають мультимедійні стрілецькі тренажери (МСТ) [3], які використовуються в області спорту, при підготовці та тренуванні спортсменів різного профілю: біатлоністів, п'ятиборців, стрільців, в розважальній індустрії [4].

Великий інтерес до МСТ пояснюється тим, що при їх використанні в процесі тренувань різко зростає ефективність навчання, скорочуються терміни навчання, може бути досягнута значна економія матеріальних і грошових ресурсів, стає можливим процес навчання без кульової стрільби, що практично повністю знімає жорсткі вимоги з безпеки. Перехід від

кульової стрільби з викидом хімічних продуктів згоряння пороху і забрудненням свинцем довкола до її імітації повністю знімає проблеми екології та захисту навколишнього середовища.

У сучасних умовах, у зв'язку з економічною ситуацією в Україні, здешевлення процесу підготовки стрільців набуває ще більшої актуальності.

Основні недоліки відомих мультимедійних стрілецьких тренажерів пов'язані з недосконалістю методів обробки сигналів і зображень в МСТ, які не забезпечують необхідної точності вимірювання просторових координат отворів, які утворюються на проекційному полотні екрану, а також мають недостатню імовірність правильного виявлення кульових отворів на фоні динамічних сцен.

Таким чином, актуальною є тема дисертаційних досліджень, направлених на вирішення науково-прикладної задачі підвищення ефективності функціонування МСТ шляхом розробки і дослідження методів і алгоритмів виявлення об'єктів та вимірювання їх геометричних і кінематичних характеристик на проекційному екрані МСТ при використанні неоднорідних динамічних сцен.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційні дослідження пов'язані з плановими науково-дослідними роботами «Розробка нових інформаційних вимірювальних систем і технологій координатно-часового метеорологічного забезпечення і зв'язку» (№ ДР 011U002541) та «Розроблення системи первинної обробки акустичних сигналів в умовах дії завад для содарів виявлення безпілотних літальних апаратів» (№ ДР 0117U002526), які виконувалася в Харківському національному університеті радіоелектроніки відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження.

Мета дослідження полягає в розробці та дослідженні методів обробки сигналів та зображень в МСТ, які дозволять виконувати виявлення об'єктів та вимірювання їх геометричних і кінематичних характеристик на

проекційному екрані МСТ при використанні неоднорідних динамічних сцен з необхідними якісними показниками.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися такі задачі:

- аналіз алгоритмів функціонування МСТ в двох режимах роботи: з лазерним імітатором і з використанням бойової зброї;
- розробка методу виявлення корисного сигналу та оцінювання просторових координат кульових утворень і відміток лазерного променя на зображенні проекційного екрана для двох режимів роботи МСТ;
- розробка методу фільтрації зображень в МСТ на основі контурного аналізу для вирішення задачі функціонування системи за умови динамічно мінливого фону;
- синтез методу обробки зображень в МСТ з метою підвищення швидкодії системи з використанням слідкування за процесом прицілювання.

Об'єктом дослідження є процес обробки сигналів і зображень в мультимедійному стрілецькому тренажері.

Предметом дослідження є моделі, методи і алгоритми для виявлення і визначення координат кульових отворів і відміток від лазерного випромінювача на динамічному фоні проекційного полотна мішені мультимедійного стрілецького тренажера.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи теорії статистичних рішень для синтезу оптимальних алгоритмів обробки сигналів в мультимедійному стрілецькому тренажері, метод контурного аналізу зображень, методи експериментального дослідження та комп'ютерного моделювання для визначення оцінок якісних характеристик алгоритмів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено математичні моделі оптичних сигналів та шумів на зображенні в мультимедійних стрілецьких тренажерах, які на відміну від відомих враховують форму та розміри лазерної плями і кульового отвору на фоні фотонного дробового шуму, шуму зчитування та шуму квантування для двох режимів роботи МСТ: з лазерним імітатором і з використанням бойової

зброї, що дозволило сформуванати вимоги до точності вимірювань кульових отворів і характеристик правильного виявлення сигналів.

2. Вперше розроблено оптимальний метод виявлення та вимірювання координат корисного сигналу на зображенні проекційного екрану для двох режимів роботи МСТ: з лазерними імітаторами та при використанні бойової зброї, який базується на обробці двійково-квантованих сигналів та на відміну від відомих методів дозволяє підвищити точність оцінки просторового положення центру корисного сигналу за рахунок зсуву вагових функцій, що описують форму сигналу, відносно прийнятої реалізації зображення.

3. Вперше запропоновано метод попередньої фільтрації зображень в МСТ на основі контурного аналізу, який відрізняється від відомих методів тим, що дозволяє виконувати обробку зображень в умовах апіорної невизначеності (з фоном, що динамічно змінюється);

4. Вперше запропоновано метод обробки зображень в МСТ з використанням слідування за процесом прицілювання, який відрізняється наявністю трьох послідовних етапів: екстраполяцією положення лазерної плями, стробуванням зони вимірювання та обробкою зображення в стробованій зоні, що дозволяє збільшити швидкість обробки даних під час динамічного режиму роботи МСТ.

Практична значимість і реалізація результатів роботи.

Отримані у роботі результати можуть бути використані для удосконалення існуючих та створення нових стрілецьких тренажерів, або будь-яких інших аналогічних мультимедійних систем. Запропонований метод контурного аналізу зображень для фільтрації відеопотоку у сукупності з алгоритмами виявлення та визначення координат точки влучення дозволяє використовувати всього один комплект відеоапаратури без застосування додаткової системи підсвічування екрану та вирішена проблема нездатності існуючих методів проводити обробку відеосюжетів з фоном, що швидко змінюється. Це дозволяє розширити функціонал МСТ новими тренувальними відеосюжетами та ускладнити існуючі відеосюжети використанням рівневої

структури сучасної ігрової індустрії. Запропоновані методи обробки сигналів і зображень реалізовані і протестовані з використанням мультимедійного стрілецького тренажера кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем Харківського національного університету радіоелектроніки.

Практична значимість результатів роботи підтверджена актами впровадження (Додаток А).

Особистий внесок здобувача.

Основні наукові результати, які викладені в дисертації, отримані здобувачем самостійно або за його безпосередньої участі.

В роботах [5,6] здобувачем проведено аналіз відомих методів визначення координат об'єкту пошуку. В роботі [7] розглянуто особливості побудови моделей корисних сигналів в системах відеоспостереження, лазерного трекінгу, мультимедійних стрілецьких тренажерах. У [8] запропоновано алгоритм обробки зображень і оцінки просторових координат спостережуваних відміток за допомогою контурного аналізу зображень. В роботі [9] автором синтезовані оптимальні алгоритми обробки сигналів в мультимедійному стрілецькому тренажері. В [5] автором запропонований метод збільшення швидкодії системи обробки зображень зі стаціонарною камерою за допомогою застосування операції стробування цілей. В патентах [7, 8] здобувач брав участь в розробці корисних моделей, в яких ним впроваджені і застосовані математичні моделі для систем розрахунку похибок на задану відстань при визначених метеоумовах.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях і форумах: 17-м, 18-м, 19-м і 20-м міжнародних молодіжних форумах "Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті" (м. Харків, 2013-2016 р.р.) [13-16], 1-й Науково-практичній конференції «Сучасні технології кіно» (м. Шахтарськ, 2013 р.) [1], інформаційно-комунікаційному заході "Науково-технологічне забезпечення оборонно-промислового комплексу України" (м. Київ, 14 жовтня 2014 року)

[3,4], 70-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (м. Одеса, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, 2015 р.) [17], 4-й міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем" (м. Харків, НТУ "ХП", 2015 р.) [18].

Публікації.

За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць: 5 статей у фахових виданнях України, з яких 1 стаття індексується в іноземних наукометричних базах (Index Copernicus, Google Scholar); 1 стаття у іноземному виданні (Index Copernicus); 2 патенти України на корисну модель; 9 тез доповідей у матеріалах науково-технічних конференцій та форумів.

Структура дисертаційної роботи.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновку і списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 153 сторінок. Дисертація містить 52 рисунки і 2 таблиці. Список використаних джерел налічує 115 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ МУЛЬТИМЕДІЙНИХ СТРІЛЕЦЬКИХ ТРЕНАЖЕРІВ

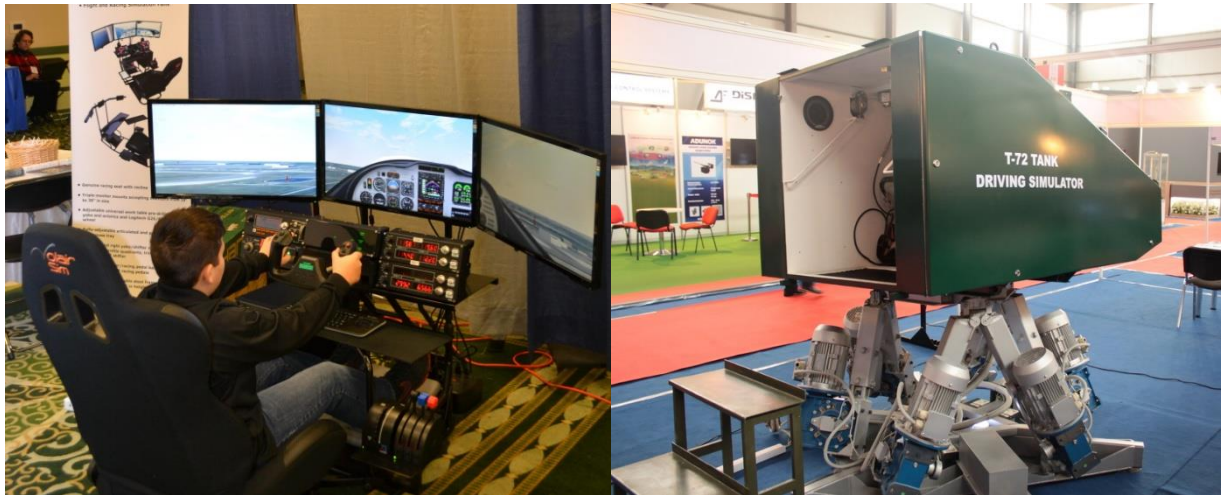
1.1 Оцінка завдань, що вирішуються за допомогою мультимедійних тренажерів

Різноманітні тренажери в даний час є доступним і ефективним засобом підготовки фахівців різного рівня кваліфікації в багатьох областях людської діяльності. Широкі можливості комп'ютерних технологій, які забезпечують істотно менші фінансові витрати в порівнянні з вартістю фізичних стендів, роблять цей напрям дуже перспективним.

Широке поширення в тренажерах останнім часом набули технології мультимедіа, що значно розширило їх функціональні можливості [19]. При цьому забезпечується:

- більш глибока індивідуалізація навчання;
- самостійне опрацювання матеріалу, що вивчається і ефективна реалізація сучасних методичних і дидактичних підходів;
- задана повнота представлення матеріалу;
- інтерактивна взаємодія учня з досліджуваним об'єктом;
- вільний вибір напрямку вивчення за рахунок гнучких систем гіпертексту;
- звуковий супровід досліджуваного матеріалу;
- можливість моделювання складних і екстремальних ситуацій;
- широке застосування сучасних засобів комп'ютерного дизайну та мультимедійних технологій;
- мінімальні витрати на підготовку, що дозволяє реалізувати часті і ефективні тренування;
- можливість навчання великої кількості людей одночасно.

Хороші результати показують мультимедійні тренажери в сфері навчання керування транспортними засобами: наземними, повітряними, морськими [20]. Тут є можливість імітації систем будь-якої складності, включаючи літаки (рис. 1.1 а) [21], броньовану техніку (рис. 1.1 б) [22] і навіть космічні апарати [23].



(а)

(б)

Рисунок 1.1 – Мультимедійні тренажери для управління повітряними судами (а) та наземною бронетехнікою (б)

Мультимедійні системи зайняли також гідне місце при навчанні персоналу для управління різними виробничими процесами, симуляція яких істотно полегшує це завдання [25]. Особливо важливо, що за допомогою мультимедійних тренажерів з'являється можливість навчати працівників діям під час екстремальних ситуацій. Набутий на тренажерах досвід може врятувати багато людських життів.

Останнім часом особливу увагу подібним системам приділяють також силові структури, застосовуючи їх для підготовки різних спеціалізованих загонів [26]. Затребувані мультимедійні стрілецькі тренажери і в області спорту, при підготовці та тренуванні спортсменів різного профілю: біатлоністів, п'ятиборців, стрільців [3].

1.2 Особливості побудови стрілецьких тренажерів та мультимедійних стрілецьких тренажерів (МСТ)

Стрілецькі тренажери можна умовно розділити на два покоління. Тренажери першого покоління містили муляжі цілей і мішеней, реєстрували, як правило, факт попадання або промаху і не мали у своєму складі потужного комп'ютера, засобів відображення місцевості і цілей на екрані. Тренажери другого покоління – це мультимедійні стрілецькі тренажери, в яких використовуються не тільки електронні пристрої для реєстрації влучення або визначення його координат, але й мультимедійна складова для відображення відео і аудіо інформації, та технічні засоби зворотного зв'язку між мішенню та зброєю.

Огляди тренажерів першого покоління наведені в роботах [1, 3, 6, 26], в яких проведений аналіз тренажерів в Україні і за кордоном.

Слід зазначити, що на території України першим розробку стрілецьких тренажерів з початку 60-х років розпочало Львівське виробниче об'єднання «Полярон»: тренажери для початкової стрілецької підготовки ЕПТ-2, ЕПТ-6 [27], для стрілецької підготовки біатлоністів СТБ-3. За своїми параметрами ці тренажери відповідали світовому рівню розвитку систем даного типу. Однак серійний випуск жодного з перерахованих тренажерів в країні не було впроваджено.

Провідними країнами в розробці стрілецьких тренажерів, за даними проаналізованих патентних джерел [28-40], є США, Англія, Німеччина, Японія, Швейцарія, Фінляндія. Найбільше число патентів і заявок на винахід відноситься до періоду 1990-2010 р., причому інтерес до тренажерів в цих країнах продовжує неухильно зростати, що обумовлено появою нових можливостей електроніки, телебачення, проєкційного відео та обчислювальної техніки. Провідними виробниками тренажерів для армії є фірми "International Laser Systems" (США) [41], "Laser Shot" (Англія) [42], для стрілецького спорту – "Noptel" (Фінляндія) [43,44].

Відзначимо, що стрілецькі тренажери орієнтовані головним чином на масове озброєння (автомати, гвинтівки), яким оснащується значна кількість військовослужбовців і яке призначене для використання без будь-яких основних засобів опори (станки, триноги). У зв'язку з цим, військовий, якого навчають в процесі роботи з тренажером, тримає зразок або імітатор зброї у всячому положенні або на підставці (сошці). Найбільш часто положення лінії прицілювання визначається за допомогою оптичного випромінювання інфрачервоного діапазону [45]. Однак в цьому випадку виникає ряд серйозних проблем, таких, як розробка позиційно-чутливого фотоприймача, формування спрямованого випромінювання з малим кутом розходження і великою інтенсивністю тощо. Від вирішення цих проблем залежать такі важливі характеристики тренажера, як точність реєстрації влучень і навіть можлива область застосування.

Різновиди тренажерів визначаються видами випробувань стрільбою, так як вони є, по суті, моделями. Узагальнена класифікація видів випробувань стрільбою зі стрілецької зброї приведена на рис. 1.2.

Відповідно до запропонованої класифікації можна виділити чотири види випробувань стрільбою, що розрізняються умовами і призначенням випробувань, а також видом критеріїв і гіпотез, що перевіряються в процесі цих випробувань. Фіксація ураження цілі або не ураження (попадання або промаху) відповідає перевірці непараметричної гіпотези. Вимірювання координат точок попадання в мішень з подальшим визначенням оцінок влучності і купчастості, таких як координати середньої точки попадання $Y_{стп}$, $Z_{стп}$, радіуси кіл, що накривають 100, 80 і 50 відсотків пробоїн R_{100} , R_{80} , R_{50} , поперечник P_{100} , серцевинні відхилення $C_{б}$, $C_{в}$ і серединні відхилення $B_{б}$, $B_{в}$, відповідає перевірці параметричної гіпотези. Випробування стрільбою по трафаретних мішенях можна співвіднести з перевіркою як параметричної (в разі вимірювання координат), так і непараметричної (при фіксації факту попадання у відповідну зону трафарету) гіпотез.



Рисунок 1.2 – Види випробувань і статистичні гіпотези

До тренажерів другого покоління відносяться мультимедійні стрілецькі тренажери, які є складною мультимедійною та інформаційно-вимірною системою.

Основними блоками цих мультимедійних тренажерів є персональний комп'ютер, відеопроєктор, проєкційний екран, макет зброї та реєструючий пристрій [46]. Програмне забезпечення відтворює за допомогою відеопроєктора на проєкційному екрані зображення мішеней або ігрові відеосюжети, в яких обігруються різні ситуації щодо протидії терористичній загрозі, бойових дій на різних географічних місцевостях, тощо.

В залежності від використовуваного методу реєстрації влучення, може змінюватись конструкція системи: наприклад, проєкційний екран може представляти собою забарвлену в білий колір сталеву плиту необхідного розміру (до 4 ... 5 метрів) товщиною до 10 мм, по периметру якої закріплені високочутливі акустичні датчики, підключені проводами до спеціального пристрою обробки акустичних сигналів, вихід якого підключений до комп'ютера [47]. В результаті удару кулі в металевий лист в ньому поширюються акустичні хвилі, що перетворюються датчиками в електричні сигнали. Останні, відповідно до обраного алгоритму, обробляються в пристрої обробки і координати точки попадання кулі передаються в комп'ютер, накладаються на відеокадр, в результаті чого відображається або поразка мішені або промах.

У разі використання тільки лазерних імітаторів зброї, використовують оптико-електронні перетворювачі на базі фоточутливих елементів [48]. Однак, більшість існуючих тренажерів являють собою відеосистему, в якій відеокамера фіксує нові кульові пробоїни у паперових або тканинних мішенях, або лазерний промінь на їх поверхні. Класифікаційні ознаки реєструючих пристроїв наведені на рис. 1.3.

Реєструючі пристрої можуть бути аналогового, дискретного і комбінованого типів з відносною або абсолютною шкалами. У разі абсолютної шкали вся мішень знаходиться в полі зору пристрою, а в разі відносної - тільки частина (в околиці цілі або певних реперних точок). В останньому випадку роздільна здатність і відповідно точність вище.

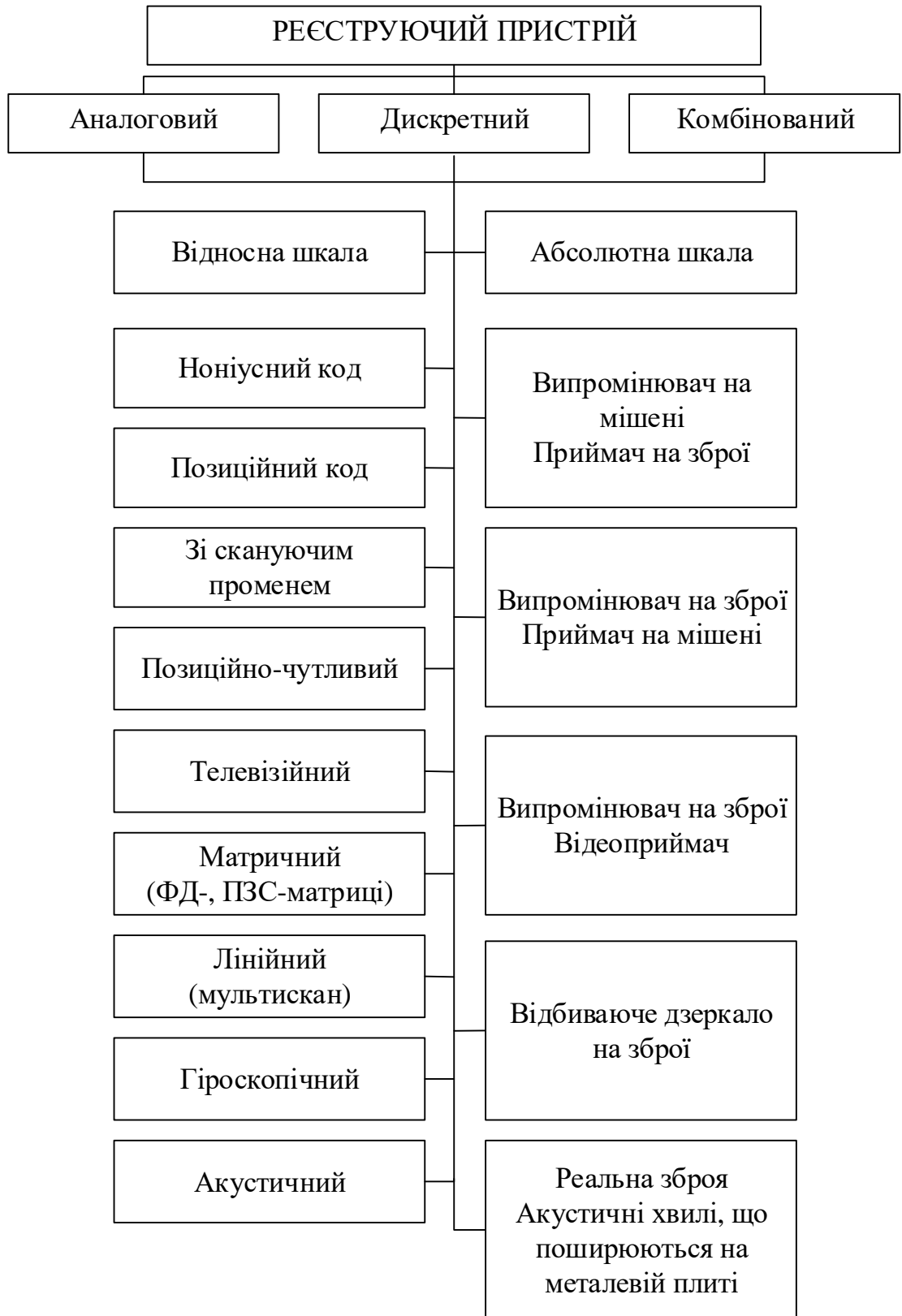


Рисунок 1.3 – Класифікаційні ознаки датчиків

У всіх випадках необхідно «візуалізувати» точку наведення і визначити її координати, що можна забезпечити за допомогою двох основних схем:

прямої схеми з індикатором точки наведення, встановленим на зброї, і інверсної схеми з визначником координат точки наведення, встановленим на зброї.

З урахуванням способу «візуалізації» точки наведення і визначення її координат кількість варіантів можна розширити до чотирьох (див. рис. 1.3):

- тренажери з джерелом випромінювання на зброї і фотоприймальним блоком, розміщеним на мішені [28 – 34];
- тренажери з джерелом випромінювання на зброї і фотоприймальним блоком розташованим навпроти відбиваючої мішені [36];
- тренажери з випромінюючої мішенню і фотоприймачем або фотоприймальним блоком на зброї [37 – 39];
- тренажери, в яких джерело і приймач випромінювання розташовані на мішені, а зброя забезпечується відображаючим світло елементом [40].

Останні тренажери найбільш вигідні з точки зору масогабаритних вимог до навчального зброї, але сильно програють в енергетиці, так як довжина шляху оптичних променів зростає вдвічі і відповідно освітленість на тому ж майданчику зменшується в 4 рази. Крім того, кут нахилу відбитого променя в два рази більше кута нахилу падаючого променя [49] і відповідно зменшується розмір поля реєстрації. Нарешті, положення відбитої плями на екрані сильно залежить від координат зброї. Тому дана схема може використовуватися практично тільки при роботі зі станка і у випадку більшості тренажерів недоцільна.

Існують системи, в яких джерело і приймач випромінювання розміщуються на зброї, а мішень забезпечується відбиваючим покриттям або відбивачами, які повертають випромінювання в напрямку його приходу [50, 51]. До таких систем можна віднести стрілецькі тренажери «Рубін», Росія [52]. Однак тренажери цього типу в меншій мірі, ніж тренажери перших трьох типів, відповідають критеріям мінімізації масогабаритних характеристик вузлів, що розміщуються на зброї. Тому застосування такої схеми для зразків спортивної і ручної стрілецької зброї недоцільно.

Системи з акустичною реєстрацією влучення, що були описані раніше, на відміну від описаних електронних приймачів, можуть працювати лише з реальною зброєю, тоді як попередні реєструючі пристрої працюють лише за лазерними імітаторами. На основі даного принципу роботи працюють стрілецькі тренажери «Інгул», Кіровоград (Україна) [53] та «ИСТ-Механика» (рис. 1.4), Москва (Росія) [54].



Рисунок 1.4 – Акустичний тир «ИСТ-Механика» та металеві мішені

Недоліки акустичних реєструючих пристроїв:

- у наявності рикошету, що не дозволяє тренуватися поблизу екрану, коли стрілець може відчувати себе учасником подій, маючи в полі зору тільки зображення на екрані;

- у неможливості виготовлення екрана з одного цільного листа, так як в цьому випадку транспортування його в приміщення тиру можлива тільки при будівництві через стелю;

- при монтажі екрану великого розміру в приміщенні тиру шляхом зварювання не забезпечується однорідність матеріалу в межах всього екрану через наявність зварювальних швів, що призводить до зміни часу поширення акустичних хвиль в різних напрямках щодо розрахункових величин i , отже, до похибки виміру;

– існування залишкових акустичних коливань в металевому екрані після удару кулі ускладнює забезпечення одночасної тренування декількох стрільців.

В останні роки найбільше число патентів і рекламованих тренажерів містять лазерний випромінювач на зброї і відеокамеру, за допомогою якої визначаються координати світлової плями на екрані [55-58]. Є також повідомлення про ряд тренажерів з випромінювачем на зброї, в якості якого використовуються інші джерела випромінювання, наприклад, лампочка або світлодіод [59]. Але великі розміри формованої на мішені світлової плями дозволяють судити тільки про факт потрапляння в коло певного розміру, або визначати достоїнство без вказівки сектора попадання. Також існує ряд тренажерів, в яких відеокамера фіксує не точку влучення, а кут прицілювання зброї за допомогою деяких світлових маркерів, розташованих на зброї. Такий тип тренажерів та комплект відеокамери випускають для модулю віртуальної реальності ігрової приставки Sony Playstation – PS VR Aim Controler та PS Eye camera (рис. 1.5) [61]. Але в даних системах дуже низька точність прицілювання та для професійних тренувань зі стрільби їх неможливо застосовувати.



Рисунок 1.5 – Стрілецькі тренажери PS VR

В [61, 62] описані пристрої, в яких відеокамера встановлена навпроти екрану і весь екран знаходиться в межах її кута поля зору. Таку схему використовують більшість сучасних існуючих тренажерів, наприклад стрілецький тренажер «PM Shooter», Польща (рис. 1.6) [63]. У пристрої навпроти екрану тренажера за лінзою встановлений екран, зображення з якого фіксується відеокамерою. В обох випадках роздільна здатність визначається стандартом розкладання відеокамери, а швидкодія – частотою кадрової розгортки. Зображення відеокамери аналізується методами розпізнавання зорових образів.



Рисунок 1.6 – Стрілецький тренажер «PM Shooter»

Даний вид тренажерів, із використанням відеореєструючого пристрою (відеокамери) (рис. 1.7), можна назвати універсальним, адже вони здатні працювати як з реальною зброєю, так і з лазерними імітаторами, що являє собою одну з головних переваг даних систем.

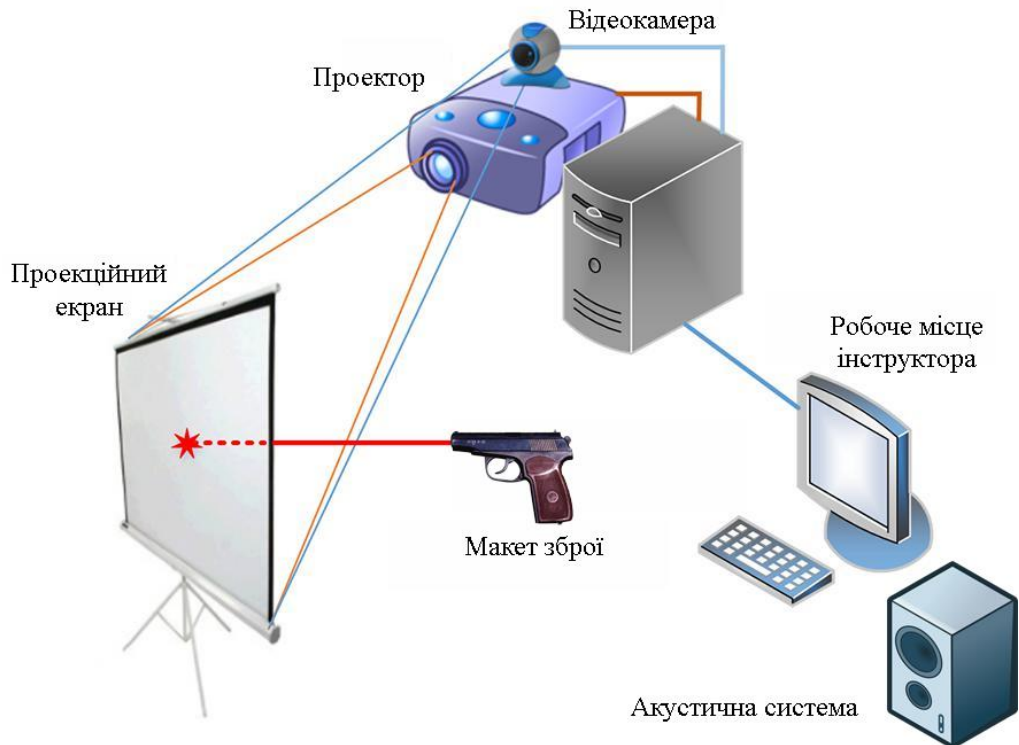


Рисунок 1.7 – Схематичне позначення МСТ з відеомішенню

До подібного виду тренажерів відноситься і дослідницький стенд кафедри МІРЕС ХНУРЕ [3] – Універсальний мультимедійний стрілецький тренажер (УМСТ).

До його складу входять:

1. Тренерський пульт управління (системний блок, монітор, клавіатура, «миша») з платою відеозахвату.
2. Блок обробки з відеокамерами і сполучними проводами.
3. Програмне забезпечення блоку обробки.
4. Акустична стереосистема імітації звуку пострілу.
5. Імітатор мішеневої обстановки (ІМО), що складається з відео проектора з проекційним екраном.
6. Імітатори зброї, що складаються з навчальних зразків даного виду зброї (Пістолет Макарова, гвинтівка QO-78) з лазерними насадками (рис. 1.8).
7. Вогняний рубіж до чотирьох стрільців (рис. 1.9).



Рисунок 1.8 – Макети зброї



Рисунок 1.9 – Загальний вид універсального мультимедійного стрілецького тренажера

Тренажер призначений для навчання і тренування одиночному і груповому веденню бою в складі підрозділу, забезпечує відображення місцевості, місцевих предметів, рухомих і нерухомих цілей, спеціальних ефектів (звуку пострілу, ураження цілей, диму і коливання листя від вітру

тощо), відображення результатів на моніторі тренера, балістичні розрахунки траєкторій, рішення задачі зустрічі кулі з рухомою ціллю.

Як і в раніше описаних тренажерах, вибрані користувачем відеосюжети проециються відеопроєктором на тканинний екран. Стрілець робить постріл з вогнепальної зброї по екрану, в останньому утворюється пробоїна. Реєстрація пробоїн здійснюється відеокамерою високої роздільної здатності в інфрачервоному діапазоні. Зображення пробоїн оцифровується і вводиться в персональний комп'ютер (ПК) за допомогою стандартної відеокарти з функцією відеозахоплення зображення. У ПК з використанням спеціально розробленого програмного забезпечення визначаються координати пробоїни, які далі використовуються для обробки результатів стрільби.

Принцип роботи тренажера при стрільбі з пневматичної зброї і лазерних макетів-імітаторів стрілецької зброї з лазерними вставками мало відрізняється від вищерозглянутого. Відмінність полягає лише в автоматичному перевстановленні порогів реєстрації пробоїн, оскільки зменшується розмір пробоїни при стрільбі з пневматичної зброї, а «пробоїною» при режимі імітації стрільби є короткочасне пляма лазерного променя на екрані. Унікальною перевагою даного тренажера є наявність легкознімного екрану, що дає можливість швидкого переобладнання будь-якого існуючого тиру в мультимедійний тип УМСТ.

Завдяки використанню дистанційного безконтактного методу визначення координат точки влучення кулі стрілянина в УМСТ можлива з будь-якого неавтоматичного або одиночними пострілами з автоматичної вогнепальної чи пневматичної зброї незалежно від величини початкової дульної енергії кулі і її калібру.

Крім стрільби по об'єктах відеосюжету УМСТ передбачає можливість стрільби по відеозображенням стандартних мішеней, що з'являються і переміщуються (рис. 1.10) [64]. В цьому випадку можна змінювати кількість появ мішені, час знаходження мішені на екрані, швидкість і характер

переміщення мішені, а також масштаб зображення мішені для імітації стрільби на дальність.



Рисунок 1.10 – Перелік рухомих мішеней УМСТ

Місця появи мішеней і траєкторії їх переміщення можуть задаватися випадковим чином, що виключає можливість «звикання» стрілка і попереднього прицілювання в точку появи мішені. Результат кожного пострілу відображається на екрані у вигляді кольорової позначки точки попадання, видимої з лінії вогню. В кінці вправи виводиться таблиця з наступними результатами: кількість очок за кожен постріл, час між пострілами, сумарна кількість очок за все вправа і сумарний час.

Задачами, які необхідно вирішити у відповідності з основними науково-технічними вимогами при розробці тренажера другого покоління, є:

1. Відображення на екрані тренажера місцевості, місцевих предметів і цілей.
2. Організація спеціальних ефектів (звукових і зорових).
3. Балістичні розрахунки і розрахунок координат точки влучання.
4. Вимірювання координат точки влучання.

5. Імітація силового впливу (віддачі) при здійсненні пострілу.

Дана дисертаційна робота присвячена четвертій задачі, тобто розробці та дослідженню нових систем визначення координат влучення для стрілецьких тренажерів з метою удосконалення їх технічних характеристик. Цю задачу, в свою чергу, можна розбити на наступні завдання:

1. Обґрунтування необхідної точності вимірювань, розмірів поля реєстрації мішені і швидкодії.

2. Розробка алгоритмів виявлення точки влучення з використанням сформованих критеріїв.

3. Обґрунтування основних технічних параметрів системи на основі проведених експериментальних досліджень в критичних умовах роботи.

Остання задача повинна вирішуватися у застосуванні до конкретного тренажеру з урахуванням його функціонального призначення. Мається на увазі, зокрема, кількість стрільців, що одночасно навчаються, і режими стрільби (автоматичний або одиночний), параметри освітленості приміщення і розташування вимірювачів координат в просторі.

1.3 Аналіз методів визначення координат влучання на сформованому зображенні

Аналіз літературних джерел [5, 65-73] показав, що для визначення координат влучання на сформованому зображенні можуть бути використані наступні методи:

1. Метод кореляційної обробки.
2. Метод узгодженої фільтрації.
3. Метод пошуку центру фрагмента.
4. Метод моментів.
5. Метод покадрового віднімання.

Процедура кореляційної обробки [71], за аналогією з обробкою одновимірних сигналів, полягає в обчисленні взаємної кореляційної функції

$$R_{s,s_0}(\Delta x, \Delta y) = \iint_{x y} s(x + \Delta x, y + \Delta y) \Delta s_0(x, y) dx dy \quad (1.1)$$

між оброблюваним зображенням з камери $s(x,y)$ і зразковим зображенням $s_0(x,y)$. При цьому в результаті пошуку максимуму функції $R_{s,s_0}(\Delta x, \Delta y)$ отримуємо оцінки Δx , Δy – відносних зсувів зразкового зображення щодо оброблюваного. Значення максимуму функції використовується для вирішення завдання виявлення, подібно випадків виявлення одновимірних сигналів в багатоканальному кореляційному приймачі. Таким чином, вираз (1.1) описує алгоритм функціонування багатоканального по просторовим координатам кореляційного приймача виявлення-вимірювання.

Вираз (1.1) може бути обчислено також за допомогою процедури перетворення Фур'є:

$$R_{S,S_0}(\Delta x, \Delta y) = F^{-1}\left(F(s)F^*(s_0)\right), \quad (1.2)$$

де F – перетворення Фур'є;

F^{-1} - зворотне перетворення Фур'є;

F^* - процедура комплексного сполучення.

Як видно, обчислювальна складність процедури виявлення необхідного фрагмента визначається розмірами вихідного зображення і може виявитися суттєвою при використанні камер з високою роздільною здатністю, що ускладнить реалізацію процедури в реальному масштабі часу – особливо при багатоальтернативному виявленні.

Наступним є метод узгодженої фільтрації [72]. Він реалізується шляхом обробки спостережуваного зображення двовимірним узгодженим фільтром:

$$z(\Delta x, \Delta y) = s(x, y) \otimes h(x, y). \quad (1.3)$$

У виразі (1.3) $h(x, y)$ представляє собою імпульсну характеристику фільтра, яка повторює шуканий сигнал $s_0(x, y)$ і є твором двох функцій розсіювання точки (оптичних систем лазера і реєструючої камери, відповідно):

$$h(\Delta x, \Delta y) = h_1(x, y) \otimes h_2(x, y). \quad (1.4)$$

Після обчислення виразу (1.3), максимальне значення $z(\Delta x, \Delta y)$ дає інформацію про енергію сигналу і може використовуватися в задачі виявлення, а координати точки $\max(z(\Delta x, \Delta y))$ дають оцінку різниці між координатами шуканого фрагмента на зображенні з камери і на шаблоні. Фактично, даний метод еквівалентний методу кореляційного прийому, однак при малих розмірах виявленого об'єкту може бути більш ефективним за критерієм використання обчислювальних ресурсів [5].

Процедура пошуку центру фрагмента [73] полягає в ітераційному оцінюванні координат центру області і реалізований наступним чином.

За наявного зображення $s(x, y)$ оцінюється граничне значення яскравості s_{max} , після чого відповідно до відомих шумових характеристик сенсора визначаються порогові рівні s_1 і s_2 . Після цього, виділяються всі області зображення, для яких $s(x, y) > s_1$ і в околицях кожної з них починається пошук безперервних областей, в межах яких $s(x, y) > s_2$. При цьому одна точка може входити лише в одну область – після того, як точка була внесена в список для однієї з областей, вона виключається з подальшого розгляду.

Ітераційна процедура пошуку центру конкретної області виконується наступним чином. Починаючи з деякої точки, що належить даній області, проводиться горизонтальний переріз, в межах якого визначається безперервний відрізок максимальної довжини, для всіх точок якого $s(x, y) > s_2$.

Координати крайніх точок відрізка x_1, x_2 фіксуються, і визначається координата $x'(1) = x_1 + x_2/2$. У точці з горизонтальною координатою $x'(1)$ проводиться вертикальний перетин, для якого відбувається аналогічний процес визначення координат меж і центру по вертикалі. Таким чином отримують координату $y'(1)$. Ітерації тривають до тих пір, поки похибка визначення не стане менше заданої межі. Це контролюється по різницям оцінок $\Delta x(i) = x'(i) - x'(i-1)$, $\Delta y(i) = y'(i) - y'(i-1)$.

З усіх областей, визначених цим методом, вибирається одна – та, для якої площа мінімально відрізняється від площі шуканого фрагмента.

Метод моментів [75] полягає в обчисленні центру мас зображення згідно наступним співвідношенням:

$$x' = \frac{1}{P} \sum_x \sum_y s(x, y) K_x(x, y); \quad (1.5)$$

$$y' = \frac{1}{P} \sum_x \sum_y s(x, y) K_y(x, y), \quad (1.6)$$

де $p = \sum_x \sum_y s(x, y)$;

$$K_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & n_x \\ 1 & 2 & \dots & n_x \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 2 & \dots & n_x \end{bmatrix};$$

$$K_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 2 & 2 & \dots & 2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_y & n_y & n_y & n_y \end{bmatrix}.$$

Даний метод є розширенням методу моментів для випадку двовимірного сигналу (тобто зображення) і застосовується для виявлення

контрастного об'єкта на темному фоні (зокрема, плями від лазерного випромінювача). У той же час наявність сторонньої засвітки і адитивного шуму призводить до різкого зростання похибок оцінювання координат цим методом.

Одним з найбільш поширених методів обробки в мультимедійних стрілецьких тренажерах є метод покадрового (або черезкадрового) віднімання [11,12, 46, 48]. Сутність методу полягає в виконанні віднімання з поточного кадру попереднього.

$$s(x, y) = s_n(x, y) - s_{n-k}(x, y), \quad (1.7)$$

де $s(x, y)$ – матриця різності;

$s_n(x, y)$ – поточний n кадр;

$s_{n-k}(x, y)$ – попередній кадр, що відстає від поточного на k .

Метод є досить простим, але суттєвим недоліком його є неможливість роботи при відеоряді, кадри якого швидко змінюються. Ймовірність правильного визначення буде тим гірше, чим частіше виконуються зміни. При зміні зображення через кожні два кадри та черезкадровій обробці ймовірність правильного визначення складає 32,3% [14]. Даний метод також дуже чутливий до власного шуму камери, що збільшує похибку вимірювань координат точки влучання [15].

Аналіз методів обробки зображень в МСТ показує, що існуючі методи обробки мають ряд недоліків: недостатньою у ряді випадків виявляється точність вимірювання координат влучань, деякі алгоритми обробки не виконують вимог щодо швидкодії системи, при використанні камер високої роздільної здатності, а при використанні в мультимедійних сюжетах неоднорідного фону відбувається помилкове спрацьовування системи. Отже, необхідне удосконалення існуючих методів або створення нових, більш досконалих.

1.4 Обґрунтування вимог, щодо основних характеристик МСТ

1.4.1 Визначення вимог щодо точності вимірювання координат точок попадання

Види вправ і правила їх виконання регламентуються відповідними документами. Номенклатура зброї (автомат і ручний кулемет, кулемет Калашникова на сошках, снайперська гвинтівка, кулемет Калашникова на станку, станковий кулемет) і види вправ, в тому числі для групового бою, містяться в Настанові зі стрілецької справи [75-77].

Положення для стрільби різноманітне, дальність змінюється від 35 м до 1100 м. Головне призначення тренажерів – прищеплення навичок стрільби для тих хто навчається, що відповідає початковим вправам у випадках бойових стрільб. Для початкової вправи з автомата (карабіна) [75] ціль – нерухома грудна фігура з колами (мішень № 4) на дальності 100 м або атакуючий стрілок – ростова фігура (мішень № 8), що з'являється на необмежений час на дальності 200 м. Положення для стрільби: лежачи з упору. Оцінка бальна.

Другим рівнем навчання є навчальні вправи, для яких регламентуються види цілей (такі, що з'являються на короткий час, рухомі, нерухомі), кути огляду, номери мішеней, дальність, темп стрільби тощо. Цілі можуть з'являтися в секторі в межах 90° . У разі навчання взаємодії у вправах одночасно беруть участь солдати підрозділу до 8 осіб.

В [75-77] похибка вимірювання координат точок попадання в паперову мішень не оговорюється і про неї можна судити, виходячи з практики ручних вимірювань. Зокрема похибка визначення центру пробоїни лежить в межах $\Delta = \pm(10...20)\%$ від діаметра кулі калібру $d = 5.45...9$ мм. Це дає в разі дальності стрільби $L = 100$ м, калібру $d = 5.45$ мм і відносної похибки $\Delta = 0.2$ кутову похибку

$$\delta = \frac{\Delta \cdot d}{L} = \frac{\pm 0.2 \cdot 5.45}{100} \approx \pm 0.01 m. \delta. \quad (1.8)$$

Однак, фактично з-за повороту мішені і відповідно відхилення осей Y, Z від вертикалі і горизонталі виникає похибка, що перевищує (1.8) на один-два порядки і складає ± 0.5 т.д..

Вправи для рядового і начальницького складу національної поліції України регламентовані курсом стрільб згідно з наказом Національної поліції України № 900 від 20.09.2016 р. [78].

Використовувані в [78] грудна фігура з колами (мішень № 4) і ростова (мішень № 8) наведені на рис. 1.11 та 1.12.

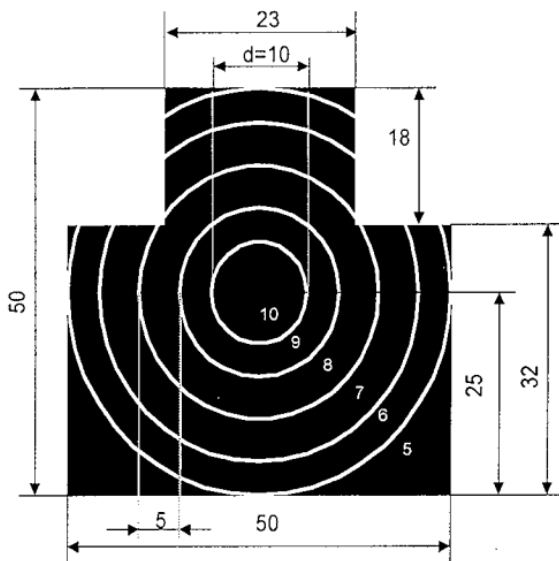


Рисунок 1.11 – Мішень №4

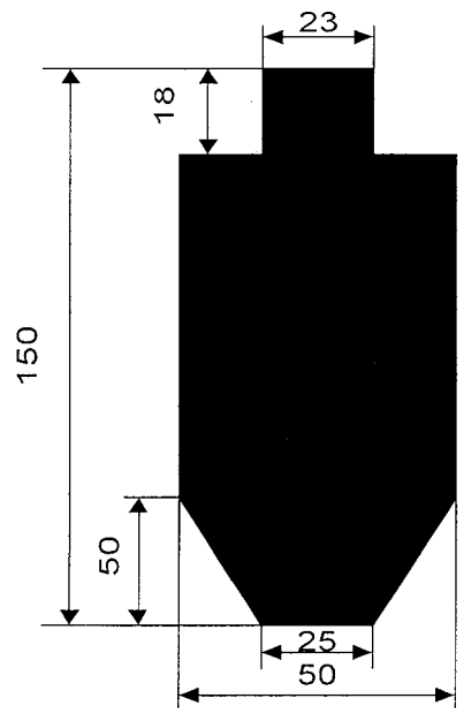


Рисунок 1.12 – Мішень №8

Результати оцінюються за кількістю вибитих очок. При цьому точність вимірювань ніяк не проговорюється. Дальність стрільби коливається в межах 10...100 м, кут огляду на мінімальній дальності у випадку використання мішені № 4 становить 0.05 радіан, а в разі мішені № 8 – 0.15 радіан. Положення при стрільбі різноманітне (стоячи з руки, з коліна, лежачи з руки

або лежачи з упору). Похибка визначення координат курсом стрільб [78] також не оговорюється.

Правила проведення спортивних стрілецьких змагань і оцінки їх результатів, встановлені Федерацією стрільби України [79,80], передбачають стрільбу зі службової, довільної і пневматичної гвинтівок, а також стрільбу з великокаліберного револьвера, пістолета і малокаліберного пістолета. Мішені для спортивної стрільби різноманітні і мають концентричні кола різного номіналу. Так, наприклад, на мішені «Бігучий олень» є концентричні кола номіналом 5, 4 і 3. Діаметр кола номіналом 3 складає 450 ± 1 мм. На «кабані» є кола номіналом 5...1. Діаметр кола номіналом 1 становить 250 ± 1 мм. Фігурна мішень № 1 (силует) має овали номіналом 10...5 шириною $450 + 3$ мм і висотою 1200 мм.

В явному вигляді вимоги по точності визначення координат пробоїн не задані, так як вони безпосередньо не вимірюються, а номінал визначається візуально. Пробоїна на мішені з габаритними колами або овалами вважається такою, що порушила габарит, біля якого вона знаходиться, і зараховується в більшу сторону, якщо калібр пробоїни накриває, хоча б мінімально, зовнішню сторону габаритної лінії. Тому можна оцінити похибку по допуску на діаметр габаритних кіл, які збільшуються зі зменшенням номіналу (збільшенням діаметра), тобто з віддаленням від центру мішені. Наприклад, в разі використання мішені № 4 допуск лежить в межах $\pm 0.2...0.6$ мм, а мішені № 7 – $\pm 0,2...0,4$ мм.

У правилах міжнародних змагань визначена допустима похибка вимірювання в межах ± 0.1 мм.

На завершення слід зазначити наступне.

1. У вправах зі стрільби використовуються різні дальності. У початкових вправах переважно 100...200 м для стрілецької зброї (карабіна, автомата, кулемета) і 25...50 м для пістолета і револьвера.

2. Використовуються різноманітні силуетні мішені з колами для визначення вибитих очок і без них для визначення факту попадання.

3. Цілі бувають нерухомі і рухомі. Кутова швидкість фронтального переміщення цілей становить до 0,03 рад/с у випадку піхоти, до 0,1 рад/с в разі транспортних засобів.

4. Положення для стрільби переважно стоячи, а також з коліна і лежачи (з упору або без). У початкових вправах ведеться стрілянина лежачи з упору.

5. Розміри цілей і їх розташування по фронту і в глибину вимагають кути огляду до 0,2 рад (10°) по куту підвищення і до 90° по азимуту.

6. У вправах стрільба ведеться з фіксованої позиції (або з зупинки) по нерухомій або рухомій цілі і, навпаки, з рухомого носія (бойової машини або гвинтокрила) по рухомим і нерухомим цілям.

1.4.2 Вимоги до швидкодії блоку обробки зображень

Очевидно, що при визначенні швидкодії блоку обробки зображень слід виходити з умови адекватності моделі (імітатора) реальному об'єкту [81, 82].

У разі стрільби зі зброї можна виділити фази:

- наведення (прицілювання) і спуск гачка (закінчення першої фази);
- спрацювання спускового механізму і наколювання капсуля (закінчення другої фази);
- займання пороху, рух кулі по каналу ствола із збуренням руху і виліт з каналу ствола (закінчення третьої фази).

Від закінчення першої до закінчення третьої фаз відбувається зміна напрямку осі каналу ствола з двох причин, однією з яких є реакція віддачі, а друга – «зрив» спускового гачка (смикання через неправильні дії стрілка). Відхилення по першій причині (кут вильоту) враховується за рахунок приведення до нормального бою (пристрілки зброї).

«Пристрілка» імітатора полягає в юстируванні положення датчика (наприклад, лазерного випромінювача або оптико-електронного приймача) щодо прицільних пристосувань. Щодо точки наведення в тренажері моделюється траєкторія, і з цієї причини облік кута вильоту і визначення для цього точки наведення в кінці третьої фази не потрібно. З іншого боку, для

контролю «зриву» спускового гачка необхідне визначення положення точки наведення в кінці третьої фази, яке буде залежати одночасно від правильності наведення, реакції віддачі і від реакції на «зрив» спускового гачка.

Так як імітатор відтворює силовий вплив частково, то «кут вильоту» з нього не адекватний куту вильоту зі зброї, і залишається єдиною можливим визначити «кут вильоту» експериментально, шляхом усереднення результатів різних «стрільців». Вихід «кута вильоту» за межі допустимої величини можна буде відносити при цьому за результат «зриву» спускового гачка.

Таким чином, можна запропонувати кілька варіантів вимірювань і використання їх результатів для оцінки результатів стрільби.

1. Вимірювання координат точки наведення в момент спуску гачка. Це контролює правильність наведення і не контролює «зрив» спускового гачка і правильність утримання «зброї».

2. Вимірювання координат точки наведення в кінці третьої фази. Це контролює інтегрально правильність наведення і «зрив», а також утримання «зброї» (реакцію віддачі). Для визначення точки наведення за цим варіантом потрібно врахувати «кут вильоту».

3. Два вимірювання координат точки наведення. Одне вимірювання в кінці першої фази, а друге – в кінці третьої. Це дозволяє з інтегрального результату виділити правильність наведення і «зрив» з утриманням «зброї».

Допустима затримка вимірювання щодо заданого моменту часу залежить від необхідної точності і швидкості зміни положення точки наведення (осі каналу ствола). Час між двома вимірами дорівнює часу між закінченнями першої і третьої фаз.

Для відповіді на поставлені питання скористаємося вимірами, проведеними в [83]. У даній роботі зареєстровані за допомогою вимірювальної апаратури координати точок наведення з дискретністю за часом 2 мс при стрільбі стоячи і з упору в режимах одиночної і автоматичної стрільби для десяти «стрільців». На рис. 1.13 показані осцилограми при

«стрілби» стоячи (одиначний постріл), стоячи (три «постріли» в автоматичному режимі) і з упору (три «постріли» в автоматичному режимі).

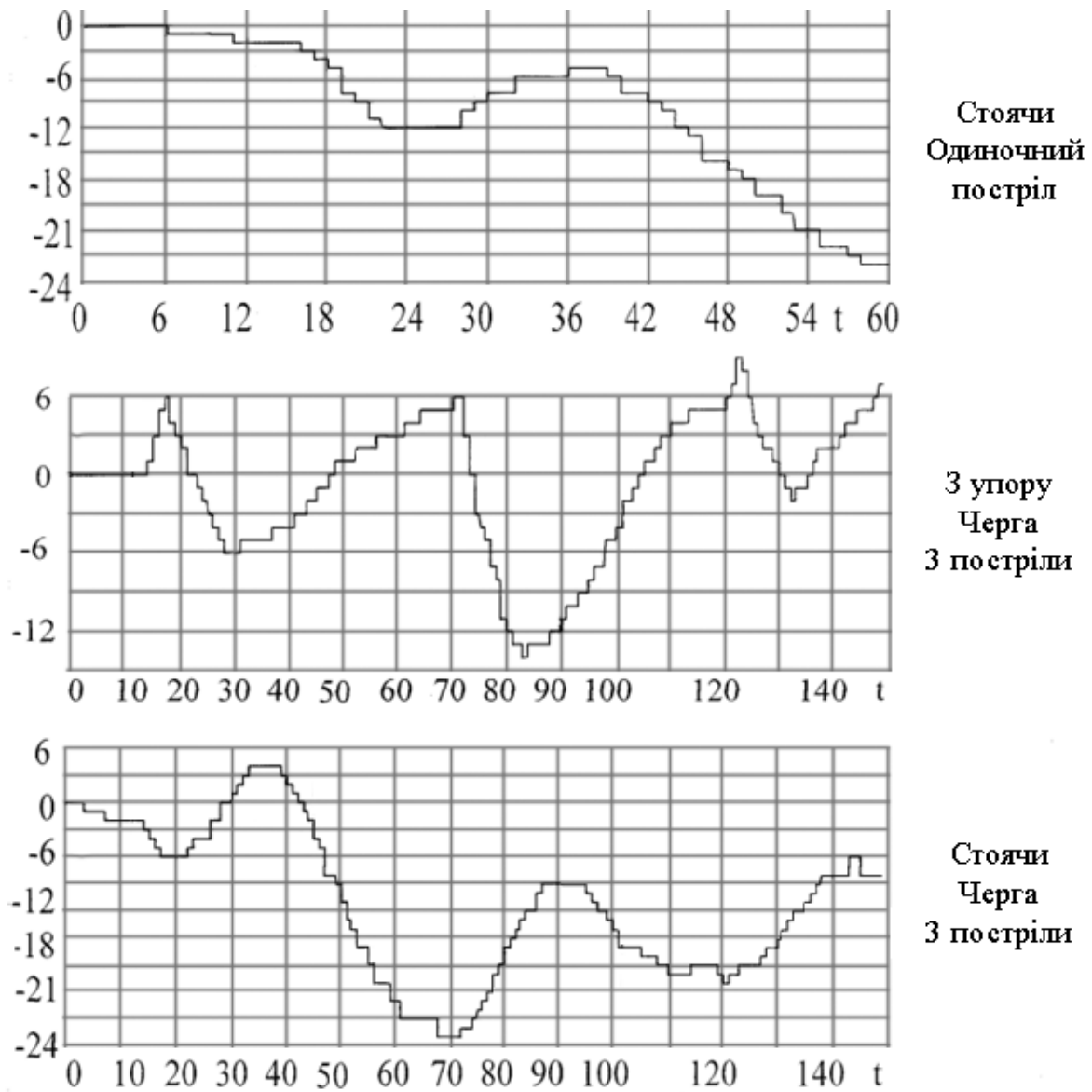


Рисунок 1.13 – Коливання по верху під час наведення і утримання зброї при стрільбі в одиначному і автоматичному режимах. По осі часу t 1 відлік відповідає 2 мс, по осі y 1 квант відповідає 0,5 т.д.

Перші «постріли» в автоматичному режимі відповідають режиму одиначного вогню. На рис. 1.13 відзначені зони (20-22 мс) відкритого стану повітряного клапана імітатора віддачі зброї. Початок цих зон відповідає спуску гачка і наколюванню капсуля (часом спрацьовування повітряного

клапана нехтуємо). Величина кванта по верху (Y) і боку (Z) відповідає допустимій помилці 0,5 т.д. За результатами обробки осцилограм для всіх випробувачів, всіх положень і обох режимів стрільби можна зробити наступні висновки.

Перед першим пострілом «стрілок» стабільно утримує зброю. В межах зони відкриття повітряного клапана першого «пострілу» положення осі каналу ствола змінюється на 1-2 кванта. З запізненням починається реакція на силовий вплив. Перша гармоніка коливань в разі автоматичної стрільби відповідає темпу стрільби (600 пострілів в хвилину), при відкритті повітряного клапана в другому і третьому пострілах швидкість зміни координат досягає 0,5...0,6 кванта в мілісекунду. За одиночним і першим пострілами в чергах середня зміна кута вильоту за 10 мс становить 5 квантів по верху і 4 кванта по боку.

Виходячи з допустимої помилки визначення координат точки наведення +0,5 т.д. (1 квант) і швидкості зміни координат точки наведення 0,5 квант/мс помилка фіксації моменту відліку не повинна перевищувати 2 мс. Задовольнити цю вимогу можна або вибором кроку квантування за часом, що не перевищує 2 мс в разі асинхронного режиму вимірювань, або синхронізацією запуску датчика на вимірювання зі спрацьовуванням спускового гачка при забезпеченні часу на вимір в межах 2 мс.

Однак, таку швидкодію забезпечити неможливо з використанням блоку обробки зі звичайною відеокамерою, який накладає обмеження по кадровій частоті (для сучасних камер 16 мс). В такому випадку необхідні високошвидкісні відеокамери, використання яких, в даний час, економічно не вигідно для даної задачі.

Висновки по розділу 1

Основні результати досліджень, що викладені у розділі 1, опубліковані в роботах [1,3,4,11-14].

В даний час мультимедійні стрілецькі тренажери активно використовуються в області спорту, при підготовці та тренуванні спортсменів різного профілю: біатлоністів, п'ятиборців, стрільців, в розважальній індустрії. Вони призначені не тільки на здобуття первинних навичок стрільби, але й зберігають інформацію о траєкторії прицілювання, точці влучення та інтервалу між пострілами, що дозволяє проводити більш детальний аналіз можливостей стрільця на кожному етапі стрілецької підготовки. Великий інтерес до МСТ пояснюється тим, що при їх використанні в процесі тренувань різко зростає ефективність навчання, скорочуються терміни навчання, може бути досягнута значна економія матеріальних і грошових ресурсів, стає можливим процес навчання без кульової стрільби, що практично повністю знімає жорсткі вимоги з безпеки.

На підставі аналізу літературних джерел і проведених додаткових досліджень можна сформулювати наступні задачі, які необхідно вирішити у рамках дисертаційної роботи:

1. Здійснити синтез оптимальних алгоритмів виявлення і вимірювання координат кульових отворів і плям, утворених лазерним променем на поверхні проекційного полотна мішені мультимедійного стрілецької тренажера.

2. Розробити оптимальний алгоритм попередньої обробки і фільтрації отриманих зображень для реалізації завдань виявлення і вимірювання координат кульових отворів і лазерних плям.

3. Розробити алгоритм визначення траєкторії переміщення лазерного променя на проекційному полотні в процесі прицілювання.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ
ПРОСТОРОВИХ КООРДИНАТ КУЛЬОВИХ УТВОРЕНЬ І ВІДМІТОК
ЛАЗЕРНОГО ПРОМЕНЯ НА ПРОЕКЦІЙНОМУ ЕКРАНІ МСТ2.1 Удосконалення математичних моделей оптичних сигналів та шумів
на зображенні в МСТ

Розглянемо задачу виявлення корисного сигналу і вимірювання його параметрів в застосуванні до двовимірного сигналу (зображення) $a(x,y)$. Нехай спостережуваний сигнал є сумішшю корисного сигналу $s(x,y)$, адитивної завади $e(x,y)$ і шуму сенсора $n(x,y)$

$$a(x,y) = s(x,y) + e(x,y) + n(x,y). \quad (2.1)$$

Задачу обробки сформулюємо наступним чином: по реалізації $a(x,y)$, доступною спостереженню, необхідно прийняти рішення про наявність на зображенні $s(x,y)$ шуканого фрагмента, що має характерні ознаки, і оцінити просторові координати цього фрагмента в межах зображення. Подібні задачі характерні для різних систем обробки, розпізнавання та аналізу зображень - зокрема, для мультимедійних лазерних стрілецьких тренажерів і систем машинного зору.

В даному випадку шуканим корисним сигналом $s_0(x,y)$ є пляма, утворена лазерним випромінювачем на мішені або кульова пробоїна, адитивною завадою $e(x,y)$ – відеозображення, що проектується на мішень, і фонове засвічення мішені сторонніми джерелами світла. Компонент суміші $n(x,y)$ представлений шумом реєструючого пристрою – відеокамери.

Для синтезу алгоритму виявлення корисного сигналу $s_0(x,y)$ математичним шляхом необхідно проаналізувати його форму, розміри, які

спостерігаються на практиці, і вибрати математичну модель корисного сигналу.

У разі ж роботи стрілецького тренажера в бойовому режимі кульові отвори, які залишає на полотні мішені конкретний вид патронів, мають характерну форму. Однак, форма кульового отвору може незначно змінюватися від пострілу до пострілу в залежності від кута попадання в мішень і матеріалу полотна мішені. Крім того, ймовірність виявлення і точність визначення координат кульового отвору залежать від роздільної здатності системи та обраного алгоритму обробки сигналів. У разі попадання кулі в безпосередній близькості від одного з кульових отворів від попередніх стрільб розглянута задача ще більш ускладнюється.

У режимі імітації стрільби розмір лазерного променя буде залежати від відстані. В ідеальному випадку лазерний промінь залишає на мішені позначку у вигляді точки. Таку оцінку можна представити у вигляді двовимірної дельта-функції $s_0(x,y) = \delta(x,y)$. Цей випадок відповідає лазерному променю нескінченно малого поперечного перерізу, що поширюється в однорідному ізотропному середовищі і падаючому на поверхню мішені під прямим кутом. Очевидно, що в реальній системі подібні спрощення незастосовні. Реальний лазерний випромінювач має оптичну систему з функцією розсіювання точки (ФРТ) $h_1(x,y)$ [...]. Зображення плями на мішені може бути представлене наступним математичним виразом

$$s_{0m}(x,y) = \delta(x,y) \otimes h_1(x,y), \quad (2.2)$$

де \otimes – символ операції згортки.

У той же час, реєструюча відеокамера також має оптичну систему з деякою ФРТ $h_2(x,y)$. В результаті зображення плями, яке спостерігається камерою на полотні мішені, можна представити таким чином

$$s_0(x,y) = s_{0m}(x,y) \otimes h_2(x,y). \quad (2.3)$$

Тоді $s_0(x,y) = (\delta(x,y) \otimes h_1(x,y)) \otimes h_2(x,y)$.

Оскільки

$$\delta(x,y) \otimes h_1(x,y) = h_1(x,y), \quad (2.4)$$

то зображення шуканої плями на плоскій поверхні мішені можна записати у вигляді

$$s_0(x,y) = h_1(x,y) \otimes h_2(x,y). \quad (2.5)$$

Отже, вид плями від лазерного променя визначається тільки характеристиками оптичних систем лазера і реєструючої камери.

У разі роботи тренажера в бойовому режимі необхідно брати до уваги тільки характеристики реєструючої камери і розміри кульових отворів, які залежать від калібру зброї.

2.1.1 Модель лазерної плями під час роботи МСТ в імітаційному режимі

У режимі стрільби з лазерними імітаторами в МСТ корисним сигналом буде лазерна пляма на поверхні проекційного полотна мішені.

Напівпровідникові малогабаритні лазерні діоди мають широку діаграму спрямованості. Тому для формування вузького паралельного лазерного пучка перед діодом необхідно встановити лінзу-об'єктив на фокусній відстані від випромінювача. У разі неможливості безпосередньої установки лазерного діода на імітатор зброї можна використати волоконно-оптичний світловод. У

цьому випадку маємо лазерний випромінювач, побудований за схемою рис. 2.1.

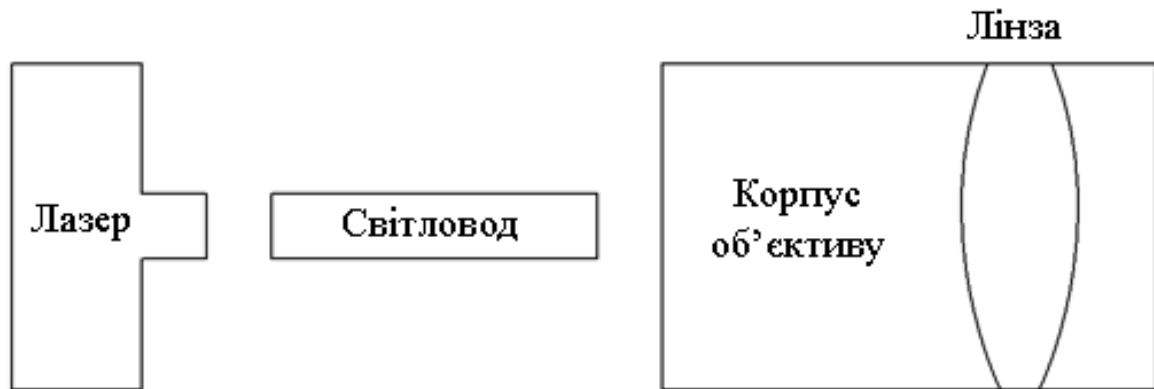


Рисунок 2.1 – Схема лазерного випромінювача з волоконно-оптичним світловодом

Щоб зібрати в пучок більше енергії лазерного діода необхідно використовувати лінзу відносно великого діаметра. В результаті діаметр світлового пучка на виході лазерного випромінювача повинен бути близько 10 мм. Оскільки сформувати повністю паралельний пучок не вдається (зокрема, через те, що випромінюючий майданчик діода не точковий), отримуємо пучок, що розходиться. Реально на дальності 5 м діаметр лазерного пучка становить близько 5 мм.

Аналіз літературних джерел [84-87] приводить до висновку, що джерелом додаткової похибки в лазерній стрілецькій системі є так званий спекл-ефект (рис. 2.2). Це явище викликає випадковий розподіл інтенсивності когерентного випромінювання, відбитого шорсткою поверхнею або яке пройшло через матове скло. Випадковий розподіл інтенсивності призводить до випадкового положення центру яскравості випромінювання лазерної плями, незважаючи на рівномірність випромінювання лазера в межах світлової плями. Теоретично похибку можна зменшити за рахунок зменшення діаметра лазерної плями. Однак на практиці

зробити це не вдається через неможливість зменшити діаметр світловода і фокусну відстань лінзи, а відповідно і діаметр лінзи, без істотних втрат випромінюваної енергії.

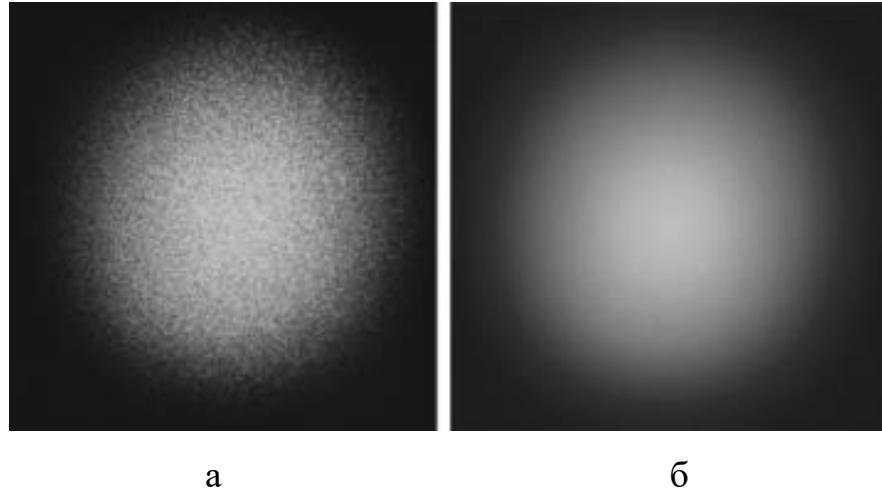


Рисунок 2.2 – Спекл-ефект лазерної плями (а) і його згладжене зображення (б)

Для визначення мінімального діаметра лазерної плями скористаємося співвідношеннями геометричної оптики [88]. При підборі відстані l між лінзою діаметром $2R$ і вихідним торцем світловода діаметром $2r$ кожна точка торця проектується у відповідну точку плями на екрані діаметром $2A$. При цьому $2A = 2rL/l$. Відстань l пов'язана з фокусною відстанню f відповідно до законів геометричної оптики співвідношенням $l = Lf/(L - f)$, так що в разі $L \gg f$, маємо наближену рівність $l = f$.

Розмір об'єктива обмежений конструктивними особливостями, так як діаметр об'єктива $2R$ не повинен перевищувати діаметра стволу імітатора зброї. При цьому, об'єктив повинен збирати всі промені з торця світловода діаметром $2r$ в межах апертурного кута α , тобто $(R - r)/l \geq \operatorname{tg} \alpha = c$. При співвідношенні розмірів $R \gg r$ маємо $R \geq lc$. Звідси відстань $l \leq R/c$ або $f \leq R/c$, і відповідно для відносного отвору об'єктива маємо $O = D/f \geq 2c$. В разі $\alpha = 30^\circ$ маємо $c = \operatorname{tg} \alpha = 0,57$ і $O \geq 1,14$, що можна реалізувати на

практиці, так як є об'єктиви з відносним отвором до 1,5...2. В разі $R = 10 \text{ мм}$, $c = 0,57$, $L = 400 \text{ мм}$ отримаємо $l = f = 17,5 \text{ мм}$ та $2A = 4,6 \text{ мм}$.

Виходячи з природи спекл-ефекта модель лазерної плями можна представити у вигляді сукупності випромінюючих майданчиків, що прилягають один до одного (наприклад, прямокутних), і мають випадкову яскравість і випадкове положення центру випромінювання в межах кожного випромінюючого майданчика [89]. Майданчик плями в цьому випадку розбивається на $2n+1$ вертикальних і $2n+1$ горизонтальних смуг. Кількість елементарних майданчиків дорівнює $(2n+1)^2$. У моделі плями положення геометричних центрів яскравості майданчиків прийняті незалежними. Геометричний центр яскравості елементарної площадки по осі X позначимо через x_{ij} . У разі постійної яскравості I елементарної площадки геометричний центр яскравості плями по осі X визначається виразом

$$\bar{x} = \frac{\sum_i \sum_j I x_{ij}}{\sum_i \sum_j I} = \frac{\sum_i \sum_j x_{ij}}{(2n+1)^2}, \quad (2.6)$$

де підсумовування поширюється на всі $-n \leq i, j \leq n$.

Для математичного очікування і дисперсії геометричного центру яскравості плями отримаємо

$$M[\bar{x}] = 0; \quad (2.7)$$

$$\sigma_x^2 = M \left[\frac{\sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x})^2}{(2n+1)^2} \right] = \frac{1}{(2n+1)^4} \sum_i \sum_j M [x_{ij}]^2 = \frac{\sigma^2}{(2n+1)^2}, \quad (2.8)$$

де σ^2 – дисперсія геометричного центру випромінювача.

В силу симетричності меж сум центровані центри яскравості замінені на нецентровані, а в силу незалежності дисперсія суми взята рівною сумі дисперсій. Отже, розкид положення геометричного центру яскравості зменшується зі збільшенням кількості майданчиків, тобто збільшенням розмірів лазерної плями.

На практиці в МСТ спекл-ефект має незначний вплив на похибку вимірювань. Для мінімізації його впливу в якості матеріалу відеомішені слід використовувати рівну, гладеньку і непрозору поверхню, що дозволить знехтувати впливом цього ефекту.

Розглянемо модель гаусового розподілу енергії в плямі, характерного для лазерних пучків [91]. З теорії гаусового пучка відомо, що його нормалізована інтенсивність виражається в такому вигляді:

$$I(a) = \frac{1}{w} \exp\left(-2\frac{a^2}{w^2}\right), \quad (2.9)$$

де $a^2 = x^2 + y^2$;

w – радіус пучка.

На відстані w від центру інтенсивність дорівнює $\exp(-2)$ від максимального значення, тобто в межах радіусу w міститься, як випливає з властивостей гаусової функції, 86,5% енергії пучка.

Як випливає з виразу (2.9) і рис. 2.3, ефективний розмір плями δ при бінарній реєстрації залежить як від радіуса пучка так і від деякого рівня порога виявлення I_b , причому, оскільки цей рівень може бути обраний в значній мірі довільно, то ефективний розмір плями також може бути зроблений як завгодно малим

$$\delta = 2kw, \quad (2.10)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від рівня I_b і, отже, також приймає значення в широкому діапазоні.

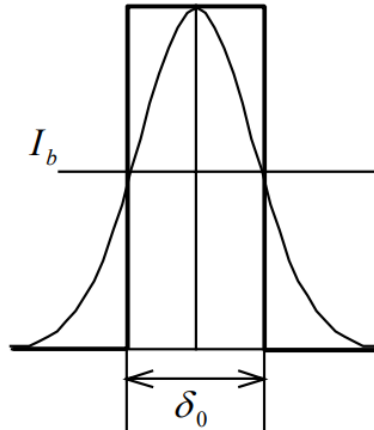


Рисунок 2.3 – Розмір лазерної плями на осі

Однак, якщо буде обрано рівень I_b близьким до значення максимальної інтенсивності, щоб отримати мінімальні значення коефіцієнта k , очевидно, що отриманий малий розмір плями буде вкрай нестійким по відношенню до коливань цього рівня або змін інтенсивності освітлення. Аналогічна ситуація буде спостерігатися в разі вибору значення параметра I_b досить малим. Отже, обраний рівень I_b повинен бути таким, щоб забезпечити максимальну стійкість розмірів плями.

Аналіз показує, що вибір рівня I_b повинен відповідати точці максимального нахилу графіка розподілу інтенсивності в зображенні для центральної (осьової) точки поля сканування, де це зображення є найкращим. При цьому $I_b = I_0 \exp(-1/2)$, де I_b – інтенсивність в максимумі плями для центру поля сканування; коефіцієнт k в цьому випадку дорівнює 0,5, тобто ефективний розмір бінарної плями буде при цьому в два рази менше, ніж розмір вихідного зображення.

Отже, при проектуванні алгоритмів системи обробки зображень в МСТ для режиму імітації стрільби необхідно дотримуватися гаусової моделі

розподілу інтенсивності світлової плями, а поріг виявлення вибирати на рівні половини максимальної інтенсивності.

2.1.2 Модель кульового отвору під час роботи МСТ в бойовому режимі

При роботі МСТ в бойовому режимі в алгоритмах систем обробки зображень слід використовувати іншу модель корисного сигналу. Так, якщо в режимі імітації гаусова пляма реєструвалася на проекційному полотні і значення яскравості її центру серед всіх пікселів зображення прямувала до максимального I_{max} , то центр кульового отвору може мати мінімальне значення яскравості I_{min} .

Це пов'язано з тим, що проектор, за допомогою якого відтворюються відеосюжети, володіє деякою мінімальною яскравістю для чорного кольору L_{min} (рис. 2.4), яка може виявитися значно яскравішою простору за проекційним полотном (найчастіше там знаходиться кулеприймач). У деяких існуючих системах обробки [46, 64] кульову пробоїну прагнуть наблизити до лазерної плями шляхом її підсвічування. Відеокамера реєструє світло, що проходить крізь утворені отвори і, як і в випадку з лазерною плямою, проводиться сканування зображення і пошук I_{max} . Однак, цей спосіб вимагає використання освітлювальної апаратури і світлофільтрів на відеореєструючому пристрої, що накладає додаткові фінансові витрати, ускладнює конструкцію і унеможливорює створення даних тирів в портативному виконанні.

Використання відеокамер з високою світлочутливістю дозволяє відмовитися від додаткової освітлювальної апаратури і фіксувати значення мінімальної яскравості I_{min} на зображенні. Отже, кульовий отвір можна описати як деяку матрицю $N \times M$ (рис. 2.5), розмір якої визначатиметься калібром патрона (рис. 2.6) [91], спроможністю відеокамери і відстанню між відеокамерою і проекційним полотном.

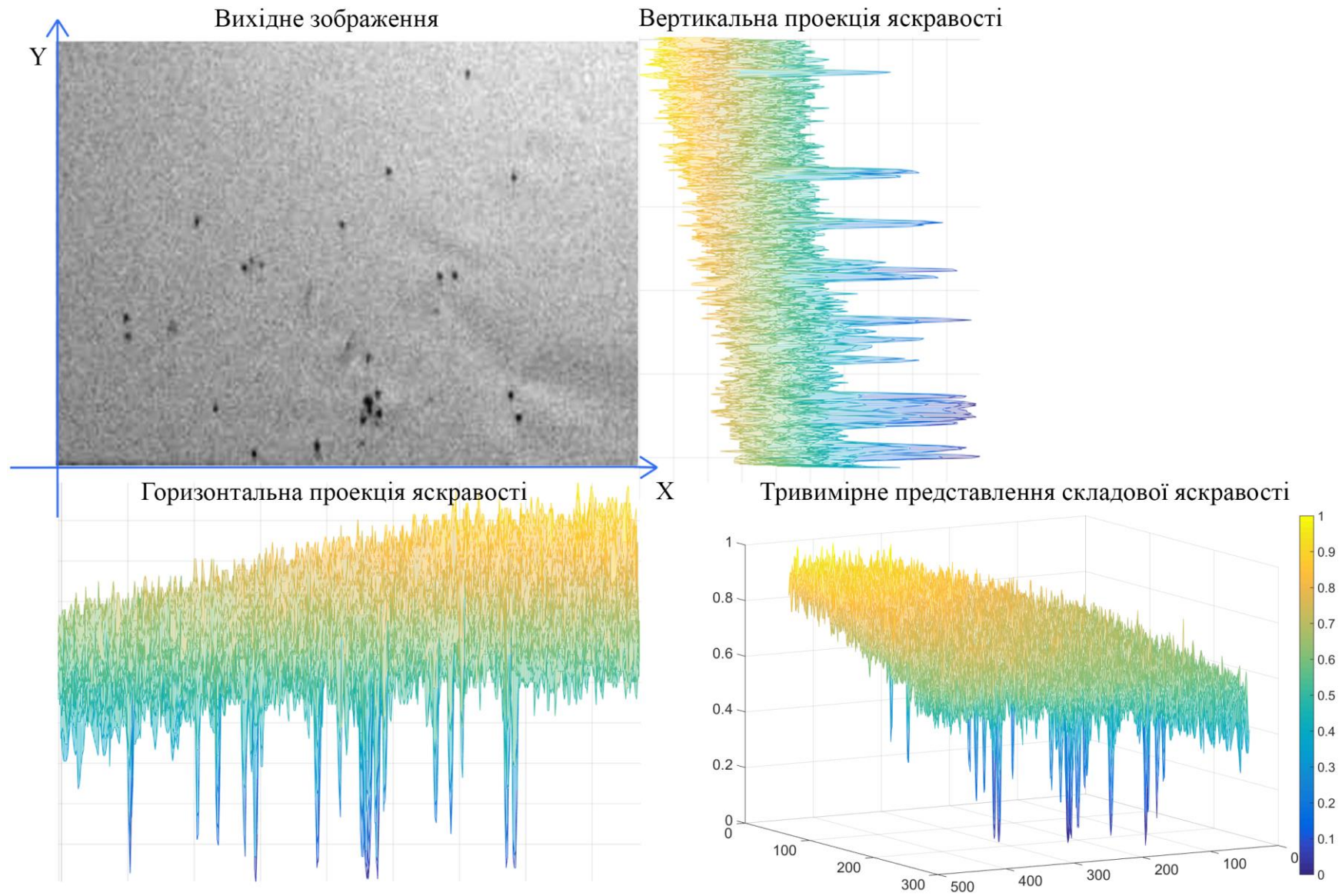


Рисунок 2.4 – Яскравість кульових отворів на фоні L_{min} проектора

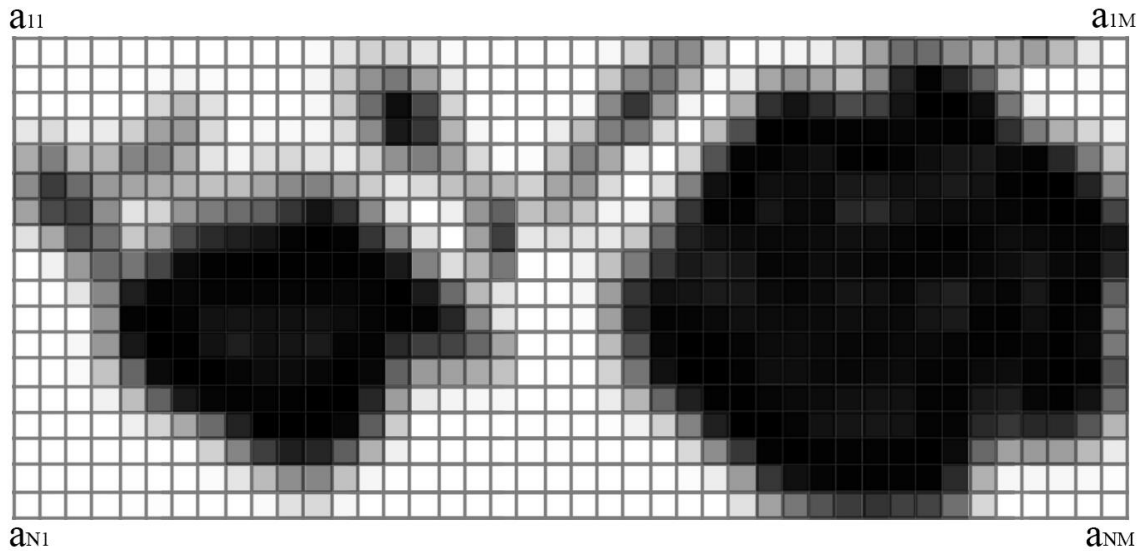


Рисунок 2.5 – Візуалізація матриці значень яскравості кульових отворів
двох різних калібрів

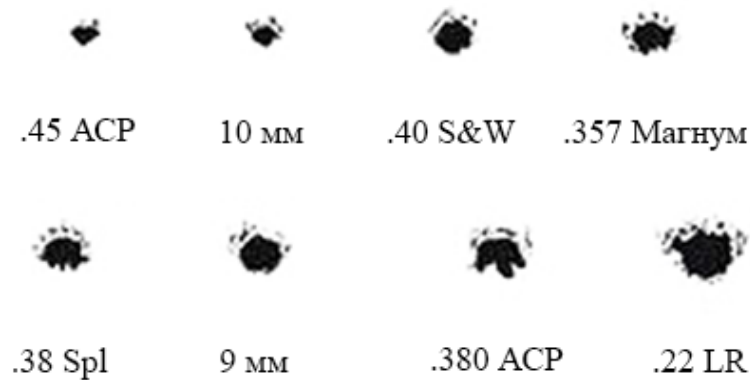


Рисунок 2.6 – Кульові отвори різних калібрів

Однак, наявність власних шумів реєструючої відеокамери погіршує характеристики правильного виявлення кульових відміток і унеможливорює використання простої кольорово-яскравісної фільтрації відеопотоку, що змушує застосовувати додаткові алгоритми розпізнавання образів в системі обробки. Проектор також дає деяке фонове засвічення і в разі комплексного відеосюжету з неоднорідним фоном кульові отвори можуть бути засвічені світловим потоком різної інтенсивності.

Чим більшою кількістю пікселів буде описано кульовий отвір, тим більшою буде ймовірність правильного виявлення. В ідеальному випадку, у відсутності власних шумів камери, корисний сигнал може бути деякою точкою на зображенні, яку можна описати у вигляді двовимірної дельта-функції $\delta(x,y)$. Однак, в реальних умовах необхідно куди більшу кількість точок для прийняття рішення про виявлення.

Для спрощення алгоритмів обробки зображень можна використовувати, як і в випадку з лазерним променем, гаусову модель кульового отвору, проводячи пошук або значення з мінімальною яскравістю, або здійснюючи інверсію зображення. Слід зазначити, що на відміну від лазерної плями, розмір якої буде змінюватися в залежності від дистанції стрільби, кульові отвори завжди будуть мати фіксований розмір, без урахування випадкових деформацій тканинної пробоїни, і залежати тільки від калібру.

2.1.3 Вплив складових шуму на якість оптичного сигналу (зображення)

Світло складається з дискретних пучків енергії, що називають фотонами – чим більша інтенсивність світла, тим більше число фотонів в секунду які освітлюють сцену. Середня густина потоку фотонів (кількість фотонів в секунду), що потрапляє на певну область фоточутливого датчику, буде мати флуктуації цього середнього значення на виході датчику. Дані флуктуаційні процеси описуються розподілом Пуассона [92,93]. При розгляді малоімовірних подій, що мають місце у великій серії незалежних випробувань деяке (кінцеве) число раз, ймовірності появи цих подій підкоряються закону Пуассона або закону рідкісних подій:

$$P(a) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^a}{a!}, \quad (2.11)$$

де $P(a)$ – ймовірність a успішних випробувань;

λ – середня кількість успіхів в однакових незалежних випробуваннях.

Фотони, зібрані фоточутливими елементами, стимулюють емісію електронів для кожного зареєстрованого фотону. Після експозиції, накопичені фото-електрони перетворюються в напругу, пропорційну до їх кількості. Ця напруга підсилюється на величину, пропорційну параметру світлочутливості ISO встановленої на камері і оцифровується аналого-цифровим перетворювачем. Цифровий сигнал, що описує кількість електронів для кожного пікселю представляє собою вихідні дані формату RAW цього зображення. Отримані числа також називають аналого-цифровими одиницями (analog-to-digital units, ADU) [94]. Ці цифрові дані являють собою вихідні значення пікселей.

Флуктуації підрахунку кількості фотонів можна побачити на зображенні у вигляді шуму – Пуассонівського шуму, який також називають фотонним дробовим шумом (рис. 2.7). Дробовий шум існує завдяки тому, що такі явища як світло або електричний струм складаються з руху дискретних (квантованих) часток.

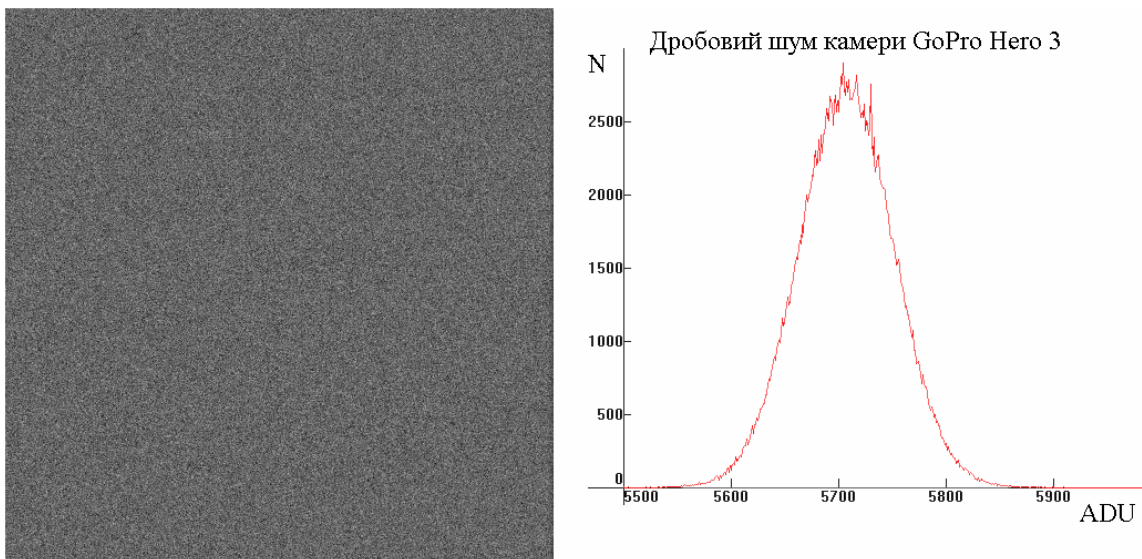


Рисунок 2.7 – Фотонний дробовий шум на зображенні неба знятого на камеру GoPro Hero 3 (канал зеленого кольору) та його розподіл (N – кількість пікселів, ADU – оцифрований рівень сигналу)

Як видно з рисунку, гістограма шуму має схожий на нормальний розподіл – звичайна дзвоноподібна крива. Стандартне відхилення цієї кривої описується її шириною. Флуктуації в кількості фотонів від пікселя до пікселя некоррельовані і більш нагадують по своїй суті білий шум, не мають якоїсь певної структури або закону розподілу.

Важливою характеристикою флуктуаційних процесів, що описуються статистикою Пуассона, є те, що їх стандартне відхилення дорівнює кореню квадратному самому середньому відхиленню. Тобто, якщо 10000 фотонів у середньому прийшло на чутливий елемент, то флуктуація від цього середнього значення буде приблизно 100 фотонів, а кількість зареєстрованих фотонів буде коливатися між 9900 до 10100. Якщо зареєстровано 100 фотонів, то флуктуація буде +/-10. Таким чином, по мірі зростання рівню сигналу, фотонний дробовий шум також буде зростати, але з меншою швидкістю – відношення сигнал/шум також буде зростати як квадратний корінь кількості зареєстрованих фотонів. Чим вище освітленість, тим меншим буде дробовий шум та навпаки, при поганому освітленні дробовий шум буде зростати [95].

В ідеальному випадку, цифровий сигнал, що описує вихідні дані зображення, повинен бути прямо пропорційний кількості фотонів. Коефіцієнт, за допомогою якого можна описати відношення між кількістю фотонів та відповідним значенням цифрового сигналу є коефіцієнт підсилення фоточутливого елементу. Але у цифровому випадку даний параметр відповідає не стільки підсиленню, скільки коефіцієнту конверсії між фото-електронами та вихідними цифровими даними. Оскільки збільшення значення параметру світлочутливості збільшує значення цифрових вихідних значень, коефіцієнт підсилення обернено пропорційний світлочутливості – подвоєння параметру світлочутливості зменшить підсилення у два рази, тому що та ж сама кількість фотонів, зареєстрованих та перетворених у цифрові дані буде у два рази більшою при подвоєному значенні світлочутливості.

За реальних умов, рівень вихідних цифрових даних не точно відображає кількість фотонів. Кожний електронний компонент камери – від фото чутливого елементу, до підсилювача або АЦП – має флуктуації напруги, що дає відхилення вихідних цифрових даних від ідеального значення пропорційно кількості фотонів. Флуктуації в вихідних даних, викликані електронними компонентами, являють собою власні шуми реєструючого пристрою та ще називаються шумами зчитування (рис. 2.8) [96].

Шум зчитування може бути вимірний під час зйомок так званого «чорного кадру»: експозиція із захисною кришкою на об'єктиві та мінімально можливою для камери витримкою. У такому разі не буде отримано жодного фотону реєструючим пристроєм та залишиться лише власний шум електроніки.

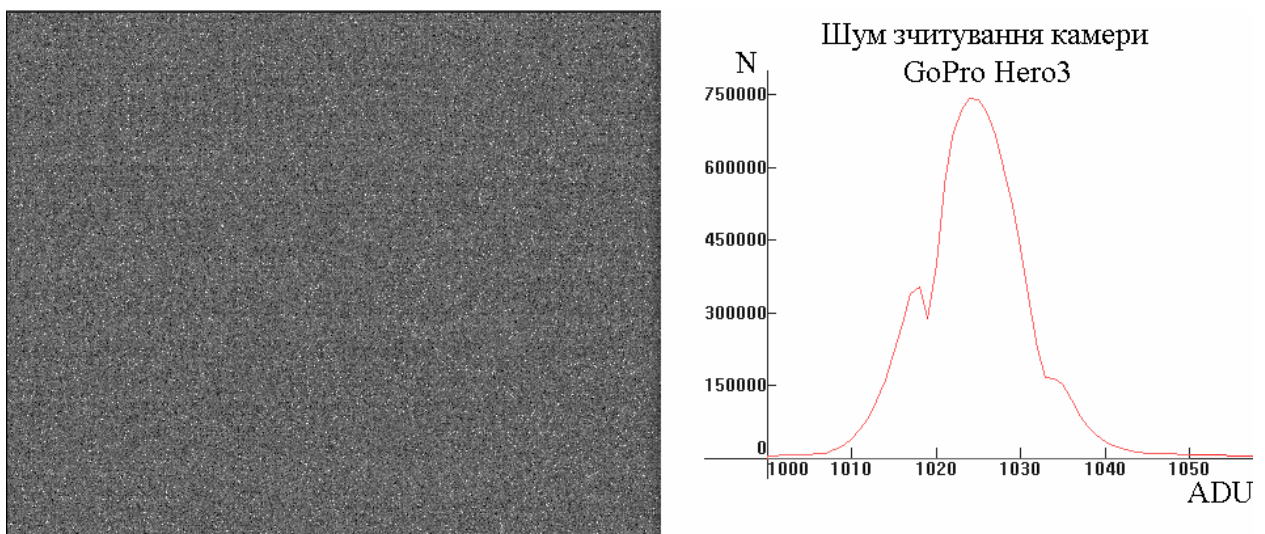


Рисунок 2.8 – Шум зчитування камери GoPro Hero 3 та його гістограма

Ще один вид завад при цифровій зйомці – структурний шум [98]. На відміну від шуму сенсору або дробового шуму, структурний шум неможливо однозначно описати як білий. При більш детальному аналізі даний шум має деякий період повторення по одній з координат (рис. 2.9). Оскільки людський

зір добре пристосований для того, щоб помічати деякі циклічні візуальні шаблони, то такий шум більш помітний на зображенні, ніж попереднє розглянуті, навіть якщо його інтенсивність буде відносно менша. Структурний шум виникає у більш старих моделях відеокамер, або в дешевих web-камерах.

Структурний шум може мати як деякі постійні складові, які не будуть змінюватися від кадру в кадр, так і змінні складові, які будуть змінюватися кожний кадр. На рис. 2.9 показаний усереднений з шістнадцяти кадрів шум зчитування web-камери Canyon CNE-HWC1 з автоматичною електронною витримкою. У даному випадку є як горизонтальні, так і вертикальні флуктуаційні смуги. На практиці даний шум можна зменшити шляхом видалення отриманого шляхом усереднення структурного шумового шаблону.

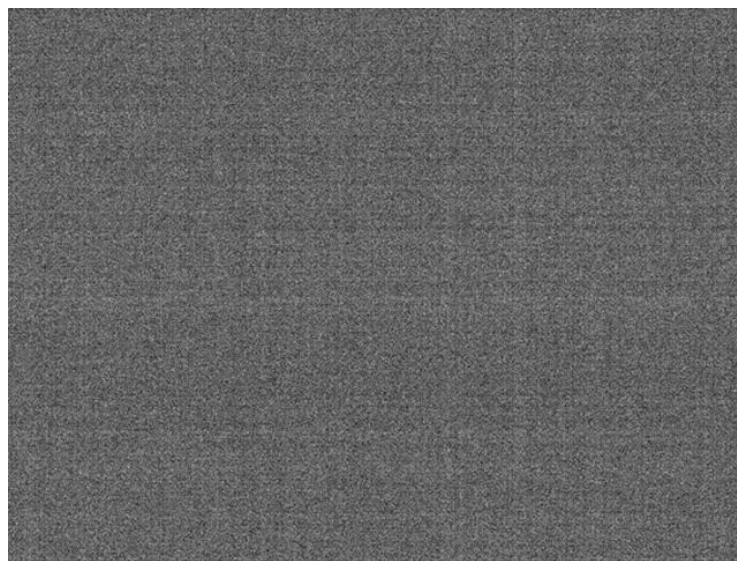


Рисунок 2.9 – Зразок шуму в web-камері Canyon CNE-HWC1 (640x480 пікселів)

Треба відзначити, що не всі пікселі реєструючого елемента мають однакові параметри захоплення та підрахунку фотонів. Навіть у тому випадку, коли немає фотонного дробового шуму, шуму зчитування і т.д., все одно може мати місце нерівномірність у кількості зареєстрованих фотонів

(Pixel response non-uniformity, PRNU). На рис. 2.10 зображений параметр нерівномірності як функція від вихідних даних. Дана залежність отримана шляхом вимірювання фотонного дробового шуму та шуму зчитування та їх віднімання від загальної шумової компоненти з декількох кадрів.

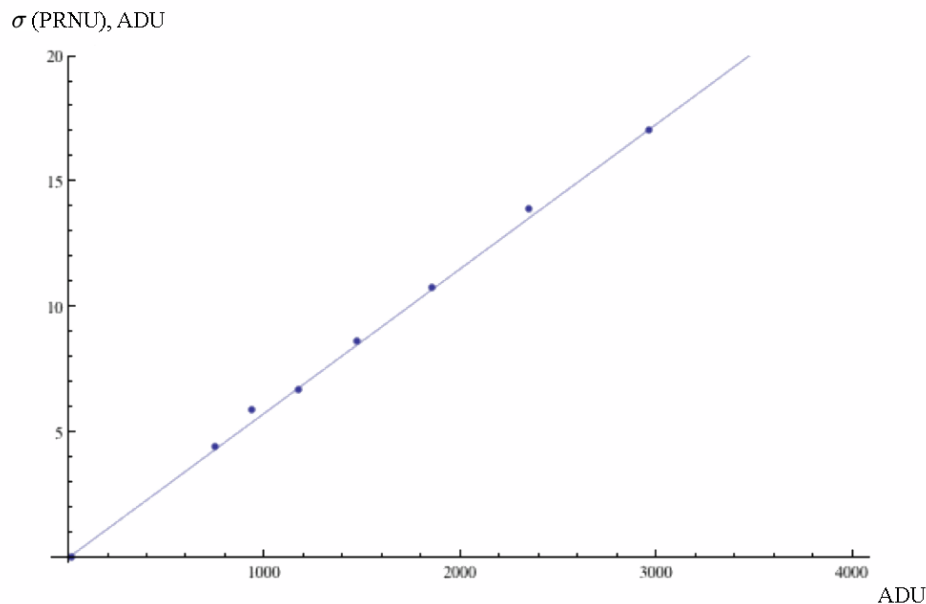


Рисунок 2.10 – Середньоквадратичне відхилення нерівномірності відгуку від зареєстрованого оцифрованого рівня

Вимірювання виконувалися за допомогою web-камери Canyon CNE-HWC1. У якості тестового зображення використовувався білий папір, розташований на відстані 5 см, що рівномірно освітлений двома джерелами освітлення. Це дозволило мінімізувати ефект тонального градієнту на зображенні, що виникає при нерівномірності освітлення чи кольору об'єкту. В ідеалі, середньоквадратичне відхилення зареєстрованих фотонів має лінійну залежність по відношенню до загальної кількості фотонів. Однак, як видно з графіку, коливання значень від пікселя до пікселя складають близько 0,6%.

PRNU «шум» зростає пропорційно рівню експозиції. З іншого боку, фотонний дробовий шум зростає пропорційно квадрату рівня експозиції, а шум зчитування зовсім від експозиції незалежний. Таким чином,

нерівномірність відгуку пікселів є одним з найбільш важливих параметрів при великих рівнях експозиції.

Коли аналоговий сигнал напруги чутливого елементу оцифровується в вихідні значення, він округляється до найближчого цілого значення. Округлення спотворює вихідні значення, дане відхилення називають помилкою або шумом квантування. На практиці дана помилка вносить незначний внесок до загальної шумової компоненти. На рис. 2.11 показані результат квантування та гістограма шуму.

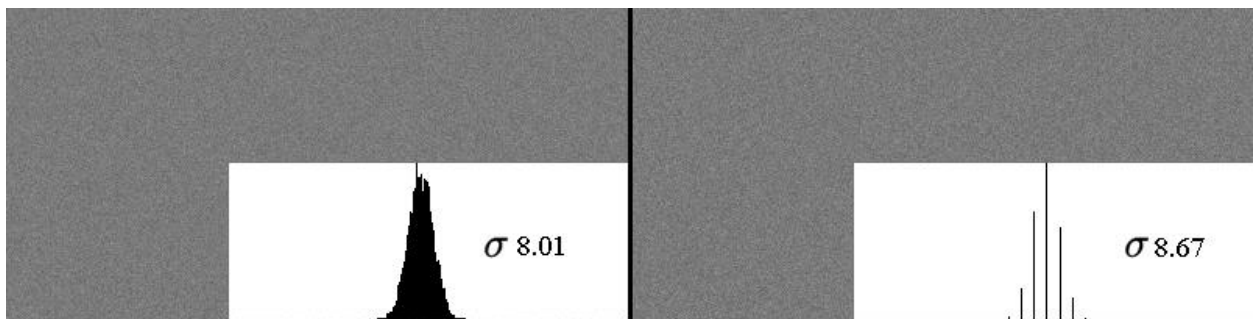


Рисунок 2.11 – Середньоквадратичне відхилення шумової компоненти для 256 та 8 рівнів квантування

Як видно з гістограми, при відносно малих рівнях квантування середньоквадратичне відхилення шуму збільшується менше ніж на 10%. Однак, сучасні камери мають досить великі значення рівнів квантування, що зводить дану помилку до мінімуму. В типовому зображенні помилка округлення буде варіюватися від пікселя до пікселя, приймаючи значення рівні половині кроку квантування. Усреднюючи помилку квантування по рівномірно розподіленою кількістю вхідних значень з чутливого елементу дасть середню помилку квантування близько 0,3 кроку квантування. Таким чином, похибка квантування є незначною в цифровій обробці зображень за тої умови, що рівень шуму перевищує крок квантування.

Отже, при проведенні експериментальних вимірювань було виявлено, що сумарні завади у відеосистемі МСТ можуть бути описані законом

розподілу Пуассона або апроксимовано функцією Гауса при використанні камер з високою роздільною здатністю, де дискретність вимірювань зменшується.

2.2 Аналіз впливу умов розташування відеокамери МСТ на формоване зображення

Найважливішою частиною МСТ є відеореєструюча система, інформація з якої передається на систему обробки. Основним елементом відеореєструючої системи є відеокамера.

Поряд з використовуваними моделями корисних сигналів значний вплив на якість рішення задач обробки зображень, відповідно до виразу (2.10), надають параметри самої відеосистеми. Однак, на якість одержуваного зображення впливають не тільки технічні характеристики відеокамери, а й освітлення приміщення мультимедійного тиру, геометричне розташування відеокамери відносно мішені і її кут нахилу. Серед характеристик відеокамери можна виділити її роздільну здатність, кут огляду по горизонталі і вертикалі, світлочутливість матриці і відношення сигнал/шум.

Розглянемо вплив цих факторів на одержуване зображення.

2.2.1 Особливості освітлення тиру, що впливають на побудову МСТ

Освітлення в приміщеннях, де розміщуються стрілецькі тири, може бути природним і штучним. Якщо допоміжні та технічні приміщення стрілецьких тирів не потребують будь-яких особливих умов освітленості, то стрілецька галерея, вогнева зона, мішені, бліндажі, приміщення для суддівської комісії з визначення результатів стрільби вимагають особливого рівня освітленості. Норми освітленості для цих приміщень наведені в табл. 2.1 [98].

Таблиця 2.1 – Освітлення тиру

Приміщення	Найменша освітленість, люкс	Нормована площа освітлення	Додаткові вказівки
Стрілецька галерея:			
а) вогневі позиції	75	Горизонтальна, на рівні поверхні підлоги	—
б) зони для суддів, представників, тренерів і глядачів	50		—
Вогнева зона	10	Горизонтальна, на рівні поверхні підлоги	Норматив наведено для ламп розжарювання
Мішені:			При дистанції стрільби понад 50 м допускається підвищення освітленості на один ступінь (за шкалою значень освітленості)
а) з чорним кругом	500	Вертикальна в площині мішені, зверненої до вогневого рубежу	
б) силуетні	500		
в) «Бігучий кабан»	300		
Бліндаж	100	Вертикальна в площині уздовж лінії руху мішені в межах «вікна»	—

З таблиці видно, що освітлення мішеней здійснюється найбільш повно і за своєю силою близько до природного освітлення в неясний сонячний день. Питанню освітлення мішеней слід приділяти особливу увагу при проектуванні і обладнанні всіх стрілецьких тирів. Практика показує, що і надмірне і тим більше недостатнє освітлення мішеней при стрільбі майже однаково негативно впливають на технічні результати стрільців. В тому і іншому випадку стрілок швидко втомлюється, стомлюється його зір. При занадто яскравому освітленні сітчаста оболонка ока швидко дратується, зорова здатність стрілка падає, при недостатньому освітленні мішеней надмірно напружується зір.

При природному світлі освітленість мішеней досягає 2000-5000 люкс. Щоб зменшити освітленість, застосовують різні кольорові світлофільтри, діафрагми і димчасті окуляри. У закритих тирах при штучному світлі величина освітленості мішеней зменшується до 500 люкс, але не менше.

Освітлення вогневого рубежу значно відрізняється від освітлення мішеней. Вогневі позиції повинні мати освітленість на рівні підлоги не менше 75 люкс, а зал, де розташовуються судді, представники, тренери та глядачі, - також на рівні підлоги не менше 50 люкс. Освітлення вогневого рубежу здійснюється, як правило, різними світильниками, розташованими на стелі. Важливо одне, щоб світло було розсіяним і рівним, щоб стовбури і прицільні пристосування зброї не давали відблисків.

З викладеного випливає, що при створенні відеосюжетів в МСТ і виборі проєктора необхідно дотримуватися зазначених рівнів освітлення. Однак, різні розважальні та ігрові відеосюжети можуть не повністю відповідати даним вимогам.

2.2.2 Вибір місця розташування відеокамери щодо проєкційного полотна (екрану)

Істотний вплив на характеристики МСТ робить розташування відеокамери щодо проєкційного полотна. В експериментальній установці

МСТ використовувався проекційний екран 3x2 м. Деякі тренажери можуть мати інші розміри, в залежності від пред'явлених технічних вимог, кількості стрільців, що одночасно займаються тощо. Відеокамера повинна захоплювати, як мінімум, всю область проекційного полотна. Як зазначено у підрозділі 2.1.2, чим ближче знаходиться відеокамера до проекційного полотна, тим більшою кількістю пікселів буде описана шукана ціль.

Експериментальна установка оснащена відеокамерою з кутом огляду по вертикалі і горизонталі рівним 54° . Це дозволяє розташувати її на відстані в 1,35 м від проекційного полотна з кутом нахилу в 60° (рис. 2.12).

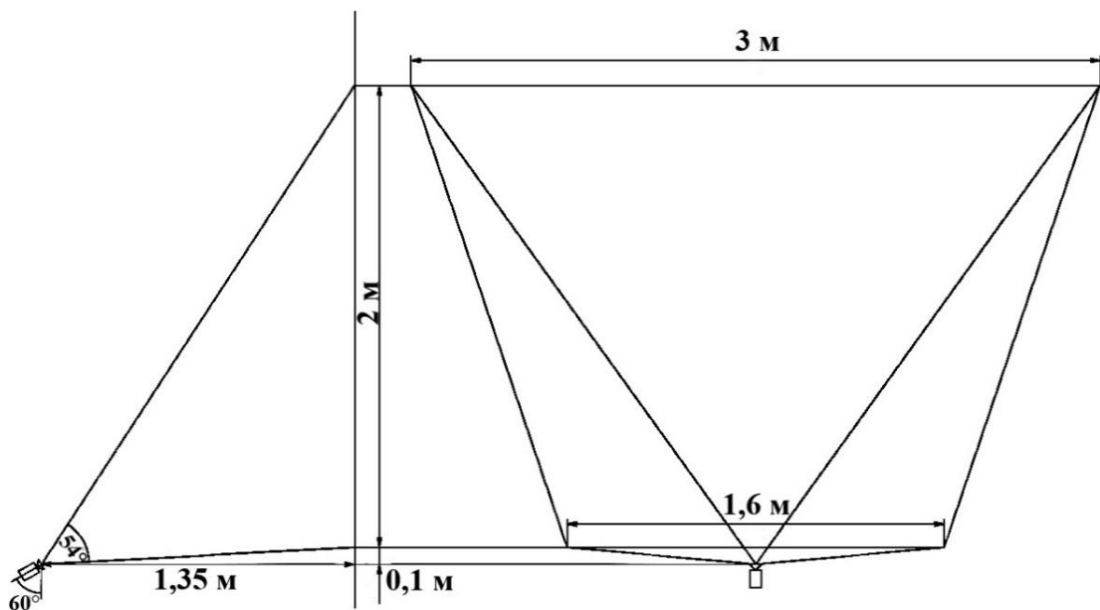


Рисунок 2.12 – Розташування відеокамери відносно проекційного полотна

Така досить невелика відстань змушує використовувати деякі поправочні коефіцієнти для перерахунку положення робочої площини мішені, так як камера знімає полотно під деяким кутом, що призводить до трапецеїдального викривлення внаслідок перспективи.

При роздільній здатності використовуваної камери 1280×720 діаметр об'єкта 10 мм на зображенні відповідає $\sim 4,3$ пікселям, а значить кульовий отвір від пістолета Макарова (калібр 9 мм) можна описати матрицею 5x5.

2.2.3 Вплив світлочутливості та відношення сигнал/шум відеокамери на якість зображення МСТ

На відміну від фотокамер, в яких світлочутливість виражається параметром ISO, світлочутливість відеокамер найчастіше виражається в люксах (Lux) і означає мінімальне освітлення, при якому камера здатна давати відеозображення хорошої якості – чітке і без шумів. Чим нижче значення цього параметра, тим вище чутливість.

На рис. 2.13 показано вплив параметра світлочутливості на якість одержуваного зображення. Кожне зображення попередньо піддалося нормалізації по яскравості. При проектуванні МСТ слід вибирати відеокамеру з найменшим значенням світлочутливості відеокамери для більш чіткого зображення відміток цілей.

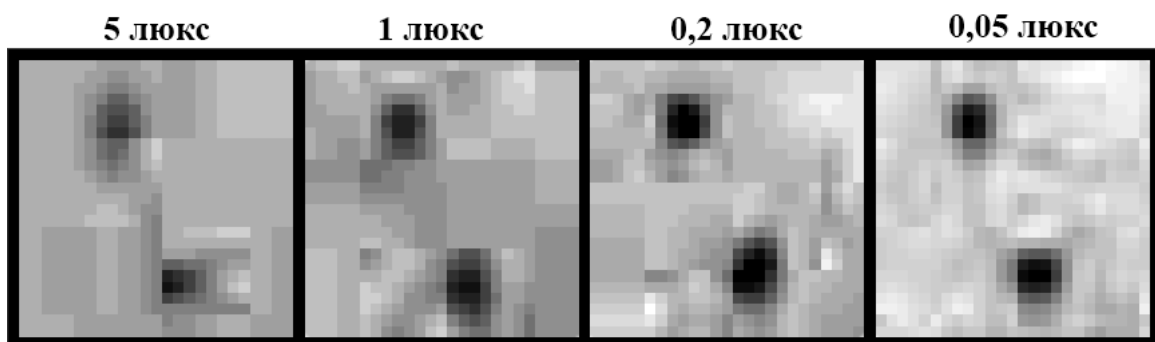


Рисунок 2.13 – Вплив світлочутливості на зображення в МСТ

Як було зазначено раніше, для цифрових відеокамер характерні три види шуму: фотонний дробовий шум, шум зчитування, структурний, нерівномірність реєстрації пікселів та шуми квантування.

Співвідношення сигнал/шум (S/N) визначає якість відеосигналу. Параметр вимірюється в децибелах. Шуми на відеозображенні частіше за все з'являються в результаті недостатнього освітлення приміщення. На рис. 2.14 видно, що вже при значенні 18 дБ рівень шуму перестає робити істотний вплив на проведення вимірювань, як було описано в [5,6]. В даний час сучасні відеокамери мають співвідношенням сигнал/шум вище 40 дБ.

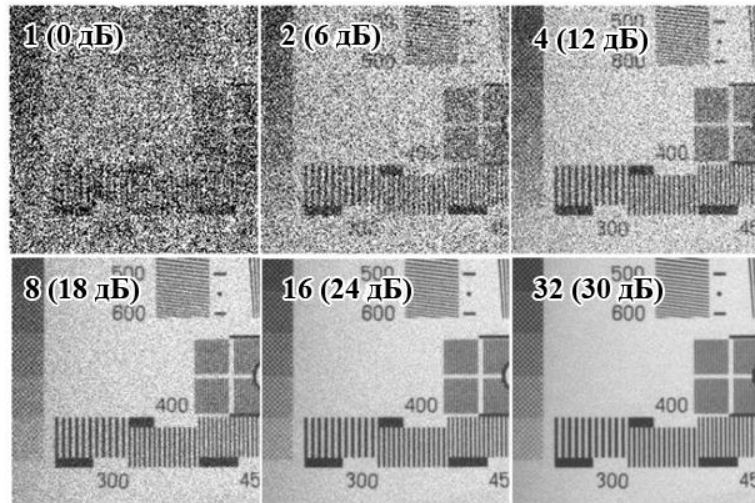


Рисунок 2.14 – Вплив відношення сигнал/шум на зображення в МСТ

2.3 Розробка методу виявлення відмітки від пострілу на проекційному екрані МСТ

Визначивши моделі корисних сигналів в системі і можливі завади, можна приступити до синтезу оптимального методу виявлення.

З метою удосконалення МСТ запропоновано комплексний метод обробки зображень, який включає наступні етапи: попередня фільтрація, метод виявлення корисного сигналу та метод оцінювання координат. Розробку комплексного методу запропоновано починати з методу виявлення та методу оцінювання координат, після чого можуть бути сформовані вимоги до фільтрації зображень для роботи цих алгоритмів.

У мультимедійному стрілецькому комплексі синтез алгоритмів обробки сигналів розглядається стосовно до двійково-квантованого зображення. Це дає можливість значно підвищити їх швидкодію системи обробки зображень. Завдання виявлення плями двійково-квантованих сигналів з точки зору теорії статистичних рішень формулюється в такий спосіб.

Розглянемо наступну вибірку значень огинаючої на $N \times N$ сусідніх позиціях розгортки фотоприймача камери

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{pmatrix}$$

Кожне з вибірових значень a_{mn} піддається потім двійковому квантуванню по амплітуді шляхом порівняння з пороговим рівнем a_1 (рис. 2.15).

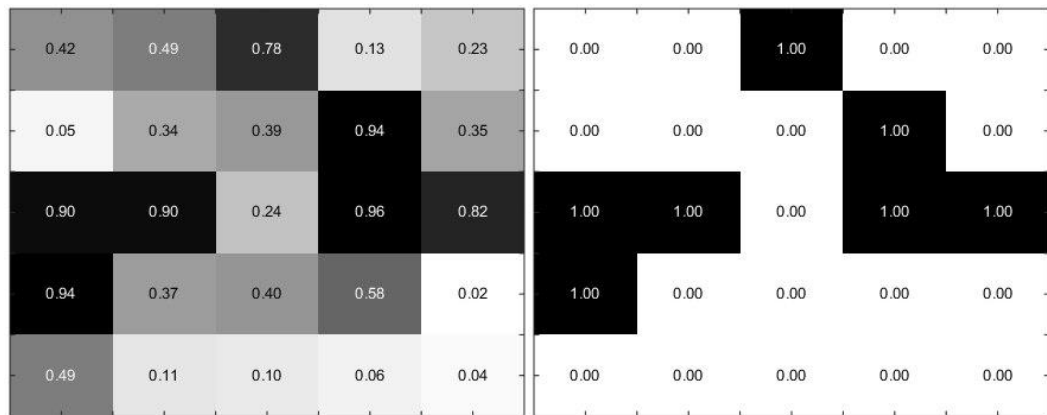


Рисунок 2.15 – Порогова обробка зображення з пороговим значенням 0.75

Прийнято, що результат одиничного порівняння a_{mn} буде позитивним, якщо відповідне вибірове значення перевищує поріг ($a_{mn} = 1$), і нульовим, якщо поріг не перевищено ($a_{mn} = 0$).

Таким чином, сукупність результатів квантування буде являти собою послідовність нулів і одиниць. У зв'язку з цим, методу виявлення необхідно буде на основі аналізу прийнятої вибірки нулів і одиниць вирішити оптимальним чином питання - чи представляє ця вибірка пляму корисного сигналу або вона відноситься до завади.

Для методу виявлення вирішення цього питання зводиться до перевірки гіпотези H_0 про відсутність корисного сигналу проти альтернативної гіпотези H_1 про його наявність, тобто до утворення

відношення правдоподібності і порівняння цього відношення з деяким заданим числом, вибраним виходячи з апіорної ймовірності наявності сигналу і втрат, приписуваних помилковим рішенням (критерій середнього ризику), або виходячи з допустимої ймовірності помилкового виявлення (критерій Неймана-Пірсона) [99,100].

Для вирішення завдання синтезу алгоритму виявлення необхідно сформулювати функцію правдоподібності гіпотез H_0 і H_1 . Нехай p_{mn} – ймовірність отримання одиниці на позиції (m,n) зображення, а q_{mn} – ймовірність отримання нуля на цій позиції. Ймовірність отримання будь-якого з двох можливих наслідків в результаті випробування на позиції з номером (m,n) запишеться в наступному вигляді

$$P(a_{mn}) = p_{mn}^{a_{mn}} q_{mn}^{1-a_{mn}}. \quad (2.12)$$

Надалі будемо вважати вибірки огинаючої статистично незалежними. Спільна ж ймовірність отримання деякої комбінації нулів і одиниць на всіх N^2 позиціях пачки буде дорівнювати

$$P(a_{11} \dots a_{NN}) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N p_{mn}^{a_{mn}} q_{mn}^{1-a_{mn}}. \quad (2.13)$$

Виходячи з формули (2.13), можна записати вираз для умовної ймовірності будь-якої комбінації нулів і одиниць при наявності і відсутності корисного сигналу.

Вираз для умовної ймовірності при наявності корисного сигналу буде мати наступний вигляд

$$P(a_{11} \dots a_{NN} | H_1) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N p_{S_{mn}}^{a_{mn}} q_{S_{mn}}^{1-a_{mn}}, \quad (2.14)$$

де $p_{S_{mn}}$ – ймовірність отримання одиниці на позиції (m,n) сигнальної плями, а $q_{S_{mn}} = 1 - p_{S_{mn}}$.

А ось при відсутності сигналу вираз набуде такого вигляду

$$P(a_{11} \dots a_{NN} | H_0) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N p_{N_{mn}}^{a_{mn}} q_{N_{mn}}^{1-a_{mn}}, \quad (2.15)$$

де $p_{N_{mn}}$ – ймовірність отримання одиниці на позиції (m,n) в області завади, однакова для всіх (m,n) , а $q_{N_{mn}} = 1 - p_{N_{mn}}$.

Позначимо поріг виявлення l_0 . В такому випадку, з урахуванням виразів (2.14) і (2.15), умова оптимального виявлення плями запишеться у вигляді

$$\prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N \left(\frac{p_{S_{mn}}}{p_N} \right)^{a_{mn}} \left(\frac{q_{S_{mn}}}{q_N} \right)^{1-a_{mn}} \geq l_0. \quad (2.16)$$

Після логарифмування лівої і правої частин нерівності (2.16), маємо

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \left[a_{mn} \ln \frac{p_{S_{mn}}}{p_N} + (1 - a_{mn}) \ln \frac{q_{S_{mn}}}{q_N} \right] \geq \ln l_0.$$

Виконавши необхідні перетворення в останньому виразі, отримаємо

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \ln \frac{p_{S_{mn}} q_N}{p_N q_{S_{mn}}} \geq \ln l_0 - \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \ln \frac{q_{S_{mn}}}{q_N}. \quad (2.17)$$

Прийнявши в виразі (2.17) такі позначення

$$\eta = \ln \frac{p_{S_{mn}} q_N}{p_N q_{S_{mn}}}; \quad k = \ln l_0 - \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \ln \frac{q_{S_{mn}}}{q_N},$$

отримаємо алгоритм оптимального виявлення корисного сигналу у вигляді двійково квантованих сигналів в такому вигляді

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \eta \geq k. \quad (2.18)$$

Алгоритм оптимального виявлення корисного сигналу, відповідно до формули (2.18), представлений на рис. 2.16.

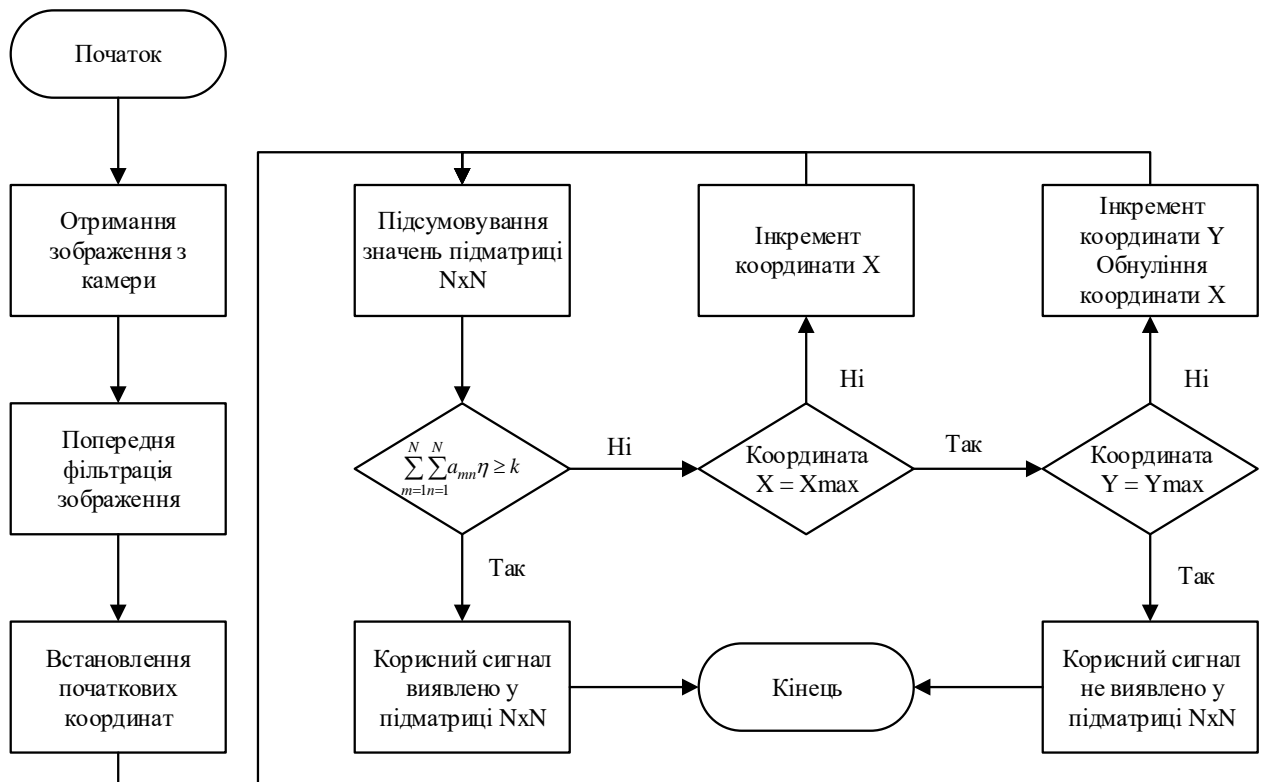


Рисунок 2.16 – Алгоритм оптимального виявлення корисного сигналу

Алгоритм оптимального виявлення пачки квантованих сигналів зводиться до виконання наступних операцій.

1. Прийом і запам'ятовування квантованих сигналів (нулів і одиниць) в межах розмірів оброблюваного зображення (на $x \times y$ позиціях).
2. Підсумовування значень попередньо розрахованої вагової функції на позиціях підматриці розмірністю $N \times N$, на яких отримані одиниці.
3. Порівняння отриманої суми з пороговим числом і видача рішення про виявлення або невиявлення плями.
4. В разі невиявлення розглядається наступна підматриця $N \times N$, зміщена по горизонтальній осі вправо на один піксель.

Аналогічно здійснюється зміщення по вертикальній осі зверху вниз. Операції 2 і 3 повторюються до тих пір, поки не буде прийнято рішення про виявлення плями на екрані чи не будуть проаналізовані всі позиції на приймальній матриці.

2.4 Визначення координат центру точки влучення

Нехай центр плями, утвореної лазерним променем на екрані полотна відеомішені, або кульової пробойни – точка O з горизонтальною координатою x_0 і вертикальною – y_0 . Функцію правдоподібності оцінюваних параметрів x_0 і y_0 отримаємо безпосередньо з виразу (2.14) для умовної ймовірності комбінації нулів і одиниць при наявності сигналу

$$L(x_0, y_0) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N p_{S_{mn}}^{a_{mn}} \cdot q_{S_{mn}}^{1-a_{mn}}$$

Вхідна в цей вираз ймовірність виявлення сигналу на одиничній позиції (m, n) $p_{S_{mn}}$ для випадку нефлуктуючого корисного сигналу за формулою [101]

$$p_{S_{mn}} = 1 - \int_0^{a_1} a_{mn} \exp\left(-\frac{a_{mn}^2 + b_{mn}^2}{2}\right) I_0(a_{mn} b_{mn}) da_{mn}.$$

Як бачимо, ймовірність $p_{S_{mn}}$ є функцією параметра b_{mn} , який по фізичному змісту являє собою відношення сигнал/шум в пікселі mn (параметр a_1 вважається фіксованим). Однак, всі значення b_{mn} визначаються однозначно, якщо відома залежність

$$b_{mn} = b_0 g((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)), \quad (2.19)$$

де $g((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0))$ – функція огинаючої плями;

(x_{mn}, y_{mn}) – поточні координати пікселів (m, n) ;

b_0 – відношення сигналу до завади в центрі плями.

Отже, ймовірність $p_{S_{mn}} = f(b_0, (x_0, y_0))$ є функцією, яка залежить від трьох невідомих параметрів b_0, x_0, y_0 . Параметр b_0 в подальшому будемо вважати фіксованим.

З урахуванням виразу (2.19) і зроблених припущень, функція правдоподібності для оцінки (x_0, y_0) записується у вигляді

$$L(x_0, y_0) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N p_{S_{mn}}^{a_{mn}}((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)) \cdot q_{S_{mn}}^{1-a_{mn}}((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)).$$

Якщо використовувати позначення

$$p_{S_{mn}}((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)) = P, \quad q_{S_{mn}}((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)) = Q,$$

то функція правдоподібності прийме наступний вигляд

$$L(x_0, y_0) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N P^{a_{mn}} \cdot Q^{1-a_{mn}}$$

Після логарифмування лівої і правої частини вищенаведеного виразу, отримаємо логарифм функції правдоподібності

$$\ln L(x_0, y_0) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} (\ln P - \ln Q) + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \ln Q. \quad (2.20)$$

Диференціювавши (2.20) по оцінюваним параметрам x_0 і y_0 отримаємо рівняння правдоподібності в такому вигляді

$$\frac{\partial \ln L}{\partial x_0} = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \left(\frac{1}{P} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_0} - \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x_0} \right) + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x_0}, \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial y_0} = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{kl} \left(\frac{1}{P} \cdot \frac{\partial P}{\partial y_0} - \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial y_0} \right) + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial y_0}. \quad (2.22)$$

У правій частині виразів (2.21) і (2.22) другі суми не залежать від вибірки сигналів, що приймаються, а визначаються тільки формою огинаючої плями. Якщо форма огинаючої є симетричною, то значення розглянутих других сум можна вважати рівними нулю.

Виконавши диференціювання $Q = 1 - P$ по x_0 і y_0 , отримаємо наступні співвідношення

$$\frac{\partial Q}{\partial x_0} = -\frac{\partial P}{\partial x_0}, \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial y_0} = -\frac{\partial P}{\partial y_0}. \quad (2.24)$$

З огляду на співвідношення (2.23), (2.24) і те, що друга сума в (2.21) і (2.22) дорівнює нулю, отримаємо рівняння правдоподібності для оцінки координат x_0 і y_0 у вигляді

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_0} \Big|_{x_0=\tilde{x}_0} = 0, \quad (2.25)$$

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial P}{\partial y_0} \Big|_{y_0=\tilde{y}_0} = 0. \quad (2.26)$$

Позначимо

$$\Phi_x(x_0, y_0) = \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_0}, \quad (2.27)$$

$$\Phi_y(x_0, y_0) = \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial P}{\partial y_0}. \quad (2.28)$$

Дискретні функції (2.27) і (2.28) будемо розглядати як функції ваги позицій плями при оцінці координат точки попадання в ціль. У цих функціях огинаючі характеризують кількість інформації про точку попадання, що міститься в "одинацях", розташованих на різних відстанях від центру плями.

З урахуванням зробленої заміни в (2.27) і (2.28) рівняння правдоподібності (2.25) і (2.26) приймуть вигляд

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \Phi_x(x_0, y_0) = 0, \quad (2.29)$$

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \Phi_y(x_0, y_0) = 0. \quad (2.30)$$

Як випливає з цих рівнянь, оцінка максимальної правдоподібності координат центру плями виходить з умови рівності нулю суми значень функцій $\Phi_x(x_0, y_0)$ і $\Phi_y(x_0, y_0)$ на позиціях, де сигнальні імпульси перевищують граничний рівень амплітудного квантування (в цих точках $a_{mn} = 1$). Принципово алгоритм (2.29), (2.30) буде реалізований шляхом зсуву вагових функцій відносно прийнятої реалізації сигналу (зображення). Процес зсуву і підсумовування значень вагових функцій на позиціях, де $a_{mn} = 1$, повторюватимуться доти, поки суми (2.29) і (2.30) не стануть рівними нулю (або менше за абсолютною величиною деякого фіксованого числа).

Ілюстрація алгоритму по оцінці положення центру плями для одновимірного випадку показана на рис. 2.17. Форми огинаючих корисного сигналу і вагових функцій, використовуваних у розглянутій задачі визначення координат центру плями, наведені на рис. 2.18.

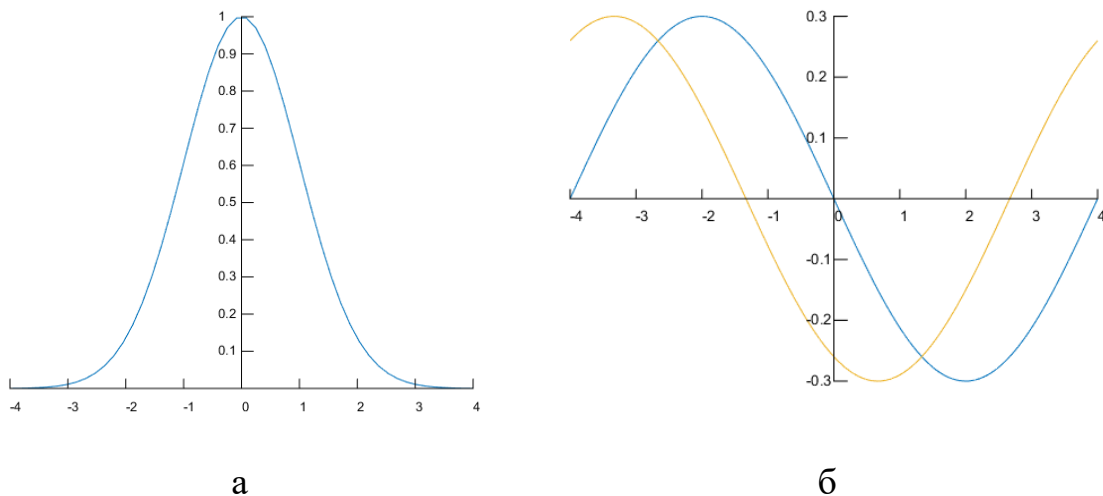


Рисунок 2.17 – Пояснення процесу оцінки координат центру плями сигналу:
а – огинаюча плями, б – зсув вагової функції відносно аналізованої реалізації

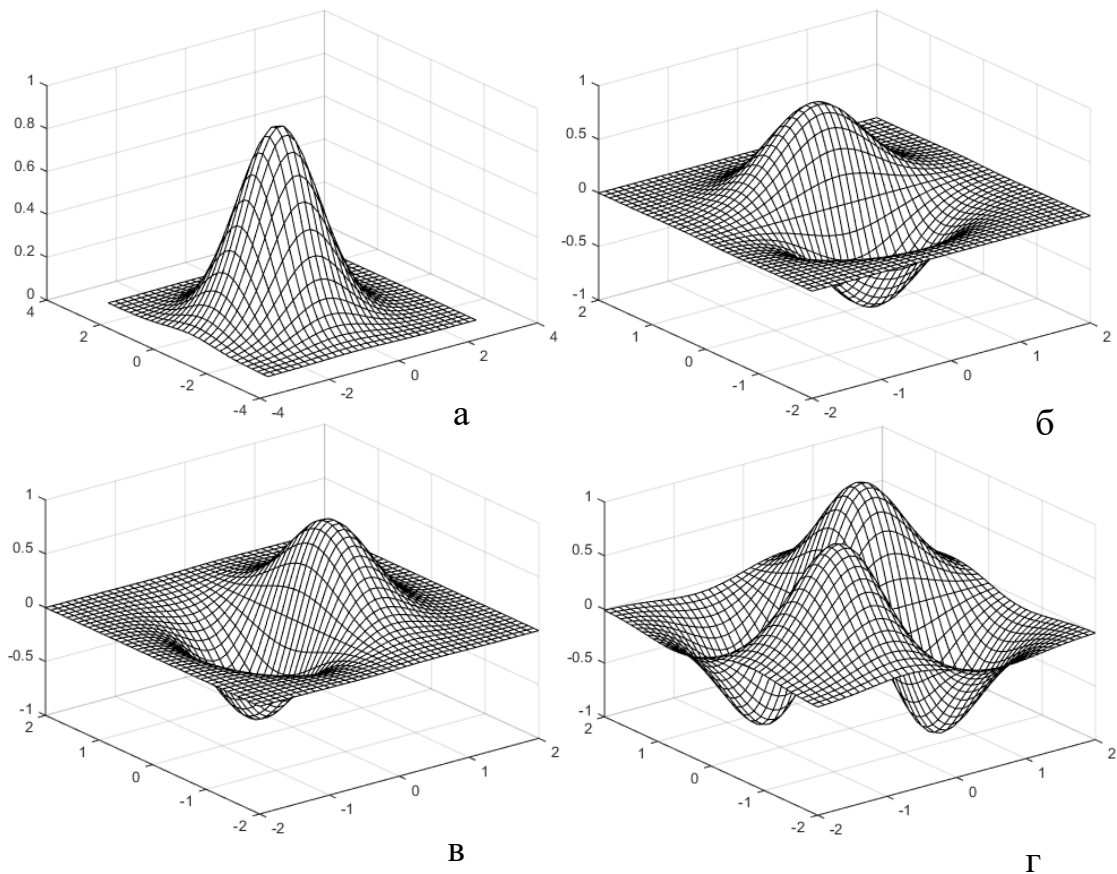


Рисунок 2.18 – Форми огинаючих сигналу і вагових функцій: а – форма огинаючої плями, б – вагова функція для визначення горизонтальної координати центру плями, в – вагова функція для визначення вертикальної координати центру плями, г – вагова функція для визначення двох координат центру плями

Разом з тим, для визначення координат центру плями може бути використана і дещо інша модифікація розглянутого алгоритму.

Для отримання модифікованого алгоритму візьмемо подвійну змішану похідну логарифма функції правдоподібності, що визначається виразом (2.20), по оцінюваним параметрам

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial x_0 y_0}.$$

Тоді, з урахуванням (2.23) і (2.24) отримаємо наступне рівняння правдоподібності для оцінки двох координат центру плями

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial x_0 \partial y_0} \Bigg|_{\substack{x_0 = \tilde{x}_0 \\ y_0 = \tilde{y}_0}} = 0. \quad (2.31)$$

Введемо позначення

$$\Phi_{xy}(x_0, y_0) = \frac{1}{P \cdot Q} \frac{\partial^2 P}{\partial x_0 \partial y_0}. \quad (2.32)$$

З урахуванням (2.32) рівняння правдоподібності отримає наступний вигляд

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \Phi_{xy}(x_0, y_0) = 0. \quad (2.33)$$

На рис. 2.18, г показаний вид вагової функції $\Phi_{xy}(x_0, y_0)$, використовуваної у виразі (2.33). Реалізується алгоритм (2.29), (2.30) оцінки координат центру плями також шляхом послідовного зсуву використовуваних вагових функцій щодо прийнятої реалізації сигналу (зображення) і виконання на кожному кроці ітерацій математичних операцій, передбачених алгоритмом [9].

Висновки по розділу 2

Основні результати досліджень, що викладені у розділі 2, опубліковані в роботах [5-7, 9, 15, 18].

1. Виконано аналіз форм і характеристик корисних сигналів для двох режимів роботи мультимедійного стрілецького тренажера: з лазерними імітаторами і використанням бойової зброї. У якості математичної моделі лазерного променя і кульового отвору прийнято двовимірний розподіл Гауса.

2. Шляхом проведення експериментальних вимірювань були визначені основні види завад, що впливають на отримуване зображення з відеокамери МСТ: фотонний дробовий шум, шум зчитування, структурний, нерівномірність реєстрації пікселів та шуми квантування. Описано основні фактори, що заважають отриманню якісного зображення в системі і сформовані основні вимоги для збільшення точності вимірювань і характеристик правильного виявлення корисних сигналів. У якості математичної моделі завад, згідно з експериментальними даними, було прийнято закон розподілу Пуассона, який може бути апроксимовано функцією Гауса при використанні відеокамер високої роздільної здатності.

3. Синтезовано оптимальний алгоритм виявлення пачки квантованих сигналів з використанням імовірнісних гіпотез і функцій правдоподібності. Для методу виявлення вирішення цього питання зводиться до перевірки гіпотези H_0 про відсутність корисного сигналу проти альтернативної гіпотези H_1 про його наявність, тобто до утворення відношення правдоподібності і порівняння цього відношення з деяким значенням порогу l_0 , вибраним виходячи з апіорної ймовірності наявності сигналу і втрат, приписуваних помилковим рішенням, або виходячи з допустимої ймовірності помилкового виявлення.

4. Синтезований алгоритм визначення координат центру гаусової плями шляхом оцінки максимальної правдоподібності координат центру плями з умови рівності нулю суми значень вагових функцій $\Phi_x(x_0, y_0)$ і $\Phi_y(x_0, y_0)$ на позиціях, де сигнальні імпульси перевищують граничний рівень амплітудного квантування. Оцінка максимальної правдоподібності координат центру плями виходить з умови рівності нулю суми значень

функцій $\Phi_x(x_0, y_0)$ і $\Phi_y(x_0, y_0)$ на позиціях, де сигнальні імпульси перевищують граничний рівень амплітудного квантування (в цих точках $a_{mn}=1$). Даний алгоритм реалізований шляхом зсуву вагових функцій відносно прийнятої реалізації сигналу (зображення). Процес зсуву і підсумовування значень вагових функцій на позиціях, де $a_{mn}=1$, повторюватимуться доти, поки суми вагових функцій не стануть рівними нулю або менше за абсолютною величиною деякого порога виявлення.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПОПЕРЕДНЬОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ В МСТ

3.1 Визначення границь контуру відмітки в умовах відомих характеристик сигналу та фону

Основне завдання використовуваних в стрілецькому комплексі алгоритмів обробки сигналів полягає в виявленні і вимірюванні координат центру кульової пробоїни або плями, утвореної променем лазера на екрані.

При цьому алгоритми обробки сигналів, що використовуються в комплексі, повинні забезпечувати високу швидкодію для досягнення мінімально можливого проміжку часу між пострілами, а також високу точність визначення координат пробоїни.

Синтезовані у другому розділі алгоритми виявлення координат працюють лише при умовах, близьких до ідеальних та оброблюють бінарні зображення. Для того щоб забезпечити реалізацію потенційних можливостей синтезованих алгоритмів, необхідно відфільтрувати зайву інформацію з зображення, що поступає з відеокамери МСТ з метою підвищення швидкодії алгоритму та підвищення характеристики правильного виявлення. Згідно з результатами проведеного аналізу [5,8] у якості алгоритму попередньої обробки зображень в МСТ запропоновано використовувати метод контурного аналізу.

Переваги методу контурного аналізу полягають у можливості вирішення завдань обробки зображень і розпізнавання зорових образів з єдиних теоретичних позицій. При цьому зміна параметрів стану, повороту і масштабу зображення незначно впливає на обсяг виконання обчислень.

Разом з тим, цей метод можна застосовувати лише в тому випадку, коли є самі контури, принаймі, локалізована область сцени, в якій зосереджені граничні точки (краї, межі) конкретного зображення. Завдання виділення контурів багатоградаційного зображення на статистично

складному багатоградаційному фоні еквівалентна задачі виявлення двовимірного корисного сигналу на фоні шумів і інших сигналів, що грають роль завад.

Розглянемо один з наявних підходів до виділення контурів зображень в реальній системі, що базується на гіпотезі експоненціальнокосінусної автокореляційної функції (АКФ) фонових шумів і слабкій інформативності низькочастотної частини спектра зображення.

Флуктуації амплітуд і фаз сигналів на вході датчиків зображень призводять, в кінцевому рахунку, до флуктуацій інтенсивностей сигналів, які формують в пам'яті цифрове зображення $s(x, y)$. В результаті одержувані силуетні зображення стають багатозв'язними через порожнини і розриви, що утворюються, внаслідок чого значно спотворюється лінія краю (контур) (рис. 3.1).

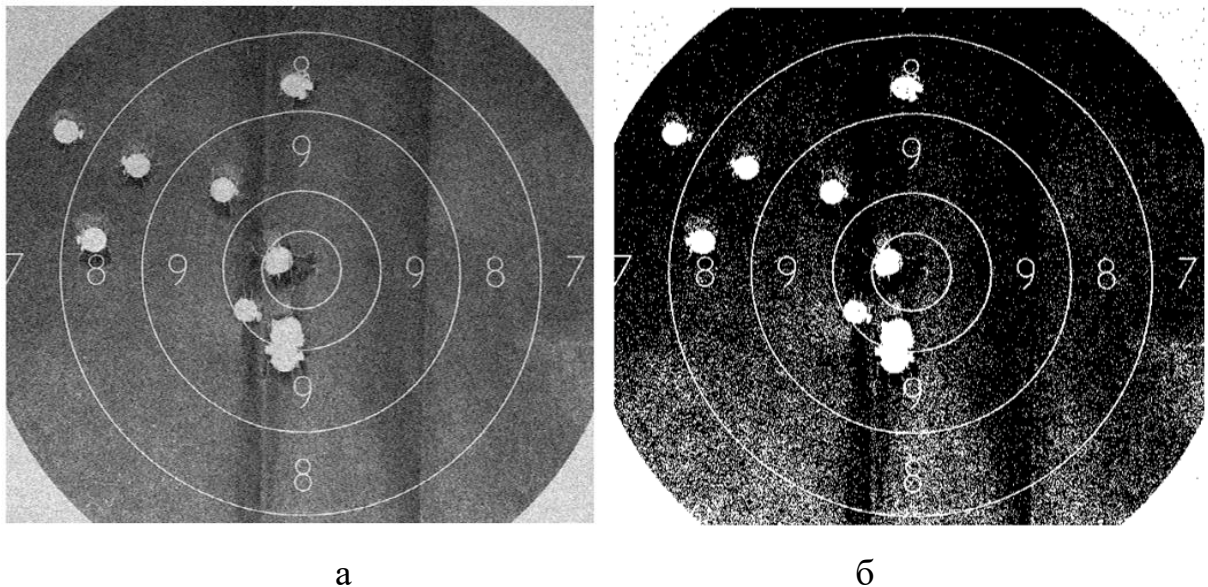


Рисунок 3.1 – Формування багатозв'язного бінарного цифрового зображення: а – багатоградаційне зображення мішені, б – сформоване бінарне зображення

Руйнування однозв'язної структури цифрового зображення $s(x, y)$ через зазначені фактори, а також вплив шумів і завад в області зображення

призводять до того, що замість одного контуру, що описує форму вихідного зображення $e(x, y)$, буде отримано набір контурів плям різної форми в межах контуру вихідного зображення. Як бачимо, контурний аналіз цих плям не дає необхідної інформації про клас оброблюваного зображення. В даному випадку доцільно переходити до просторових методів обробки, наприклад, до бінарної просторової узгодженої фільтрації або до виділення областей сцени за ознакою наявності згущень, а також використовувати інші методи, розглянуті в [5, 6].

Істотний вплив на можливість застосування методу контурного аналізу надає кількість пікселів в складі зображення об'єкта. Зі зменшенням числа пікселів внаслідок викривлення форми об'єкта шумами дискретизації падає відношення сигнал/шум. Маскуючий вплив шумів дискретизації призводить до втрати окремих, в першу чергу, дрібних деталей зображень, тобто до втрати інформативних ознак форми в їх контурах.

Необхідна кількість пікселів пов'язана з шириною спектра контуру і має вибиратися виходячи з теореми Котельникова. Однак, в цілому ряді випадків вона визначається можливостями обробної апаратури, необхідною швидкодією і застосовуваними датчиками зображення, наприклад, шириною діаграми спрямованості антени радіолокаційної станції при обробці радіолокаційних зображень або роздільною здатністю камери.

Шкідливий вплив флуктуацій може бути знижено за рахунок процедур попереднього накопичення зображень одного і того ж об'єкта. Зниження одного з найбільш небезпечних заваджаючих факторів - шуму зернистості в зображеннях, отриманих в когерентному світлі, досягається шляхом усереднення декількох незалежних зображень однієї і тієї ж ділянки поверхні. Зростання ефективності обробки в залежності від кількості накопичуваних зображень спостерігається при цьому до тих пір, поки число накопичуваних кадрів не перевищить $N \approx 25$, як показано в [102]. Поліпшення форми сильно зашумлених контурів, в тому числі і шумами квантування, може бути досягнуто в результаті їх накопичення.

У практичних застосуваннях, розрахованих на використання в реальному часі, розпізнавання образів часто виконують у вигляді такої послідовності: отримання зображення; попередня його обробка і фільтрація; сегментація і адаптивна бінаризація; серія морфологічних операцій; заповнення простору ознак об'єктів; прийняття рішення про виявлення або не виявлення корисного сигналу.

В даному розділі розглядається питання відділення шляхом сегментації на прийнятому зображенні корисного сигналу від однорідного фону.

Сегментація є одним із способів групування пікселів в сцені. Вона проводиться з метою розбиття сцени на частини з подібними властивостями, наприклад, на області з близькими значеннями яскравості. У ландшафтних сценах, характерною особливістю яких є складний статистичний характер яскравості пікселів, сегментація проводиться для розбиття сцени на статистично однорідні частини [103].

Границям зображень в напівтоновій продискретизованій сцені відповідають перепади яскравості – як позитивні, так і негативні. Ці перепади викликані різницею середніх рівнів яскравості фону і об'єкта (рис. 3.2).

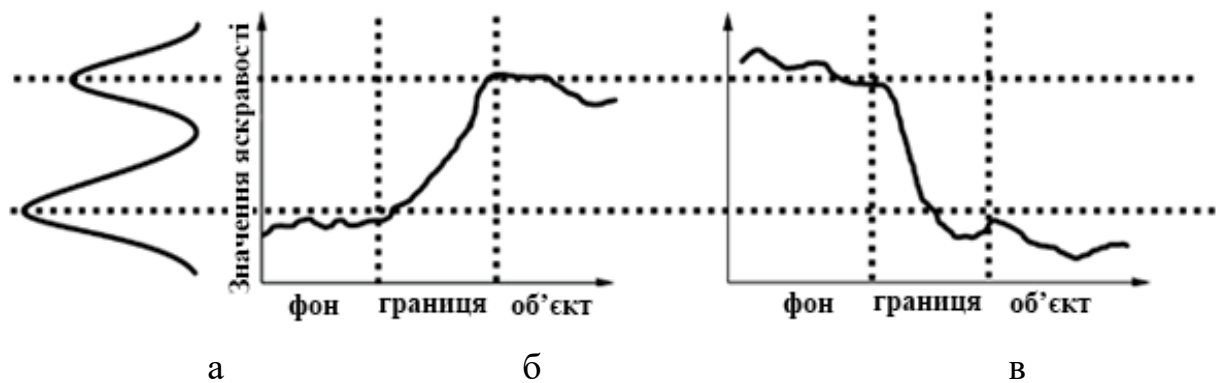


Рисунок 3.2 – Розподіл яскравості на границі об'єктів: а – гістограма яскравості, б – перепад яскравості в області границі для зображень яскравіших фону, в – перепад яскравості в області границі для зображень темніше фону

Гістограма яскравості пікселів в цій області носить добре виражений двогорбий характер. Фронту стрибка яскравості відповідає найменше в порівнянні з фоном і зображенням об'єкта число пікселів, що і призводить до провалу в центрі графіка гістограми. Гістограми яскравості, побудовані в областях фону або в областях зображення об'єкта, не мають таких добре виражених максимумів. Тому орієнтуючись на наявність провалу в центральній частині гістограми яскравості або ж на стрибок яскравості в межах невеликої ділянки сцени, можна все пікселі цієї ділянки розділити на три підмножини: фон, межа фон/зображення, зображення об'єкта. При такому підході виділення граничних точок можна розглядати як один з видів сегментації сцени.

На етапі попередньої обробки зображення, отриманого з реєструючого пристрою, проводять мінімізацію надлишкової, для поставлених завдань, інформації на всіх його позиціях. Перш ніж приступити до обробки зображення, його переводять у відтінки сірого, в зв'язку з відсутністю необхідності роботи з кольорними компонентами. Для перетворення вихідного зображення в зображення у градаціях сірого, необхідно отримати його яскравісну складову. З цією метою зручно представити зображення в кольірній моделі YUV (або HSL, HSV, подібних).

У разі, якщо на зображенні проводиться пошук великомасштабних об'єктів, або об'єктів з однорідною структурою, коли немає необхідності визначати безліч дрібних деталей, здійснюється процедура попереднього згладжування зображення.

Операцію згладжування застосовують для зменшення дії дробових шумів і наближення границь до ідеальних і замкнутих. Найчастіше використовується Гаусів фільтр, параметр розмиття якого σ вибирають в залежності від досліджуваних зображень. Функція Гауса для двовимірного випадку має вигляд

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3.1)$$

Як видно на рис. 3.3, при визначенні круглих об'єктів на зображенні, таких як лазерна пляма, кращі результати забезпечує застосування гаусового фільтра з параметром розмиття порядку $\sigma = 10$.

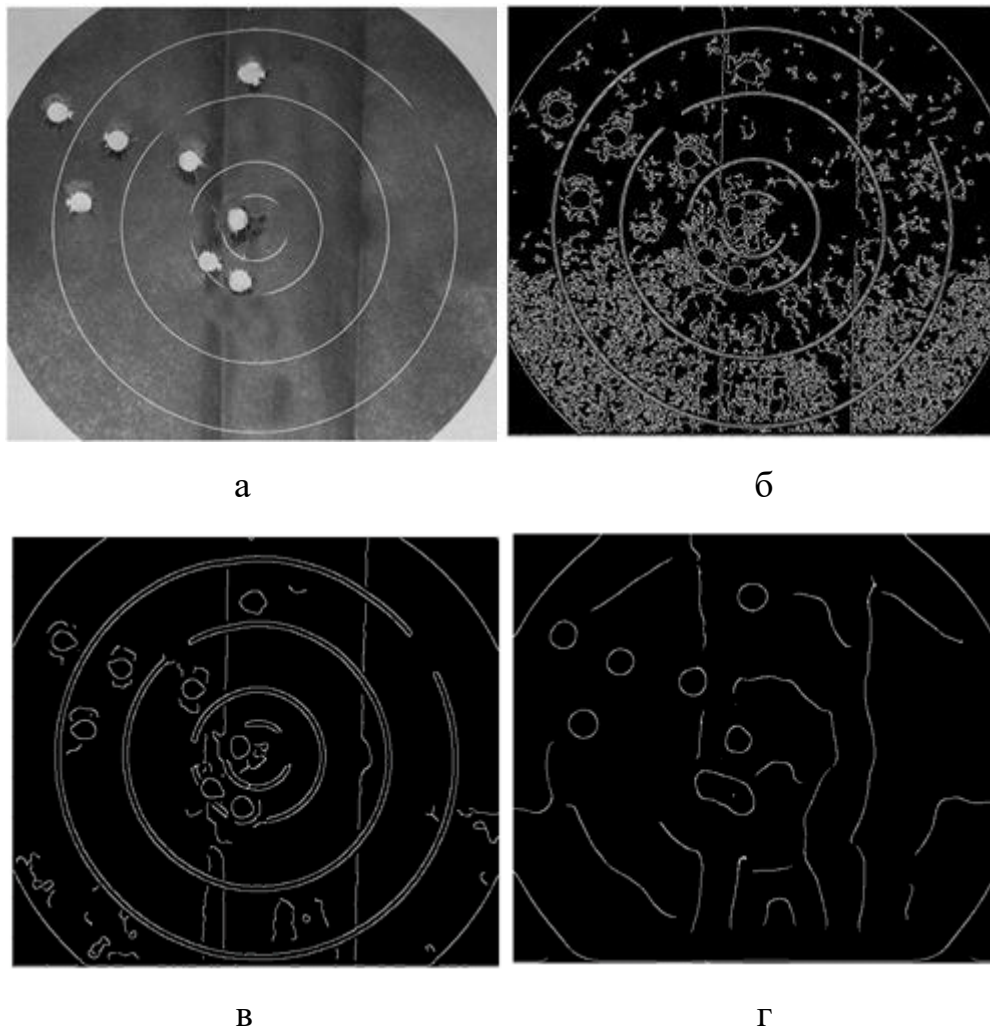


Рисунок 3.3 – Вплив згладжування вихідного зображення (а) на детектори контурів при $\sigma = 1$ (б), $\sigma = 10$ (в), $\sigma = 20$ (г)

У процесі сканування сцени F , описуваної функцією яскравості $f(x, y)$, відбувається перебір за певним законом її пікселів. Якщо поточний піксель не був віднесений до раніше виявленого зображення, то вирішується

завдання виявлення початкової точки a_0 контуру нового зображення. Сцена F містить зображення фону $g(x, y)$ і об'єкта $s(x, y)$, а також флуктуаційний шум $n(x, y)$. Зображення об'єкта $s(x, y)$ має підмножину точок $\gamma(x, y)$, що відносяться до границі $\Gamma = \{\gamma(x, y)\}$ об'єкт/фон. Границя Γ зображення $s(x, y)$ характеризується двовимірним стрибком (перепадом) з функцією яскравості $\gamma(x, y)$ (рис. 3.4).

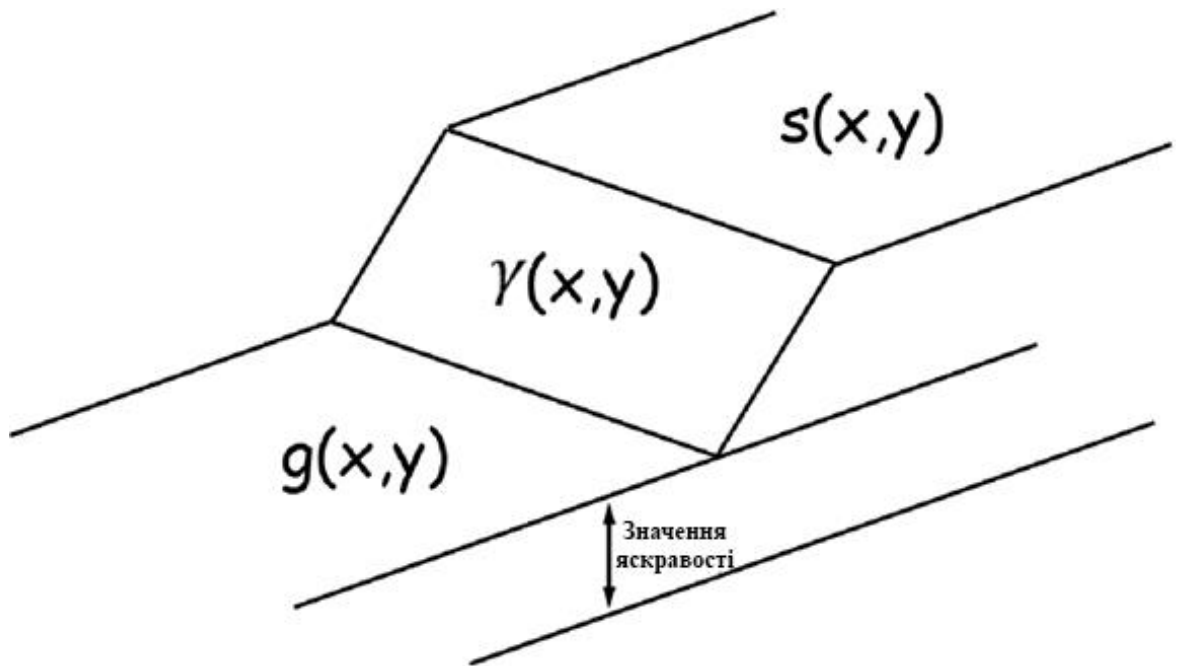


Рисунок 3.4 – Двовимірна модель границі зображення

Просторові положення точок границі Γ сильно корельовані. Границя реального зображення, як уже зазначалося раніше, являє безперервну замкнуту одновиткову криву. Кожна гранична точка має в якості сусідів дві інших граничних точки. Тому інформація про становище в сцені F хоча б однієї граничної точки, що отримується в процесі виконання операції виявлення границі, в значній мірі полегшує знаходження її інших точок, особливо якщо форма зображення апріорно відома.

Часто перехід фон /об'єкт відбувається на інтервалі декількох пікселів і тому стрибок яскравості характеризується крутим фронтом. Іноді через

погіршення освітленості в приграничній частині об'єкта цей стрибок стає пологим. У ряді випадків в області границі можуть знаходитися окремі точкові об'єкти, які представляють інтерес. Тоді роздільність границі має бути досить високою, що призводить до збільшення протяжності стрибка.

У ряді випадків [104] при вирішенні задач виявлення зображень функція яскравості $f(x, y)$ має більш складний вид, ніж той, який задається за допомогою адитивної моделі сигналу і шуму

$$f(x, y) = s(x, y) + n(x, y). \quad (3.2)$$

Модель (3.2) використовується при виявленні сигналів на фоні білого шуму. У якості більш адекватної моделі функції $f(x, y)$ слід використовувати адитивно-мультиплікативну модель, що має, з точністю до параметрів зсуву зображення $s(x, y)$, вигляд

$$f(x, y) = g_0 + s(x, y) + g(x, y)n(x, y), \quad (3.3)$$

де g_0 – постійна складова яскравості, що забезпечує невід'ємність функції $f(x, y)$.

У ландшафтних сценах ця модель описує локально однорідне поле випадкових значень яскравості. Статистична неоднорідність поля викликана повільно змінюваною детермінованою складовою. Тому при обробці таких сцен сегментація проводиться з метою формування локально однорідних в статистичному плані областей («ліс», «поле», «водойма», тощо).

Функція $s(x, y)$, $x, y \in F_s$ зображення об'єкта, як і функція $g(x, y)$ фону, є або детермінованою функцією, або реалізацією випадкового поля. Ці функції завжди мають різні перші моменти, тобто різні середні яскравості. Тому перехід від однієї функції до іншої, тобто від фону до об'єкта або від

об'єкта до фону, завжди супроводжується стрибком яскравості, розташованим в області границі фон/об'єкт. Незважаючи на різноманітність законів розподілу ймовірностей значень фонового шуму, їх одномірні АКФ в сценах природних аероландшафтів, мовного телебачення і деяких інших класів в межах локально однорідної області добре апроксимуються експоненціально-косинусною функцією виду [105]

$$R(\xi) = \sigma_{\text{fx}}^2 e^{-\alpha/\xi} \cos \beta \xi, \quad (3.4)$$

де σ_{fx}^2 – дисперсія фонового шуму;

α – декремент загасання неперіодичної АКФ;

β – кругова частота періодичної складової АКФ.

В рамках адитивної моделі (3.2) рішення про виявлення зображення об'єкта приймається шляхом порівняння з порогом значення статистики, що формується оптимальним фільтром з частотним коефіцієнтом передачі (ЧКП) [104]:

$$H(\omega_x, \omega_y) = \frac{CS^*(\omega_x, \omega_y)}{|N(\omega_x, \omega_y)|^2} e^{-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)}, \quad (3.5)$$

де $H(\omega_x, \omega_y)$ – перетворення Фур'є від імпульсної характеристики $\lambda(x, y)$ фільтра;

$S^*(\omega_x, \omega_y)$ – комплексно пов'язаний спектр функції $s(x, y)$;

$|N(\omega_x, \omega_y)|^2$ – спектральна щільність потужності (енергетичний спектр) шуму $n(x, y)$;

x_0, y_0 – координати центру ваги зображення;

C – нормувальний множник.

У разі отримання на зображенні білого шуму $|N(\omega_x, \omega_y)|^2 = N_0 = const$, сам фільтр стає узгодженим з отриманим сигналом $s(x, y)$ і формує на своєму виході відгук у вигляді ВКФ вхідного і еталонного сигналів. Якщо ж енергетичний спектр фону нерівномірний, то оптимальний фільтр (3.5) може бути представлений послідовним з'єднанням двох ланок (рис. 3.5): фоноподавляючої (обіляючої) ланки з ЧКП

$$H_{fn}(\omega_x, \omega_y) = \frac{C}{|N(\omega_x, \omega_y)|^2} \quad (3.6)$$

і узгодженої ланки з ЧКП

$$H_c(\omega_x, \omega_y) = \frac{S^*(\omega_x, \omega_y)}{N_0} e^{-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)}. \quad (3.7)$$

Фоноподавляюча ланка є інверсним фільтром і служить для вирівнювання спектра фону (див. рис. 3.5, б).

В рамках адитивно-мультиплікативної моделі (3.3), незважаючи на її значно складніший, ніж у адитивної моделі (3.2), вид, ЧКП оптимального фільтра ускладнюється незначно [104]

$$H(\omega_x, \omega_y) = \frac{CS^*(\omega_x, \omega_y)}{N_0 |G(\omega_x, \omega_y)|^2} e^{-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)}, \quad (3.8)$$

де $|G(\omega_x, \omega_y)|^2$ – енергетичний спектр функції фону $g(x, y)$;

x_0 і y_0 – координати центру зображення об'єкта.



Рисунок 3.5 – Структури оптимальних детекторів зображення об'єкта на фоні завад: з рівномірним енергетичним спектром (а), з енергетичним спектром довільної форми (б)

Узгоджена ланка оптимального фільтра не змінилося, а ЧКП фоноподавляючої ланки набув вигляду

$$H_{\phi n}(\omega_x, \omega_y) = \frac{C}{|G(\omega_x, \omega_y)|^2}. \quad (3.9)$$

Завдання виявлення початкової точки контуру зображення об'єкта в рамках моделі (3.3) ставиться аналогічно завданню виявлення самого об'єкта, тільки замість функції яскравості всього зображення $s(x, y)$ виявляється наявність в суміші (3.3) функції яскравості $\gamma(x, y)$ тільки границі Γ . Детектор, проводячи аналіз функції яскравості $f(x, y)$ сцени F , повинен обґрунтовано вибрати одну з альтернативних гіпотез:

$$\begin{aligned} \text{гіпотеза I} - f(x, y) &= g_0 + \gamma(x, y) + g(x, y)n(x, y); \\ &\text{або} \\ \text{гіпотеза II} - f(x, y) &= g_0 + g(x, y)n(x, y). \end{aligned} \quad (3.10)$$

На початку аналізу передбачається справедливність другої гіпотези, тобто вікно фільтра детектора свідомо розташоване в області фону. Фільтр детектора початкової точки контуру зображення повинен містити дві ланки (без урахування фазової ланки $e^{-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)}$): фоноподавляюче і узгоджене з формою стрибка яскравості на межі фон/об'єкт (рис. 3.6).

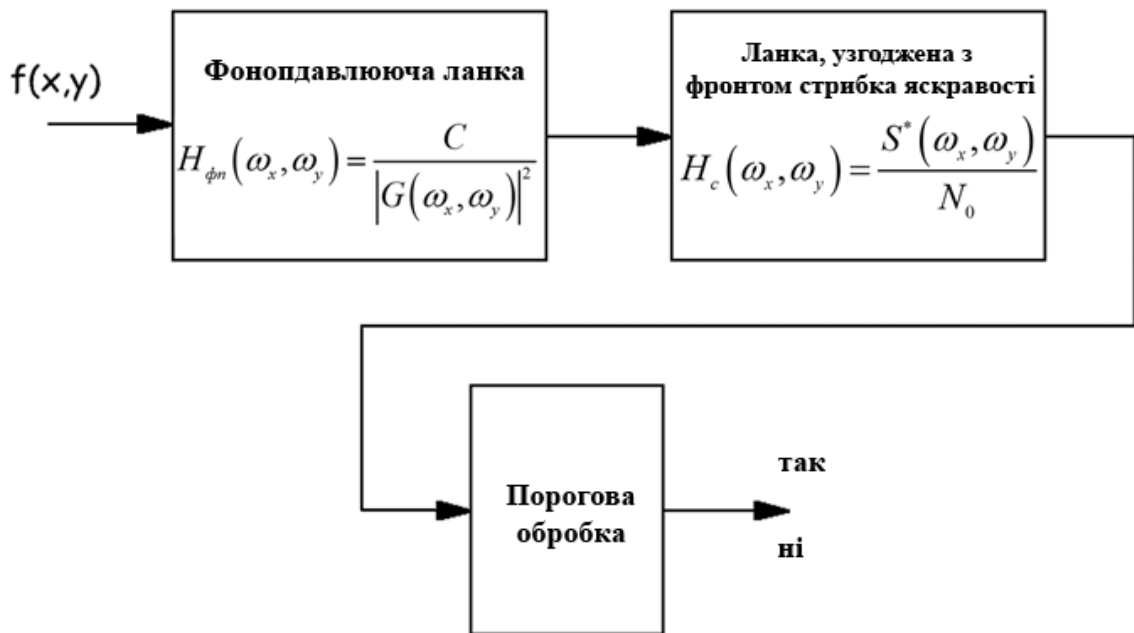


Рисунок 3.6 – Структура детектора контуру зображення

Таким чином, утворене за допомогою узгодженого фільтра зображення має у своєму складі контури корисного сигналу та фону. Для простих сцен цього може бути достатньо, але сцени зі складним фоном будуть містити багато надлишкових контурів, котрі можуть спричинити хибне виявлення. Тому, ці контури необхідно або додатково відфільтрувати, або відсіяти ще на етапі контурної фільтрації.

3.2 Визначення границь контуру відмітки в умовах апіорної невизначеності

Коректно поставлене завдання виявлення сигналу в умовах апіорної невизначеності його появи вимагає, як випливає з виразу (3.4), інформацію про енергетичний спектр фонового шуму $|G(\omega)|^2$, спектральну щільність N_0 , широкосмуговий флуктуаційний шум і спектр $S(\omega)$ виявленого сигналу.

Використання оптимальних фільтрів для обробки реальних сцен ускладнено, головним чином, складністю законів розподілу ймовірностей фонових шумів і їх нестационарністю. Необхідно відзначити, що при обробці різних ландшафтних сцен, рентгенограм, ряду класів телевізійних зображень є однаковий характер поведінки АКФ і, отже, енергетичних спектрів фонових шумів. Ці АКФ з точністю до параметрів добре апроксимуються експоненціально-косинусною функцією (3.3), а енергетичні спектри фонових шумів в області середніх і високих частот – квадратичною гіперболою [104,105]

$$|G(\omega)|^2 \approx \frac{\sigma^2 \alpha}{\omega^2}. \quad (3.11)$$

Просторовий енергетичний спектр фонового шуму представляється у вигляді

$$|G(\omega_x, \omega_y)|^2 \approx \frac{\sigma_{cp}^2 \alpha_{cp}}{\omega_x^2 + \omega_y^2}. \quad (3.12)$$

де σ_{cp}^2 і α_{cp} – відповідно дисперсія і декремент загасання АКФ фону, отримані усередненням в усіх напрямках в локальній області сцени, в кожній з яких одномірна спектральна щільність описується виразом (3.11).

Як наголошується в роботах [104,106], низькі просторові частоти в зображеннях несуть надлишкову інформацію і навіть мають негативний вплив при розпізнаванні. Тому при синтезі алгоритму фільтрації треба найбільшою мірою враховувати властивості спектра в області середніх і високих частот. Фільтр, побудований з урахуванням представлень (3.11) або (3.12), враховує цю особливість. Але при цьому він втрачає властивість оптимальності і стає квазіоптимальним. Він узгоджений з поведінкою енергетичного спектра фону тільки в області середніх і високих просторових частот. Такий фільтр названий узгоджено-вибірковим (УВФ) [104]. Використовуючи (3.8) і (3.12), запишемо вираз для ЧКП фоноподавляючої ланки УВФ у вигляді

$$H_{\phi n}(\omega_x, \omega_y) = \frac{C(\omega_x^2 + \omega_y^2)}{N_0 \sigma_{cp}^2 \alpha_{cp}}. \quad (3.13)$$

Позначимо

$$M = \frac{C}{N_0 \sigma_{cp}^2 \alpha_{cp}}. \quad (3.14)$$

Тоді, підставивши (3.12) в (3.7), можна записати наступний вираз для ЧКП УВФ:

$$H_{\phi n}(\omega_x, \omega_y) \approx MS^*(\omega_x, \omega_y)(\omega_x^2 + \omega_y^2) \exp(-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)). \quad (3.15)$$

Основна відмінність УВФ від оптимальних фільтрів полягає в тому, що для визначення його структури немає необхідності в апіорній інформації про конкретні зображення фону навколо об'єкту. Фізичний сенс даного виду обробки можна пояснити при розгляді імпульсної характеристики (ІХ) $\lambda(x, y)$ фільтра, одержуваної в результаті зворотного перетворення Фур'є від $H(\omega_x, \omega_y)$. Для просторового узгодженого фільтра з ЧКП (3.15) результат такого зворотного перетворення Фур'є має вигляд

$$\lambda(x, y) = Cs(x_0 - x, y_0 - y),$$

тобто ІХ повторює форму сигналу $s(x, y)$, але зі зміщенням на (x_0, y_0) і при протилежних знаках для x і y . Як випливає з (3.15), ЧКП УВФ з точністю до константи відрізняється від ЧКП узгодженого фільтра наявністю співмножника $(\omega_x^2 + \omega_y^2)$, який залежить від суми квадратів просторових частот. При зворотному перетворенні Фур'є такий співмножник призводить до результату

$$\lambda(x, y) = -M\nabla^2 s(x_0 - x, y_0 - y), \quad (3.16)$$

$$\text{де } \nabla^2 s(x, y) = \frac{\partial^2 s(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s(x, y)}{\partial y^2}.$$

Оператор Лапласа $\nabla^2 s(x, y)$ носить диференціальний характер і стосовно до значень яскравості пікселів сцени буде підкреслювати перепади яскравості. Таким чином, ІХ УВФ є зміщене на (x_0, y_0) контурне зображення еталонного виявленого об'єкту зі зворотним порядком проходження відліків. Тут маються на увазі не тільки зовнішній контур, але і внутрішні контури зображення.

Параметри (x_0, y_0) зміщення результату фільтрації забезпечують накопичення всіх відліків фільтра, поки його ІХ взаємодіє з усіма пікселями зображення. Відлік УВФ при обробці сцени F на підставі отриманого виразу для його ІХ дорівнює

$$\eta(\xi; \beta) = -M \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} \sum_{y=y_{min}}^{y_{max}} f(\xi - x, \beta - y) \nabla^2 s(x_0 - x, y_0 - y) \quad (3.17)$$

або

$$\eta(\xi; \beta) = -M \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} \sum_{y=y_{min}}^{y_{max}} f(x, y) \nabla^2 s(\xi - x_0 + x, \beta - y_0 + y) \quad (3.18)$$

Таким чином, реалізація УВФ зводиться до обчислення ступеня схожості аналізованої сцени F з контуром виявленого об'єкту (рис. 3.7).

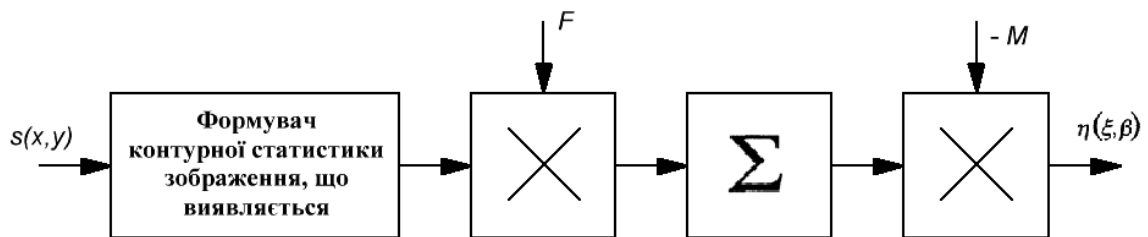


Рисунок 3.7 – Структура узгоджено-вибіркового фільтра

Розглянемо можливість застосування даного фільтра для попередньої обробки зображень в умовах МСТ.

3.3 Обґрунтування вибору границь контуру відмітки на екрані МСТ

Розглянемо адитивну модель зашумленого сигналу

$$f(x, y) = s(x, y) + n(x, y), \quad f(t) = s(t) + n(t), \quad (3.19)$$

причому $n(x, y)$, $n(t)$ – нормально-розподілений білий шум.

Оптимальний детектор сигналу при використанні даної моделі містить в якості обчислювача достатньої статистики узгоджений фільтр з ЧКП

$$H(\omega) = \frac{CS^*(\omega)}{N_0} \exp(i\omega t_0) \quad (3.20)$$

де $S(\omega)$ – спектр сигналу $s(t)$;

N_0 – спектральна щільність потужності білого шуму;

t_0 – момент часу, за який формується відлік, рівний енергії сигналу $s(t)$.

Питання, пов'язані з роботою таких фільтрів, досить докладно розглянуті в ряді робіт, зокрема [107].

При обробці сигналів в МСТ більш адекватною є адитивно-мультиплікативна модель (3.2) завади сигналу і для формування статистики, за якою приймається рішення про виявлення зображень об'єкта, доцільно використовувати не узгоджений, а узгоджено-виборчий фільтр. У зв'язку з цим розглянемо питання про зв'язок відліків узгодженого фільтра і УВФ.

В одновимірному випадку фільтр при подачі на його вхід узгодженого з ним сигналу $s(t)$ формує на своєму виході сигнал у вигляді зміщеного АКФ даного сигналу:

$$\eta_{УФ}(\tau) = C \int_{t_{min}}^{t_{max}} s(t) s(t + \tau - t_0) dt, \quad (3.21)$$

а УВФ – сигнал у вигляді ВКФ сигналу $s(t)$ зі своєю другою похідною, тобто

$$\eta_{УВФ}(\tau) = -C \int_{t_{min}}^{t_{max}} s(t) s''(t + \tau - t_0) dt. \quad (3.22)$$

Похідні стаціонарної випадкової функції $X(t)$ мають наступні взаємно коваріаційні функції [108]

$$K_{X^{(p)}X^{(q)}}(\tau) = (-1)^q K_X^{(p+q)}(\tau), \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (3.23)$$

Зокрема, взаємно коваріаційні функції випадкової функції $X(t)$ і її другої похідної ($p = 0, q = 2$) пов'язані співвідношенням

$$K_{X, X''}(\tau) = K_X''(\tau) \quad (3.24)$$

Звідси випливає, що вихідний сигнал УВФ з точністю до константи і знака дорівнює другій похідній вихідного сигналу узгодженого фільтра (рис. 3.8):

$$\eta_{УВФ}(\tau) = -\eta_{УФ}''(\tau) \quad (3.25)$$

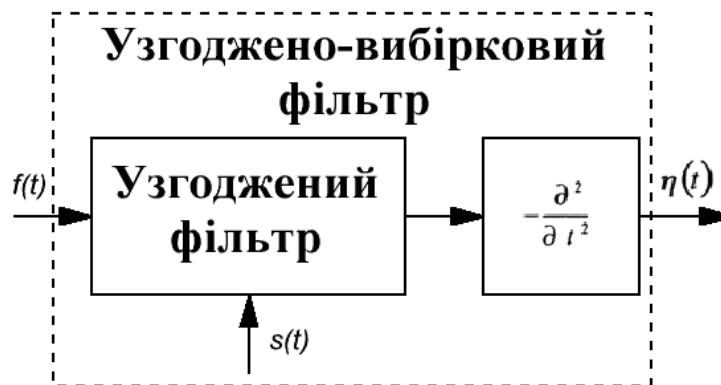


Рисунок 3.8 – Функціональна структура узгоджено-вибіркового фільтра

Враховуючи те, що АКФ сигналу є симетричною функцією, тобто $K(\tau) = K(-\tau)$, а операція подвійного диференціювання не порушує цю симетрію, то відліки УВФ при обробці узгодженого з ним сигналу будуть також симетрично розташовані щодо центрального відліку $\eta(\tau_0)$:

$$\eta_{УВФ}(\tau_0 + \tau) = \eta_{УВФ}(\tau_0 - \tau) \quad (3.26)$$

Центральний відлік $\eta_{УВФ}(\tau_0)$ УВФ, який відповідає максимальному відліку $\eta_{УВФ}(\tau_0) = \eta_{УВФ}(\tau_0 - \tau)$ узгодженого фільтра, для широкого класу АКФ сигналу також є максимальним, тобто

$$\eta_{УВФ}(\tau_0) = \max \eta_{УФ}(\tau) \quad (3.27)$$

Такими АКФ є функції виду, наприклад, $K(\tau) = \exp(-\alpha\tau^2)$.

На рис. 3.9, а показаний вид цієї функції. Після першого диференціювання $K'(\tau_0) = 0$, але величина похідної навколо точки τ_0 має більше значення (рис. 3.9, б). Друга похідна $K''(\tau)$ (рис. 3.9, в) в точці τ_0 має негативний екстремум. На рис. 3.9, г показаний вид вихідного сигналу УВФ, що представляє собою симетричну функцію з максимумом в точці τ_0 .

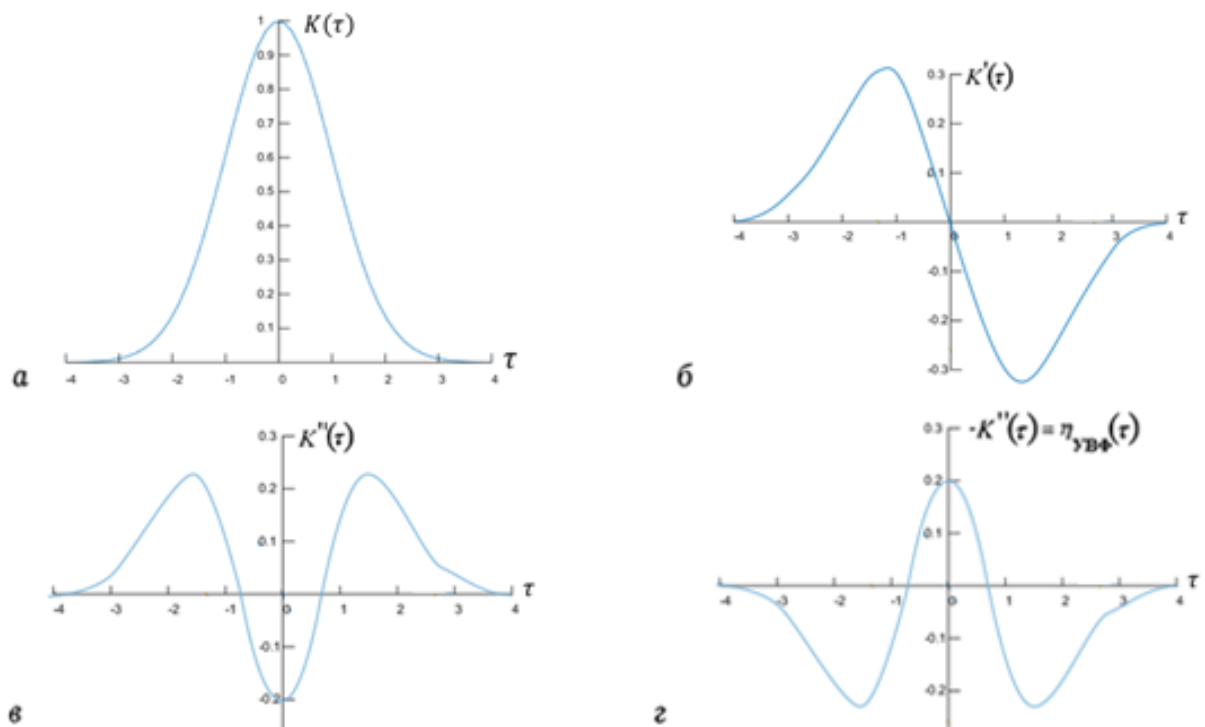


Рисунок 3.9 – Зв'язок вихідного сигналу УВФ з вихідним сигналом узгодженого фільтра

Широкий клас сигналів характеризується показовою АКФ виду

$$K_x(\tau) = c \exp(-\alpha|\tau|) \quad (3.28)$$

або показниково-косинусною АКФ

$$K_x(\tau) = c \exp(-\alpha|\tau|) \cos \beta \tau \quad (3.29)$$

Ці функції мають на початку координат кутову точку. В результаті перша похідна функції в цій точці характеризується розривом, а друга – не існує. Але оскільки при цифровій обробці маємо справу з дискретною послідовністю відліків АКФ, для якої завжди існує друга різниця $\Delta^2 K(\tau)$, то при узгоджено-виборчій фільтрації сигналів з подібними АКФ центральний відлік УВФ, відповідний піковому відліку узгодженого фільтра, також залишається максимальним. Відзначимо, що в залежності від правила отримання кінцевої різниці (праворуч або ліворуч від точки), максимум і вся вихідна послідовність можуть бути зміщені на один відлік при збереженні її симетричного характеру.

Таким чином, вихідний сигнал УВФ при обробці незашумленого узгодженого сигналу являє собою симетричну функцію з максимальним значенням в точці t_0 . Величина пікового відліку $\eta(\tau_0)$ УВФ залежить від ширини спектра сигналу $s(t)$, для якого він побудований. Чим ширше цей спектр, тим вужче АКФ $K(\tau)$ сигналу $s(t)$, тим крутіше буде проходити в точці τ_0 лінія графіка першої похідної $K'(\tau_0)$ і більше значення другої похідної $K''(\tau_0)$ при $\tau = \tau_0$, тобто буде значніше величина екстремуму в цій точці (рис. 3.10).

При цьому також звужується область значущих значень вихідного сигналу фільтра, тобто росте його вибірковість. Коли сигнал, що

фільтрується за своїм виглядом, прямує до δ -функції, буде отримано максимально можливий за величиною центральний відлік – $K''(\tau)|_{\tau=\tau_0}$ при мінімальній ширині області його вихідних сигналів.

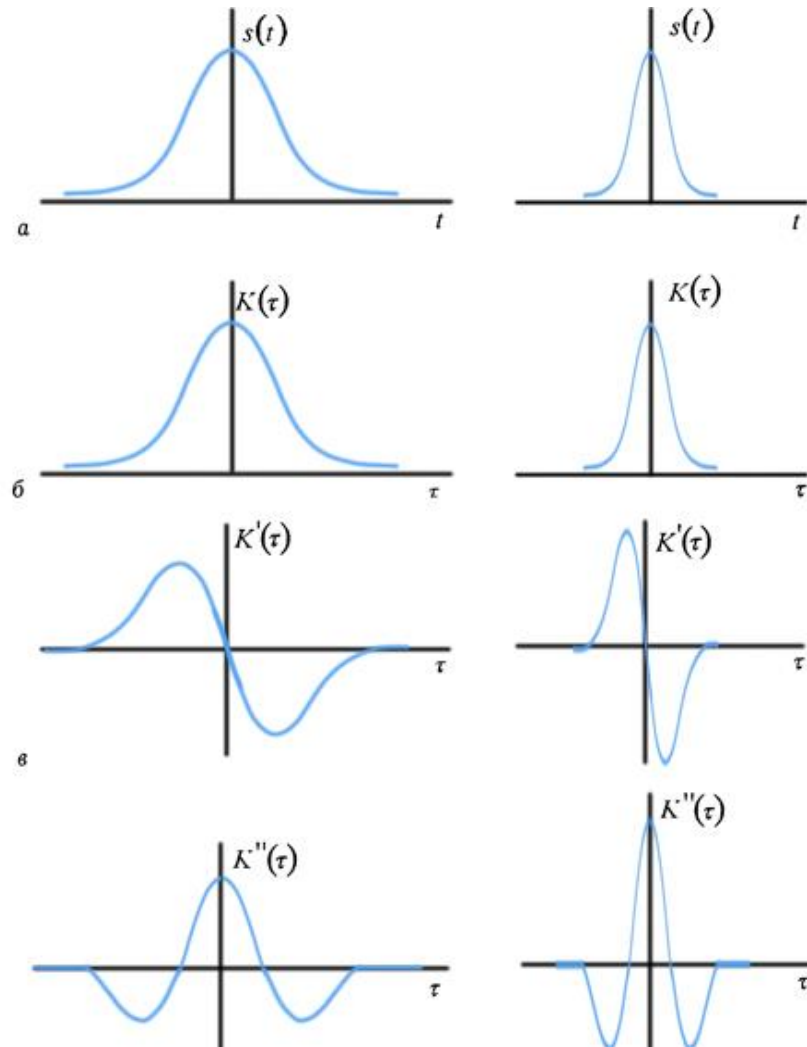


Рисунок 3.10 – Формування вихідного сигналу УВФ при вхідних сигналах $s(t)$ різної тривалості

Слід також зазначити, що через диференціальний характер роботи УВФ величина постійної складової сигналу, що фільтрується, не впливає на рівень його вихідного сигналу.

Однак, зображення у тому вигляді, яке буде отримано після контурної фільтрації все ще може мати надлишкові контури та потребує додаткової постобробки.

3.4 Постобробка контурів

Для подальшого аналізу зображення запропоновано перехід з отриманого простору контурів в простір площ шляхом виконання операції заливки [8]. Замкнені контури утворюють цілісні площі, тоді як розімкнуті контури будуть відсіяні. Кульові отвори і позначки від лазерного випромінювача при правильному виборі параметрів згладжуючого фільтру після узгоджено-вибіркової фільтрації будуть давати цілісний замкнутий контур (рис. 3.11).

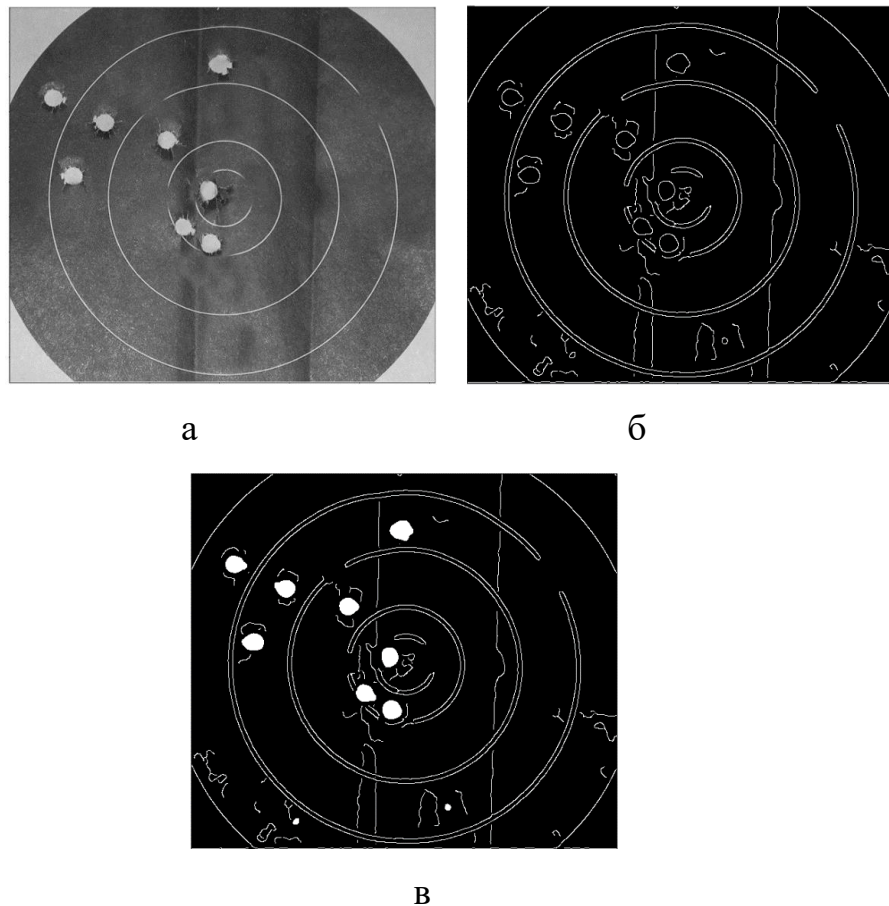


Рисунок 3.11 – Заливка замкнутих контурів досліджуваного зображення: а – вихідне зображення, б – контурне представлення, в – заливка цільних контурів

На етапі постобробки контурів доцільно також застосовувати операції математичної морфології. Для того, щоб позбутися від незамкнених ліній на зображенні, може бути застосована операція морфологічної ерозії [109] з використанням малого хрестоподібного структурного елемента.

Ерозія бінарного зображення A структурним елементом B позначається як $A \odot B$ та задається виразом:

$$A \odot B = \{z \in A \mid B_z \subseteq A\} \quad (3.30)$$

При виконанні операції ерозії структурний елемент проходить по всім пікселям зображення. Якщо в деякій позиції кожен одиничний піксель структурного елемента співпадає з одиничним пікселем бінарного зображення, то виконується роз'єднання центрального пікселя структурного елемента з відповідним пікселем вихідного зображення.

В результаті застосування операції ерозії всі об'єкти, менші ніж структурний елемент, стираються, об'єкти, з'єднані тонкими лініями стають роз'єднаними і розміри всіх об'єктів зменшуються. Результат застосування ерозії до аналізованого зображення представлений на рис. 3.12.

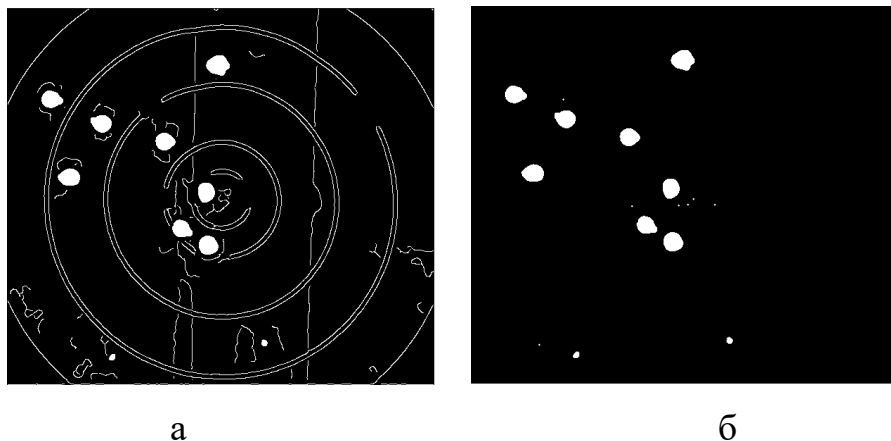


Рисунок 3.12 – Застосування операції морфологічної ерозії до аналізованого зображення: а – вихідне зображення, б – зображення після ерозії

Останнім етапом контурного аналізу зображень в МСТ є прийняття рішення – визначення координат центрів округлих об'єктів і їх діаметрів. Виконується це за допомогою алгоритму виявлення з використанням вагових коефіцієнтів, котрий був описаний у розділі 2. Слід зазначити, що на практиці, при реалізації даного алгоритму, при постійному значенні розміру лазерної плями на дистанції стрільби, розмір кульового отвору коливався у межах +/- 10%. Це пов'язано з різним кутом влучення кулі та випадкових деформацій паперової або тканинної мішені, в результаті чого розмір отвору одного й того ж калібру міг відрізнятись від пострілу до пострілу.

На рис. 3.13 наведені зображення лазерного променя і кульового отвору, а також їх контурні представлення.

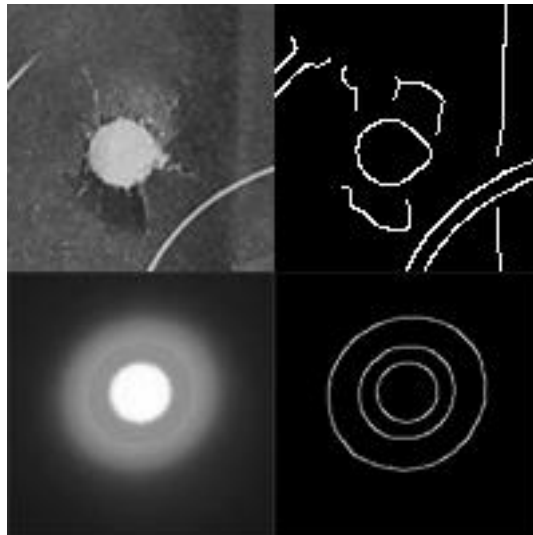


Рисунок 3.13 – Контурні представлення основних інформаційних об'єктів на зображенні МСТ – кульової пробоїни і лазерного променя

На рис. 3.14 та 3.15 показаний результат проведених операцій для досліджуваних кадрів.

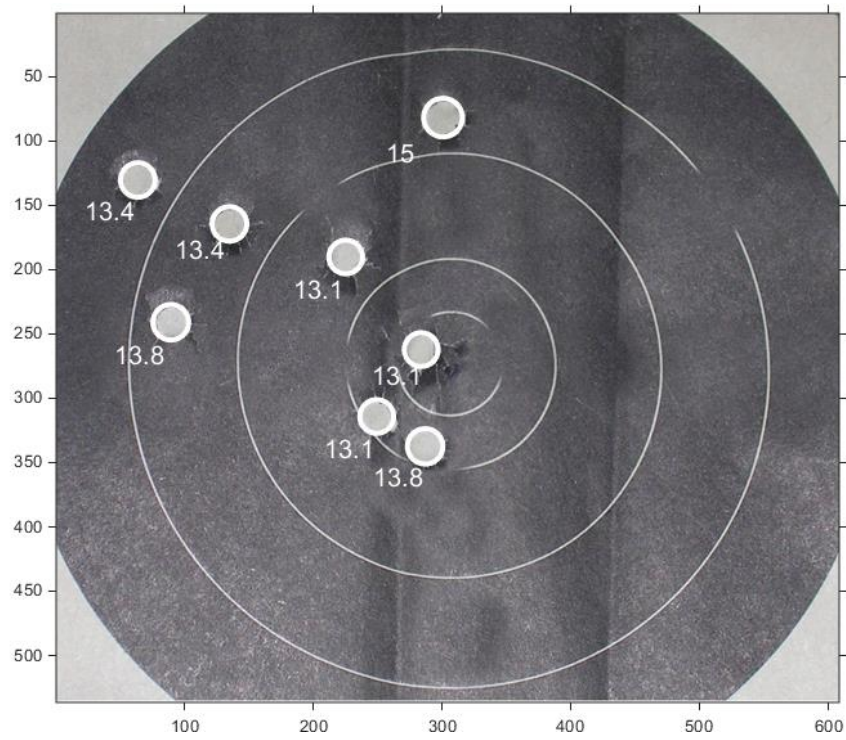


Рисунок 3.14 – Розташування кульових отворів на фоні вихідного зображення

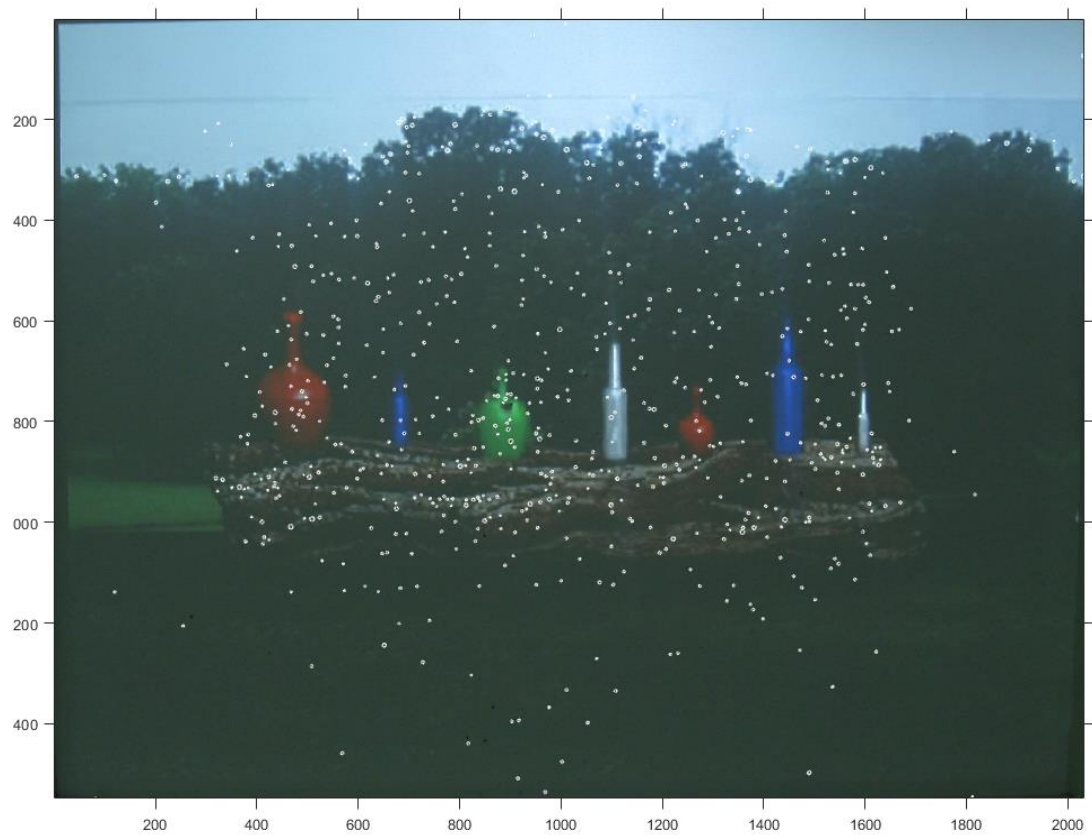


Рисунок 3.15 – Розташування кульових отворів на фоні сюжету МСТ

Слід зазначити, що на відміну від роботи МСТ у режимі імітації з лазерною насадкою, для бойового режиму існує проблема розпізнавання двох близько розташованих кульових отворів. На даний час дана задача все ще немає остаточного вирішення та потребує подальших досліджень. Але, один з методів вирішення цієї проблеми полягає у збереженні відфільтрованого зображення з попереднього кадру у пам'яті. Перед початком алгоритму виявлення та після контурної фільтрації, з досліджуваного зображення кожний раз розраховується різниця даного кадру з даними, що записані у пам'яті. Це дає змогу збільшити швидкодію та виявляти близько розташовані влучення (рис. 3.16).

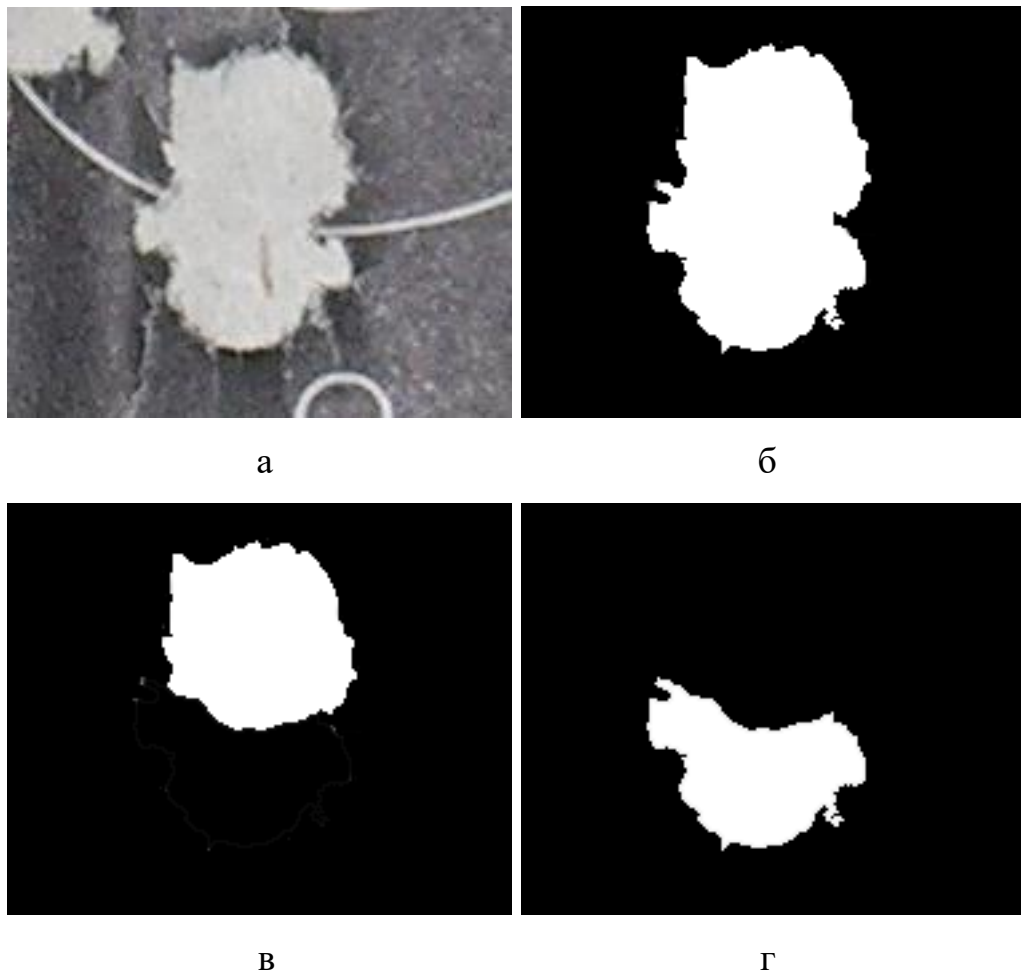


Рисунок 3.16 – Два близьких влучення: а – вихідне зображення, б – відфільтроване зображення, в – збережене у базі зображення, г – різниця відфільтрованого зображення з зображенням з бази

Однак, на практиці, запропонований алгоритм виявлення може визначати близько розташовані влучення, котрі перетинаються максимум на ~30 % своєї площі. Це обумовлено обраним порогом виявлення алгоритму, що описаний у розділі 2. Зміна порогу виявлення дозволить збільшити площу перетину двох кульових отворів, при якій такі влучення будуть виявлятися, але це призведе до збільшення ймовірності хибної тривоги.

Таким чином, сформований алгоритм фільтрації зображень, котрий здатен працювати за умови апріорної невизначеності та має кращі показники правильного виявлення за умови низького співвідношення сигнал/завада.

Висновки по розділу 3

Основні результати досліджень, що викладені у розділі 3, опубліковані в роботах [9, 15-18].

1. Запропоновано використання методу контурного аналізу зображень для попередньої фільтрації фону з кадрів відеопотоку, отриманого з відеокамери МСТ. У якості детекторів контуру використовується узгоджено-вибірковий фільтр. Основна відмінність УВФ від оптимальних фільтрів полягає в тому, що для визначення його структури немає необхідності в апріорній інформації про конкретні зображення фону навколо об'єкту. Це дає змогу проводити фільтрацію фону, що швидко змінюється. Даний фільтр узгоджений з поведінкою енергетичного спектра фону тільки в області середніх і високих просторових частот, так як низькочастотна складова для задачі виявлення контурів являє надлишкову інформацію. Реалізація УВФ на практиці зводиться до обчислення ступеня схожості аналізованої сцени F з контуром виявленого об'єкту.

2. Проведений аналіз властивостей узгоджено-вибіркового фільтру. Вихідний сигнал УВФ при обробці незашумленого узгодженого сигналу являє собою симетричну функцію з максимальним значенням в точці t_0 .

Величина пікового відліку $\eta(\tau_0)$ УВФ залежить від ширини спектра сигналу $s(t)$, для якого він побудований. Чим ширше цей спектр, тим вужче АКФ $K(\tau)$ сигналу $s(t)$, тим крутіше буде проходити в точці τ_0 лінія графіка першої похідної $K'(\tau_0)$ і більше значення другої похідної $K''(\tau_0)$ при $\tau = \tau_0$. При цьому також звужується область значущих значень вихідного сигналу фільтра, тобто росте його вибірковість. Коли сигнал, що фільтрується за своїм виглядом, прямує до δ -функції, отримується максимально можливий за величиною центральний відлік $-K''(\tau)|_{\tau=\tau_0}$ при мінімальній ширині області його вихідних сигналів. На практиці це дає змогу з більшою точністю проводити виділення контурів кульових отворів та лазерних плям, ніж інших об'єктів за умови, що на фоні немає об'єктів, дрібніших за ці відмітки. Також дана властивість збільшує ймовірність утворення замкнутого контуру у дрібних об'єктів.

3. У якості постобробки контурного зображення використовується алгоритм заливки замкнутих контурів та операції математичної морфології. Дані операції фільтрують зайві контури, залишаючи лише ті контури, які мають замкнуту форму. Вважаючи те, що алгоритм УВФ має максимальну ймовірність отримання замкнутих контурів для дрібних об'єктів, до алгоритму виявлення будуть надходити лише такі зображення, на яких залишаться лише імовірні кульові отвори або відмітка від лазерної плями.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ СЛІДКУВАННЯ ЗА ТРАЄКТОРІЄЮ
ПРИЦІЛЮВАННЯ В МСТ

4.1 Оцінка зміни координат лазерного променя під час процесу прицілювання

Під час тренувань стрільців з реальною зброєю часто постає питання слідування за траєкторією прицілювання та відображення її на екрані для подальшого аналізу тренером. Це легко вирішити за допомогою лазерної насадки (в інфрачервоному або видимому діапазоні) на зброю та її юстування з лінією прицілювання. Однак, у даному випадку МСТ повинен працювати одночасно у двох режимах: з визначенням кульової пробоїни та фіксацією траєкторії руху лазерної плями. Таке збільшення об'єму обчислюваних даних критично зменшує швидкодію алгоритмів на обчислювальних машинах з невеликою тактовою частотою. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано створення алгоритму слідування за траєкторією прицілювання за допомогою стробування зображень.

Перш за все, необхідно зробити екстраполяцію отримуваних даних про зміну координат лазерного променя.

Нехай інформація, що поступає від алгоритму виявлення представляє собою адитивну суміш корисного сигналу кожної з координат $s_x(\mathcal{G}_x, t)$ і $s_y(\mathcal{G}_y, t)$, і завади $\Delta r(t)$. Корисний сигнал – процес зміни в часі координати цілі – представляється у вигляді поліноміальної функції:

$$s_x(\mathcal{G}_x, t) = \alpha_{0x} + \alpha_{1x}t + \alpha_{2x}\frac{t^2}{2!} + \dots + \alpha_{nx}\frac{t^k}{k!} \quad (4.1)$$

$$s_y(\mathcal{G}_y, t) = \alpha_{0y} + \alpha_{1y}t + \alpha_{2y}\frac{t^2}{2!} + \dots + \alpha_{ny}\frac{t^k}{k!} \quad (4.2)$$

У виразі (4.1) і (4.2) коефіцієнти полінома містять в собі координати, швидкості зміни координати, прискорення і т.д. Для опису траєкторії переміщення лазерного променя можна обмежитися тільки трьома коефіцієнтами, однак це обмежить кількість вимірювань, котрі можна передбачити. Це параметри траєкторії руху лазерної плями. Сукупність параметрів α записана у вигляді стовпчика, утворює вектор параметрів траєкторії $\mathcal{G}' = [\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2]$. Дані коефіцієнти обчислюються після першого кадру, в якому було виявлено лазерну пляму на зображенні, шляхом обчислення відхилення центру плями за інтервал кадрової розгортки.

Процес вимірювання траєкторії полягає в отриманні вибірки значень $s_1, s_2 \dots s_n$ в моменти часу $t_1 < t_2 < \dots < t_n$. Сукупність значень s_i утворює n -мірний вектор-стовпчик вибірових значень $s' = [s_0, s_1 \dots s_n]$.

Завдання екстраполяції полягає в знаходженні параметрів траєкторії в точці, що лежить поза інтервалом спостереження, за їх значенням всередині цього інтервалу. У загальному випадку задача екстраполяції параметрів ставиться таким чином.

Нехай проводиться вибірка вимірюваних значень координати лазерного плями в моменти часу $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ на інтервалі спостереження $(\overline{t_1, t_n})$. Вибіркові значення координати рівні

$$s_{ix} = s_x(\mathcal{G}_x, t_i) + \Delta s_i, \quad (4.3)$$

$$s_{iy} = s_y(\mathcal{G}_y, t_i) + \Delta s_i, \quad (4.4)$$

Координати $s_x(\mathcal{G}_x, t_i)$ та $s_y(\mathcal{G}_y, t_i)$ можна представити у вигляді описаної в (4.1) і (4.2) поліноміальної функції. Завада Δs_i – випадкова послідовність помилок вимірювання з відомими статистичними характеристиками. Завдання полягає в знаходженні функції $s_x(\mathcal{G}_x, t_j)$ та $s_y(\mathcal{G}_y, t_j)$ в момент часу t_j , що знаходиться за межами інтервалу спостереження вхідної послідовності.

Рішення поставленого завдання може бути виконано двома способами.

1. Шляхом безпосереднього розрахунку параметрів траєкторії в точці, що екстраполюють за даними вибірових значень координат.

2. Шляхом використання для екстраполяції згладжених (інтерпольованих) значень параметрів на потрібній точці всередині інтервалу спостереження і гіпотези про закони зміни цих параметрів поза інтервалу спостереження.

З точки зору кінцевих результатів обидва ці способи є рівноцінними [110]. На практиці більша перевага віддається другому способу, так як обчислення згладжених (інтерпольованих) значень параметрів в процесі обробки інформації представляє самостійну задачу, а обчислення екстрапольованих значень параметрів по їх плавним значенням більш просте, ніж за вихідним результатами вимірювання.

При поліноміальному поданні координати, екстрапольованої на час t_e , параметри визначаються за формулами

$$\hat{s}_e^{(0)} = \hat{s}_n^{(0)} + \hat{s}_n^{(1)} \tau_e + \hat{s}_n^{(2)} \frac{\tau_e^2}{2!} + \dots + \hat{s}_n^{(k)} \frac{\tau_e^k}{k!},$$

$$\hat{s}_e^{(1)} = \hat{s}_n^{(1)} + \hat{s}_n^{(2)} \tau_e + \dots + \hat{s}_n^{(k)} \frac{\tau_e^{k-1}}{(k-1)!},$$

$$\dots$$
(4.5)

$$\hat{s}_e^{(k)} = \hat{s}_n^{(k)},$$

де $\tau_e = (t_e - t_n)$ – інтервал інтерполяції.

А для мінімальної вибірки, з якою працює МСТ (координати, швидкість, прискорення):

$$\hat{s}_e^{(0)} = \hat{s}_n^{(0)} + \hat{s}_n^{(1)}\tau_e + \hat{s}_n^{(2)}\frac{\tau_e^2}{2!},$$

$$\hat{s}_e^{(1)} = \hat{s}_n^{(1)} + \hat{s}_n^{(2)}\tau_e, \quad (4.6)$$

$$\hat{s}_e^{(2)} = \hat{s}_n^{(2)}.$$

В векторно-матричній формі вираз (4.5) можна записати у вигляді

$$\hat{\mathcal{G}}_e = F_e \hat{\mathcal{G}}_n, \quad (4.7)$$

де F_e — матричний оператор екстраполяції, який записується у вигляді

$$F_e = \begin{bmatrix} 1 & \tau_e & \dots & \frac{\tau_e^k}{k!} \\ 0 & 1 & \dots & \frac{\tau_e^{k-1}}{(k-1)!} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

$$\mathcal{G}_e = \begin{bmatrix} \hat{s}_e^{(0)} \\ s_e \\ \hat{s}_e^{(1)} \\ \dots \\ \hat{s}_e^{(k)} \\ s_e \end{bmatrix}, \quad \mathcal{G}_n = \begin{bmatrix} \hat{s}_n^{(0)} \\ s_n \\ \hat{s}_n^{(1)} \\ \dots \\ \hat{s}_n^{(k)} \\ s_n \end{bmatrix}.$$

Вираз (4.7) дозволяє знаходити екстрапольовані значення параметрів для кожного конкретного випадку представлення траєкторії.

За умови мінімальної вибірки нема можливості прописувати деяку складну траєкторію руху, так як на короткому відрізку часу вона буде наближатися до лінійної. У даному випадку оператор екстраполяції буде мати вигляд

$$F_e = \begin{bmatrix} 1 & \tau_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Так як вимірювання проводилися рівнодискретно, з періодом кадрової розгортки камери T_0 , то вектор екстрапольованих параметрів буде мати вигляд

$$\hat{\mathcal{G}}_e = \begin{bmatrix} \hat{s}_e^{(0)} \\ \hat{s}_e^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & pT_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{s}_n^{(0)} \\ \hat{s}_n^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{s}_e^{(0)} + \hat{s}_e^{(1)} pT_0 \\ \hat{s}_e^{(1)} \end{bmatrix}, \quad (4.10)$$

де $p = \tau_e / T_0$ – відношення часу екстраполяції до періоду вимірювань.

Якщо, крім того, вимірювання координат лінійної траєкторії являються рівноточними, то екстрапольоване значення координат можна представити у вигляді

$$\hat{s}_e^{(0)} = \sum_{i=1}^n \left[\eta_s(i) + \tau_\vartheta \eta_{s(1)}(i) \right] s_i. \quad (4.11)$$

При $\tau_\vartheta = T_0$, тобто при екстраполяції кожний кадр, отримуємо остаточно

$$\hat{s}_e^{(0)} = \sum_{i=1}^n \eta_{s_e}(i) s_i, \quad (4.12)$$

де $\eta_{s_e}(i) = (6i - 2n - 4) / n(n - 1)$ – вагова функція вимірювання значень при екстраполяції на один кадр [111].

Таким чином, формула (4.12) дозволяє безпосередньо визначати екстрапольовані значення координат по її розмірам в n точках.

4.2 Організація стробування зони вимірювання в якій знаходиться лазерна ляма під час прицілювання

При роботі системи з лазерними імітаторами під час здійснення пострілу імітатор залишає на проекційному екрані короткочасну світлову пляму. Тривалість випромінюваного світлового імпульсу ~ 200 мс. Отже, шуканий об'єкт буде присутній у відеопотоці кілька кадрів і здійснювати при цьому незначний по амплітуді різкий рух в одному з напрямків внаслідок тремтіння руки стрілка під час здійснення пострілу. Аналогічна ситуація має місце, коли проводиться спостереження за процесом прицілювання стрілка – в даному випадку стеження за світловою плямою відбувається з самого початку її появи на екрані тренажера.

Для зменшення обсягів обчислень на етапі прийняття рішень запропоновано формувати область захоплення об'єкта – строб – границі

якого, на основі вектору швидкості його руху, об'єкт не покине протягом деякого часу.

Однією з основних операцій при обробці зображень в МСТ є відбір відміток рухомих об'єктів (з числа отриманих в кадрі відеопотоку) для продовження траєкторій їх руху. Відбір об'єктів і їх «прив'язка» до супроводжуваних траєкторій проводиться на основі порівняння координат нових об'єктів з екстрапольованими координатами і характеристиками супроводжуваних траєкторій. У найпростішому випадку селекція проводиться тільки за координатами.

Порівняння координат нових об'єктів і екстрапольованих точок в принципі можна здійснювати в усій зоні огляду камери, наприклад, за критерієм мінімальної відстані між ними [112]. Однак обсяг обчислень в цьому випадку буде надзвичайно великий. Для спрощення процесу селекції траєкторій і скорочення обсягу обчислень порівняння координат нових об'єктів і екстрапольованих точок пропонується здійснювати в стробах.

При спостереженні за кількома цілями в присутності завад (внутрішніх і зовнішніх) в строб можуть потрапляти не тільки відмітки, що належать тій траєкторії, для якої він побудований, а й хибні відмітки, утворені завадами, що пройшли фільтр первинної обробки, або навіть відмітки, що належать іншим траєкторіям. Тому при обробці зображень з використанням стробування виникає необхідність селекції відміток, що потрапили у строб, з метою вибору однієї відмітки, ймовірність приналежності якої до супроводжуваної траєкторії найбільша.

Для прискорення роботи, використовуваного в МСТ алгоритму обчислень координат шуканих об'єктів на зображенні, запропоновано використання згаданих раніше стробів селекції. Строб селекції – область навколо передбаченого вимірювання, яка використовується для додаткового аналізу.

У відповідності з основним принципом побудови траєкторій [113, 114] координати нового об'єкта в кадрі можуть бути використані для продовження

супроводжуваної траєкторії, якщо його відхилення від центру строба не перевищує деяку фіксовану величину, яка визначається розмірами строба, тобто якщо

$$|a_i - a_{ei}| \leq \Delta a_{icmp}, \quad (4.13)$$

де $a_i = (x_i, y_i)$ – сукупність координат i -го нового об'єкта;

$a_{ei} = (x_{ei}, y_{ei})$ – сукупність координат центру строба для i -ї траєкторії;

$\Delta a_{icmp} = (\Delta x_{icmp}, \Delta y_{icmp})$ – розміри строба по координатах x, y для i -ї траєкторії.

Основною задачею, в процесі селекції траєкторій шляхом стробування, є вибір форми і розмірів стробів на основі детального вивчення статистичних характеристик відхилення істинних (що належать супроводжуваній траєкторії) відміток від відповідних екстрапольованих точок.

Відхилення істинних координат об'єкту від центру строба визначається сумарними (випадковими і динамічними) помилками екстраполяції координат траєкторії за попередніми згладженими значеннями його параметрів і помилками одиничного вимірювання нових координат.

Розглянемо більш детально статистичні характеристики цих помилок.

Нехай за даними попередніх $(n - 1)$ кадрів проведена екстраполяція координат траєкторії цілі на наступний n -й кадр. Сумарні відхилення координат нового об'єкта від екстрапольованої точки у вибраній системі координат будемо позначати $\Delta x_\Sigma, \Delta y_\Sigma$. Величини цих відхилень (за умови відсутності систематичних помилок вимірювання) відповідно рівні

$$\Delta x_\Sigma = \Delta_\epsilon x + \Delta_d x_e, \quad \Delta y_\Sigma = \Delta_\epsilon y + \Delta_d y_e, \quad (4.14)$$

де $\Delta_\epsilon x, \Delta_\epsilon y$ – випадкові помилки екстраполяції координат;

$\Delta_d x_e, \Delta_d y_e$ – динамічні помилки екстраполяції координат.

При обраних напрямках осей координат для випадкових складових $\Delta_{\epsilon}x$, $\Delta_{\epsilon}y$ маємо

$$\Delta_{\epsilon}x \approx \pm r(\Delta_{\epsilon}\beta_e + \Delta\beta), \quad (4.15)$$

$$\Delta_{\epsilon}y = \pm(\Delta_{\epsilon}r_e + \Delta r),$$

де Δr , $\Delta\beta$ – помилки вимірювання.

Ці складові статистично незалежні між собою і підпорядковані нормальному закону розподілу ймовірності з нульовим математичним очікуванням і дисперсіями σ_x^2 , σ_y^2 відповідно.

Щільність ймовірності для системи двох незалежних випадкових величин $\Delta_{\epsilon}x$, $\Delta_{\epsilon}y$ буде

$$w(\Delta_{\epsilon}x, \Delta_{\epsilon}y) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_{\epsilon}x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\Delta_{\epsilon}y^2}{\sigma_y^2} \right) \right]. \quad (4.16)$$

Лінія, що відповідає значенням однакової щільності ймовірності, визначається рівнянням

$$\frac{\Delta_{\epsilon}x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\Delta_{\epsilon}y^2}{\sigma_y^2} = \epsilon^2, \quad (4.17)$$

де ϵ – рівень щільності ймовірності.

Розділивши праву і ліву частини цього рівняння на ϵ^2 , отримаємо

$$\frac{\Delta_{\epsilon}x^2}{(\epsilon\sigma_x)^2} + \frac{\Delta_{\epsilon}y^2}{(\epsilon\sigma_y)^2} = 1. \quad (4.18)$$

Рівняння (4.18) являє собою рівняння еліпса, віднесеного до спряжених півосей $\varepsilon\sigma_x$, $\varepsilon\sigma_y$. При $\varepsilon=1$ отримуємо еліпс віднесений до спряжених півосей σ_x , σ_y (рис. 4.1).

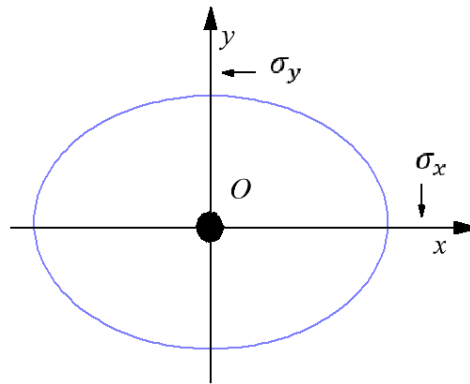


Рисунок 4.1 – Щільність ймовірності для двох незалежних випадкових величин

Будемо далі вважати, що складові динамічних помилок екстраполяції також підпорядковані нормальному закону розподілу ймовірності і мають незалежні складові по осях p , q .

У двовимірному просторі динамічні помилки утворюють еліпс рівної щільності ймовірностей, рівняння якого записуються у вигляді

$$\frac{\Delta p^2}{(\varepsilon\sigma_p)^2} + \frac{\Delta q^2}{(\varepsilon\sigma_q)^2} = 1, \quad (4.19)$$

де p , q – незалежні складові динамічних помилок;

σ_p^2 , σ_q^2 – дисперсії незалежних складових.

Для випадку $\varepsilon=1$ отримаємо еліпс, зображений на рис. 4.2.

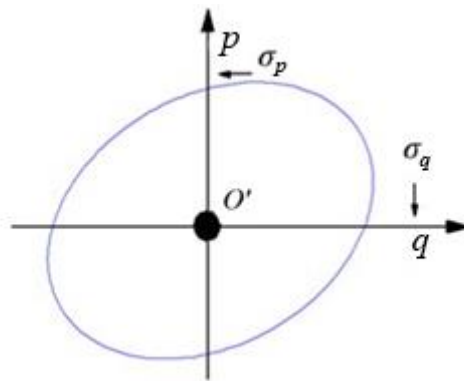


Рисунок 4.2 – Щільність ймовірності динамічних помилок

Еліпси (рис. 4.1, 4.2), складаючись, утворюють у просторі сумарний еліпс, напрямки спряжених півосей якого (напрямки осей декартової системи координат $O\eta\gamma$) по відношенню до осей системи координат OXY і величини середньоквадратичних відхилень σ_η , σ_γ за цими півосями визначаються за правилами складання у просторі незалежних векторних відхилень, обумовлених випадковими і динамічними помилками [115]. Для наочності зображення початок системи координат $O\eta\gamma$ винесено в точку O'' (рис. 4.3).

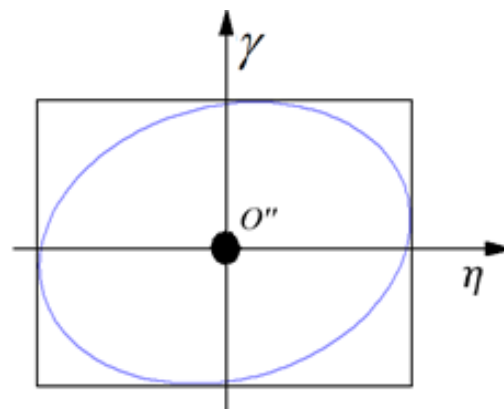


Рисунок 4.3 – Сумарна щільність ймовірності випадкових величин

Щільність ймовірності системи випадкових величин $\Delta\eta$, $\Delta\gamma$ записується як

$$w(\Delta\eta, \Delta\gamma) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_\eta \sigma_\gamma} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right), \quad (4.20)$$

$$\text{де } \varepsilon^2 = \frac{\Delta\eta^2}{\sigma_\eta^2} + \frac{\Delta\gamma^2}{\sigma_\gamma^2}.$$

Таким чином, поверхня рівної ймовірності відхилення істинних координат об'єктів від центру строба є еліпс, величина і орієнтація спряжених півосей якого залежить від помилок вимірювання швидкості руху руки стрілка і напрямку вектора руху плями.

При розподілі відхилень дійсних координат від центру строба по закону еліпса, очевидно, і сам строб повинен мати форму еліпса з спряженими півосями $\varepsilon\sigma_\eta$, $\varepsilon\sigma_\gamma$, де в даному випадку розуміється як коефіцієнт збільшення розмірів строба в порівнянні з розмірами одиничного еліпса для забезпечення заданої ймовірності попадання в строб істинних координат.

Ймовірність влучення випадкової точки в еліпс розсіювання, розташований подібно еліпсам рівної ймовірності, визначається з виразу

$$P(\varepsilon) = 2 \left[\Phi_0(\varepsilon) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) \right], \quad (4.21)$$

$$\text{де } \Phi_0(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\varepsilon \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

При $\varepsilon \geq 3,5$ ймовірність $P(\varepsilon)$ близька до одиниці. Саме такі значення ε і необхідно вибирати при формуванні еліпсоподібного строба.

Зазначимо, що формування еліпсоподібних стробів практично неможливе ні при фізичному, ні при математичному стробуванні. Більш кращим варіантом буде формування строба у вигляді прямокутника, описаного навколо еліпса сумарних помилок (див. рис. 4.3). Розміри сторін

прямокутника дорівнюють відповідно $2\varepsilon\sigma_\eta$, $2\varepsilon\sigma_\gamma$, а його площа визначається формулою $S_n = 4\varepsilon^2\sigma_\eta\sigma_\gamma$.

Якщо врахувати, що площа еліпса сумарних помилок $S_s = \pi\varepsilon^2\sigma_\eta\sigma_\gamma$, то виходить збільшення об'єму строба в порівнянні з оптимальним приблизно в 1,27 рази. Це призводить до збільшення ймовірності попадання в строб помилкових координат або координат, що належать іншим траєкторіям, і, отже, до погіршення селектуючої і роздільної здатності операції стробування. Але таке збільшення розміру являється незначним та задля збільшення швидкодії алгоритму ним можна знехтувати.

При обробці великої кількості об'єктів на зображенні в реальному масштабі часу на ПК з обмеженою продуктивністю, задача розрахунку розмірів і орієнтації сторін стробів-паралелограмів буде нераціональною з точки зору використання можливостей процесора. В цьому випадку слід переходити до спрощеного варіанту стробування, смисл якого зводиться до наступного. Форма строба вибирається найпростішою для завдання в тій системі координат, в якій здійснюється обробка інформації. Розміри строба вибираються такими, щоб в ньому вільно розташовувався і обертався в будь-якому напрямку еліпс максимально можливих (при всіх напрямках руху цілі) сумарних відхилень істинних відміток від відповідних екстрапольованих точок.

4.3 Аналіз ефективності розроблених методів обробки зображень МСТ

Запропонований комплексний метод обробки зображень був реалізований і протестований з використанням МСТ кафедри «Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем» Харківського національного університету радіоелектроніки.

На рисунку 4.4 представлені результати модельного експерименту для вихідного зображення розміром 800x600 пікселей та корисного сигналу у

вигляді білого кола розміром 10 мм. В даному експерименті формувалася відеосюжет з ростовою мішенню, що рухалася по діагоналі на протязі 300 кадрів при швидкості 30 к/с. Кожні 10 кадрів у випадковому місці на зображенні з'являлася відмітка цілі, котру досліджувані алгоритми повинні були розпізнати. Зображення було спотворене адитивним шумом з розподілом Пуассона. Досліджувалася середня похибка вимірювань при різних співвідношеннях сигнал/шум лише у разі правильного виявлення. Похибки вимірювання виражені у міліметрах. В експерименті використовувалися наступні методи: 1 – узгоджена фільтрація, 2 – покадрове віднімання, 3 – кореляційна обробка, 4 – метод моментів, 5 – синтезований комплексний метод обробки.

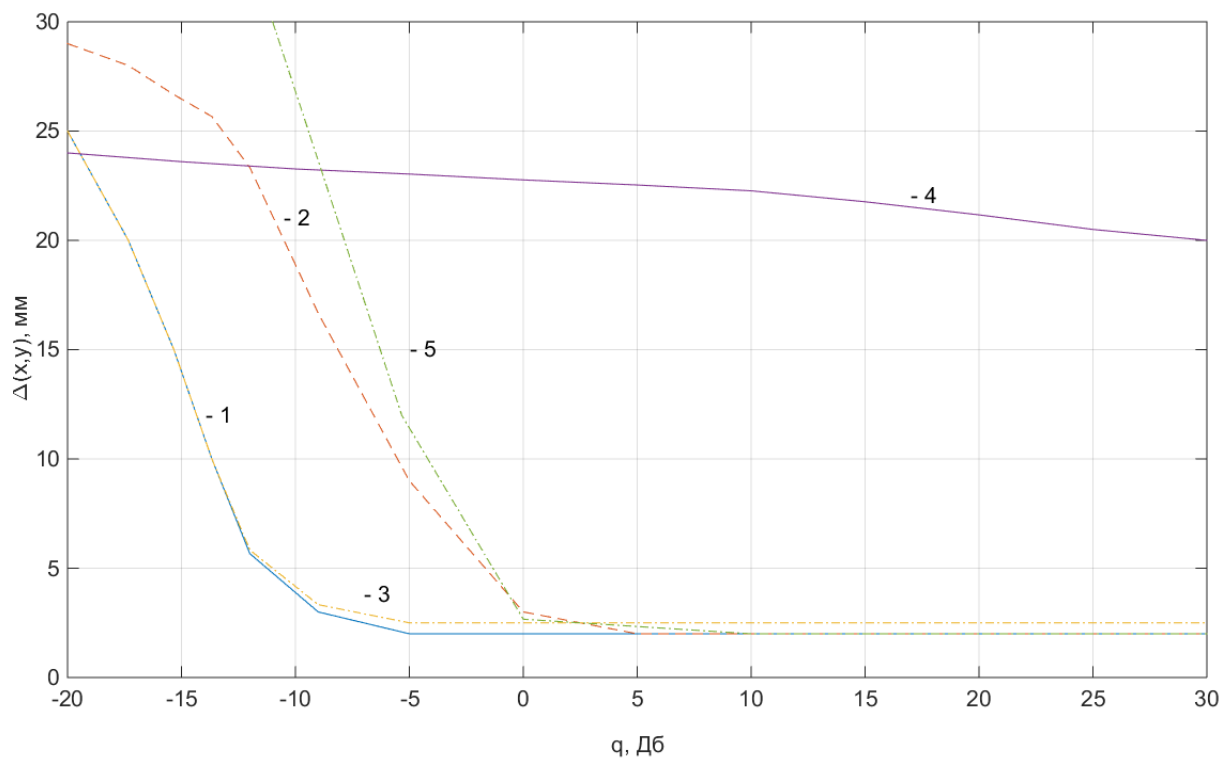


Рисунок 4.4 – Залежність похибки вимірювань координат від відношення сигнал/шум

Кореляційна обробка та покадрове віднімання мають майже ідентичні результати. Узгоджена фільтрація та синтезований комплексний метод мають

гірші показники точності вимірювання при збільшенні рівня шуму. Найгірші результати у методу моментів.

На рисунку 4.5 показана залежність ймовірності правильного виявлення від відношення сигнал/шум.

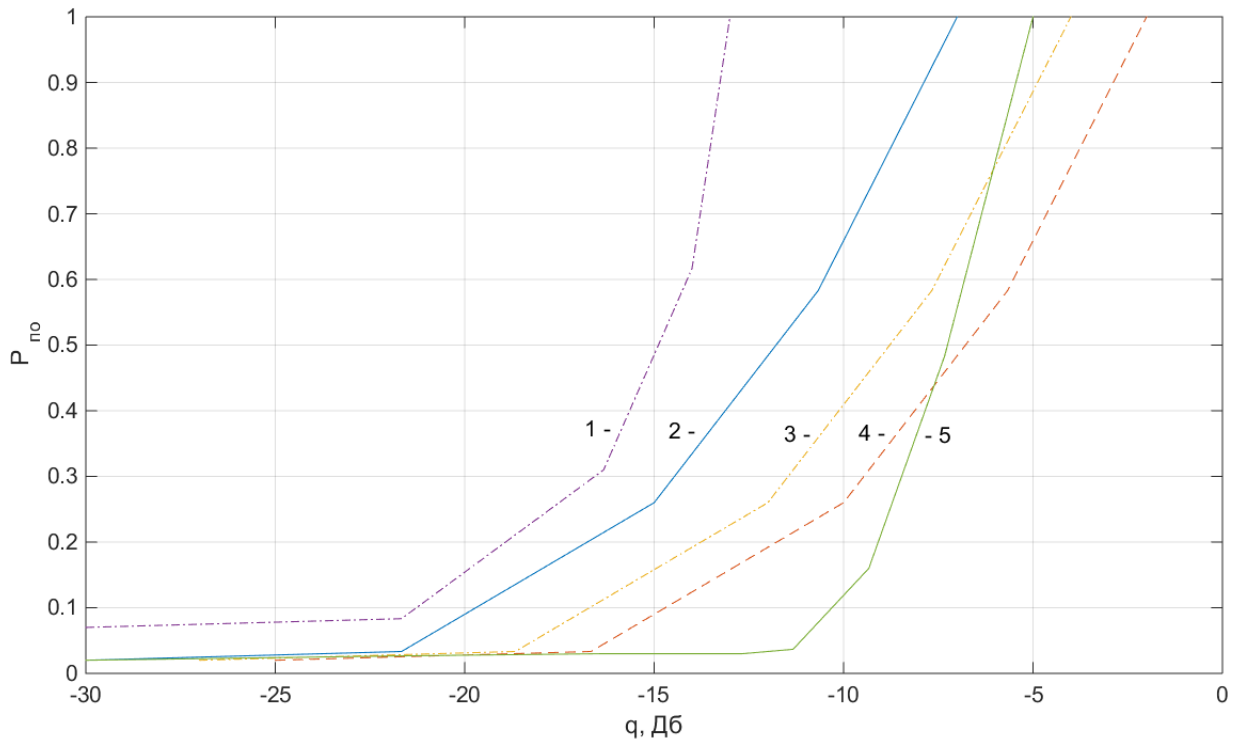


Рисунок 4.5 – Ймовірність правильного визначення в залежності від відношення сигнал/шум

Як видно, синтезований метод має один з найбільших рівнів сигнал/шум $q = -5$ дБ, за яким ймовірність правильного визначення буде наближатися до максимуму. Такі показники обумовлені тим, що метод контурного аналізу чутливий до деформації форми об'єктів, котре спричинюється шумом. Для мінімізації впливу шумової складової виконується згладжування зображення, але надмірне згладжування може призвести до втрати дрібної деталізації. Також, високий рівень шуму для кульових отворів та відміток від лазерного променя спричинює формування розімкнутих контурів, які відсіюються на етапі постобробки. Однак, виходячи з умов конструювання стрілецьких тренажерів з розділу 2, шумова

складова не буде проблемою при правильному виборі освітлення та відеокамери.

Наступний експеримент полягав у виявленні спроможності досліджуваних алгоритмів працювати за умови динамічного фону. У якості тестового відеосюжету використовувалася сцена створена за допомогою фракталів (множини Жюліа) (рис. 4.6). Корисний сигнал у вигляді білого кола розміром 10 мм кожні 10 кадрів, 300 кадрів при швидкості 30 к/с.

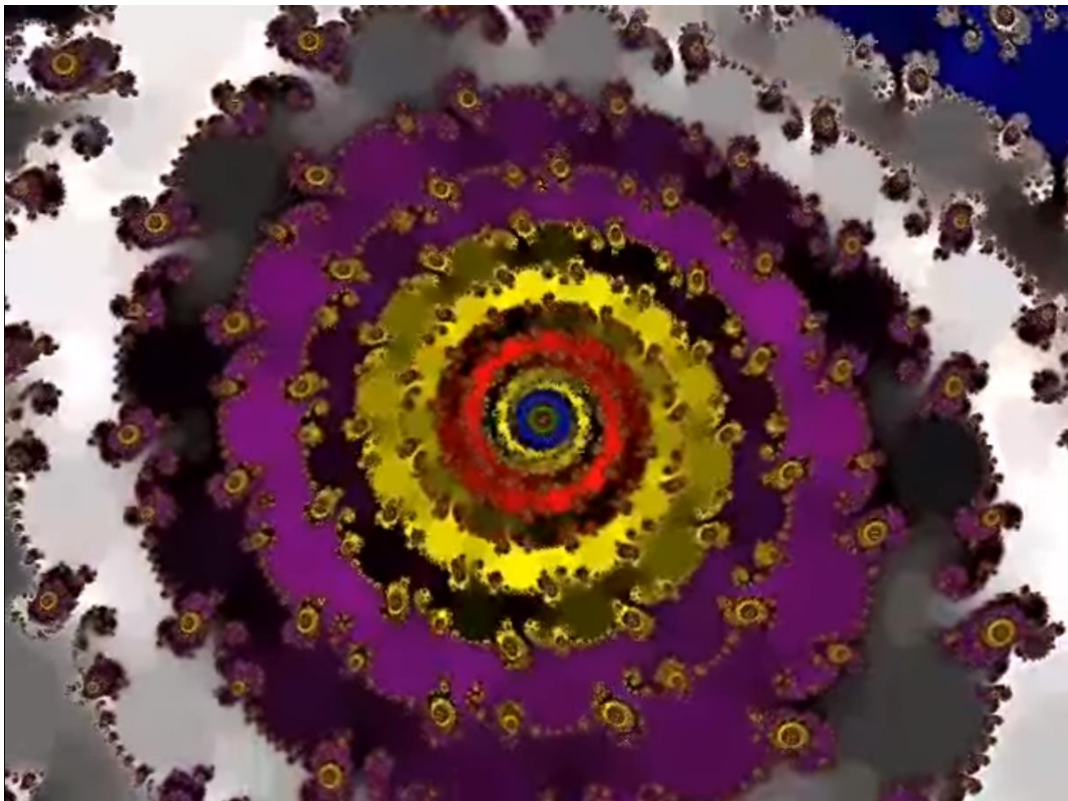


Рисунок 4.6 – Фрагмент тестової анімації

Для даної сцени розраховувалась кількість виявлених відміток та кількість правильних виявлень серед них.

1. Узгоджена фільтрація: 72 виявлено, 13 правильних.
2. Покадрове віднімання: 235 виявлено, 3 правильних.
3. Кореляційна обробка: 66 виявлено, 20 правильних.
4. Метод моментів: 113 виявлено, 24 правильних.
5. Синтезований метод обробки: 34 виявлено, 29 правильних.

Як видно, синтезований метод обробки має кращі характеристики виявлення за умови фону, що швидко змінюється, тоді як інші методи мають багато хибних спрацьовувань.

Для методу слідкування за траєкторією прицілювання було виконано дослідження його швидкодії. На проєкційному екрані тренажера було виведено статичне тестове зображення. У якості корисного сигналу використовувалась зброя з лазерною насадкою. На рис. 4.7 представлено ділянку сформованого строба.

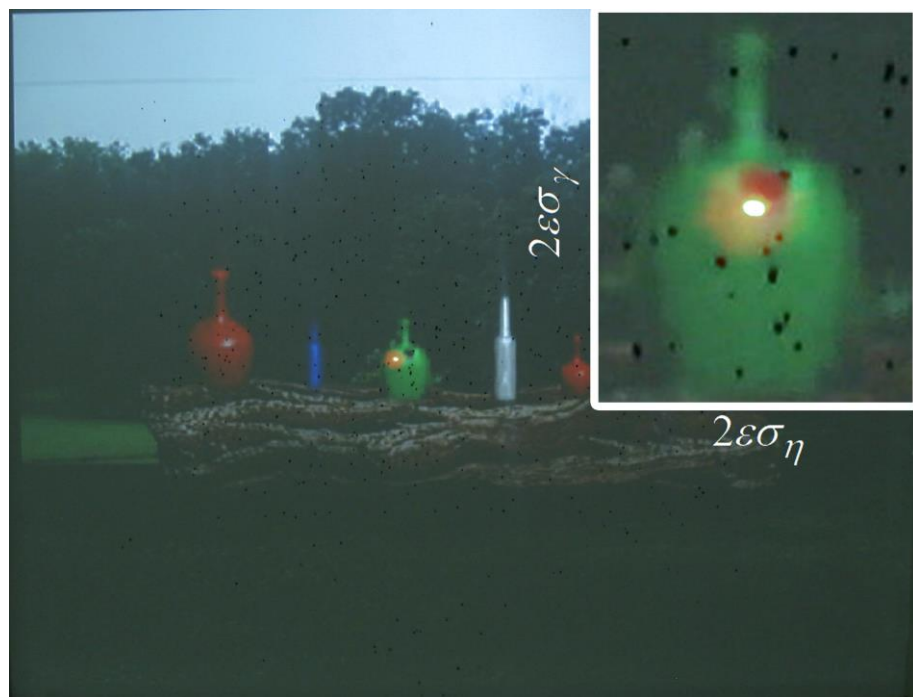


Рисунок 4.7 – Стробована ділянка на фоні повного зображення, отримана з відеокамери

Синтезований комплексний метод обробки зображень МСТ був доповнений описаною в роботі процедурою стробування об'єктів, а задача експерименту полягала в порівнянні показників швидкодії системи обробки зображень МСТ для різних систем та при розрахунках або на центральному процесорі, або на графічному. Результати експерименту представлені в табл. 4.1. В експерименті використовувалися: центральний процесор ЦПІ – Intel

Celeron-847 (2x1.1 ГГц), ЦП2 – Intel i7-3770K (4x3.5 ГГц), ГП1 – Nvidia GeForce GT480, ГП2 – Nvidia GeForce GT640. Вимірювання проводилися при незмінному розмірі випромінюваної світлової плями і постійної швидкості її переміщення.

Таблиця 4.1 – Швидкодія методу в залежності від розміру стробу

Розмір стробу	Час виконання методу виявлення координат, мс			
	ЦП1	ЦП2	ГП1	ГП2
64x64	26.52	2.87	1.89	0.95
128x128	40.01	3.45	2.67	1.73
256x256	67.90	6.72	3.87	2.21
512x512	100.51	10.55	7.56	3.98
768x768	112.88	13.32	10.13	6.32
1024x1024	124.13	16.89	13.11	8.06
1280x1280	144.05	21.56	15.24	10.99
1600x1600	160.12	28.13	20.31	12.48
2048x2048	180.34	33.26	25.74	14.07

Сутність методу стробування у зменшенні розміру оброблюваного зображення до розміру обчислюваного стробу. Наприклад, у тому разі, коли алгоритм виявлення проводить обробку зображення 1024x1024, то ЦП1 обробить його за 124,13 мс. Але якщо застосувати алгоритм стробування, то розмір стробу при прицілюванні може бути 128x128 і таке зображення ЦП1 обробить за 40,01 мс при тому ж вихідному зображенні з камери. З таблиці видно, що вигреш у швидкодії може становити від 86,6% до 93,2% в залежності від обраного центрального або графічного процесору.

Як видно, використання операції стробування дозволяє істотно підвищити показник швидкодії мультимедійних стрілецьких тренажерів. Особливо суттєвий приріст швидкодії при використанні камери з високою роздільною здатністю.

Висновки по розділу 4

Основні результати досліджень, що викладені у розділі 4, опубліковані в роботах [10, 16].

1. Запропоновано метод обробки зображень в МСТ з використанням методу слідкування за процесом прицілювання, якій складається з двох етапів: екстраполяції положення лазерної плями та стробування зони вимірювання. На етапі екстраполяції траєкторію руху лазерного променя по двом координатам $s_x(\mathcal{Q}_x, t)$ і $s_y(\mathcal{Q}_y, t)$ доцільно представляти поліномами першого ступеня.

2. Стробування рухомих об'єктів дозволяє зменшити розмір оброблюваних зображень на наступному кадрі, після того як алгоритм обробки виявив корисний сигнал на зображенні. Запропоновано формування строба у вигляді прямокутника, описаного навколо еліпса сумарних помилок. Розміри сторін прямокутника дорівнюють відповідно $2\varepsilon\sigma_\eta$, $2\varepsilon\sigma_\xi$, а його площа визначається формулою $S_n = 4\varepsilon^2\sigma_\eta\sigma_\xi$. Швидкодія алгоритмів обробки зображень, що застосовуються в МСТ, безпосередньо залежить від роздільної здатності зображення, одержуваного з камери: при збільшенні роздільної здатності, збільшується час, необхідний для обробки одного кадру.

3. Правильно сформований строб дозволяє підвищити ймовірність правильного виявлення корисного сигналу робочим алгоритмом внаслідок зменшення зони пошуку і зменшити ймовірність хибної тривоги, оскільки зменшується кількість хибних об'єктів на зображенні, сформованих шумами камери і неоднорідним фоном в відеосюжетах МСТ. Найбільш можливий вигравш у швидкодії, в залежності від використовуваного процесору, знаходиться в межах від 86,6% до 93,2%.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача підвищення ефективності функціонування МСТ шляхом розробки і дослідження методів і алгоритмів розпізнавання образів геометричних і кінематичних характеристик об'єктів на проекційному екрані МСТ при використанні неоднорідних динамічних сцен.

Основні результати:

1. Проаналізовано і досліджено функціонування МСТ в двох режимах роботи: з лазерним імітатором і з використанням бойової зброї; вибрано математичні моделі корисних сигналів, внутрішніх шумів і завад, сформовані вимоги до точності вимірювань кульових утворень і характеристик правильного виявлення сигналів;
2. Вперше методом теорії статистичних рішень синтезовано оптимальний алгоритм виявлення корисного сигналу на зображенні для двох режимів роботи МСТ: з лазерними імітаторами та при використанні бойової зброї;
3. Вперше синтезовано оптимальний за критерієм максимуму правдоподібності метод оцінювання просторових координат кульових утворень і відміток лазерного променя на зображенні проекційного екрана МСТ;
4. Синтезовано оптимальний алгоритм виявлення пачки квантованих сигналів з використанням ймовірнісних гіпотез і функцій правдоподібності. Для вирішального алгоритму вирішення цього питання зводиться до перевірки гіпотези H_0 про відсутність корисного сигналу проти альтернативної гіпотези H_1 про його наявність, тобто до утворення відношення правдоподібності і порівняння цього відношення з деяким значенням порогу l_0 , вибраним виходячи з апіорної ймовірності наявності

сигналу і втрат, приписуваних помилковим рішенням, або виходячи з допустимої ймовірності помилкового виявлення.

5. Запропоновано використання методу контурного аналізу зображень для попередньої фільтрації фону з кадрів відеопотоку, отриманого з відеокамери МСТ. У якості детекторів контуру використовується узгоджено-вибірковий фільтр. Основна відмінність УВФ від оптимальних фільтрів полягає в тому, що для визначення його структури немає необхідності в апріорній інформації про конкретні зображення фону навколо об'єкту. Це дає змогу проводити фільтрацію фону, що швидко змінюється. Даний фільтр узгоджений з поведінкою енергетичного спектра фону тільки в області середніх і високих просторових частот, так як низькочастотна складова для задачі виявлення контурів являє надлишкову інформацію. Реалізація УВФ на практиці зводиться до обчислення ступеня схожості аналізованої сцени F з контуром виявленого об'єкту.

6. У якості постобробки контурного зображення використовується алгоритм заливки замкнутих контурів та операції математичної морфології. Дані операції фільтрують зайві контури, залишаючи лише ті контури, які мають замкнуту форму. Вважаючи те, що алгоритм УВФ має максимальну ймовірність отримання замкнутих контурів для дрібних об'єктів, до алгоритму виявлення будуть надходити лише такі зображення, на яких залишаться лише ймовірні кульові отвори або відмітка від лазерної плями.

7. Запропоновано метод обробки зображень в МСТ з використанням алгоритму слідкування за процесом прицілювання, якій складається з двох етапів: екстраполяції положення лазерної плями та стробування зони вимірювання. На етапі екстраполяції траєкторію руху лазерного променя по двом координатам $s_x(\mathcal{G}_x, t)$ і $s_y(\mathcal{G}_y, t)$ доцільно представляти поліномами першої степені.

8. Стробування рухомих об'єктів дозволяє зменшити розмір оброблюваних зображень на наступному кадрі, після того як алгоритм

обробки виявив корисний сигнал на зображенні. Запропоновано формування строба у вигляді прямокутника, описаного навколо еліпса сумарних помилок. Розміри сторін прямокутника дорівнюють відповідно $2\varepsilon\sigma_\eta$, $2\varepsilon\sigma_\xi$, а його площа визначається формулою $S_n = 4\varepsilon^2\sigma_\eta\sigma_\xi$. Швидкодія алгоритмів обробки зображень, що застосовуються в МСТ, безпосередньо залежить від роздільної здатності зображення, одержуваного з камери: при збільшенні роздільної здатності, збільшується час, необхідний для обробки одного кадру

9. Метод стробування може бути використаний спільно з будь-якими іншими відомими алгоритмами виявлення для збільшення ефективності системи розпізнавання образів. Правильно сформований строб дозволяє підвищити ймовірність правильного виявлення корисного сигналу робочим алгоритмом внаслідок зменшення зони пошуку і зменшити ймовірність хибної тривоги, оскільки зменшується кількість хибних об'єктів на зображенні, сформованих шумами камери і неоднорідним фоном в відеосюжетах МСТ. Найбільш можливий виграш у швидкодії, в залежності від використовуваного процесору, знаходиться в межах від 86,6% до 93,2%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляєв О.В., Сідоров Г.І., Карташов В.М. Мультимедійні тренажери. *I Науково-практична конференція «Сучасні технології кіно»* : тези доп. (м. Шахтарськ, 2013 р.). Шахтарськ : Шахтарський кінотехнікум, 2013. С. 25-33.
2. Grzegorz D., Aleksandra E. Multimedia Training Systems for Education and Industry. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2000. Vol. 44. №27. p. 419.
3. Беляєв А.В., Карташов В.М., Корытцев И.В., Сидоров Г.И., Сидоров Я.Г. Универсальный мультимедийный стрелковый тренажер для подготовки силовых структур. *Науково-технологічне забезпечення оборонно-промислового комплексу України* : зб. матеріалів інформаційно-комунікативного заходу, Київ, 2014. С. 30-34.
4. Беляєв А.В., Карташов В.М., Сидоров Г.И. Лазерный стрелковый тренажер для подготовки снайперов *Науково-технологічне забезпечення оборонно-промислового комплексу України* : зб. матеріалів інформаційно-комунікативного заходу, Київ, 2014. С. 35-38.
5. Беляєв О.В., Карташов В.М. Виявлення об'єктів заданої форми та визначення їх координат на зображенні мультимедійного стрілецького тренажеру. *Системи обробки інформації* : зб. наук. пр. Харків, 2015. № 10. С. 16–21.
6. Карташов В.М., Беляєв О.В. Виявлення об'єктів заданої форми та визначення їх координат на зображенні мультимедійного стрілецького тренажеру. *Радіотехніка* : зб. наук. пр. Харків, 2015. № 182. С. 58-64.
7. Беляєв А.В., Карташов В.М. Моделі сигналів в універсальному мультимедійному стрілецькому тренажері. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 44. С. 23-29.
8. Беляєв О.В., Зубков О.В., Карташов В.М. Застосування методу контурного аналізу зображень в системі обробки мультимедійного

стрілецького тренажеру. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 20(1242). С. 109-118.

9. Беляєв О.В., Зубков О.В., Тарасов К.С., Карташов В.М. Обробка сигналів в універсальному мультимедійному стрілецькому тренажері. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 16(1238). С. 23-29.

10. Bieliaiev, O., Kartashov, V., Loutouangou, F. Strobing the moving objects marks in the image processing system with stationary video camera. *Science Rise*. 2017. №3. pp. 66–71.

11. Пат. № 80324 UA. Удосконалений електронний лазерний стрілецький тренажер. МПК F41G3/26 / Карташов В. М., Сідоров Г. І., Беляєв О. В.; заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u201213148; заявл. 19.01.2013; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10.

12. Пат. № 83387 UA. Удосконалений електронний лазерний стрілецький тренажер. МПК F41G3/26 / Сліпченко М. І., Карташов В. М., Сідоров Г. І., Беляєв О. В.; заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u201301988; заявл. 18.02.2013; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.

13. Беляєв А.В., Сідоров Г.И. Метод имитации стрельбы из огнестрельного оружия в лазерном стрелковом тренажере. *17-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 22-24 квітня 2013 р.). Харків : ХНУРЕ, 2013. С. 104-105.

14. Беляєв А.В., Сідоров Г.И. Метод определения координат точки попадания лазерного луча в электронную мишень лазерного стрелкового тренажера. *18-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 14-16 квітня 2014 р.). Харків : ХНУРЕ, 2014. С. 99-100.

15. Беляев А.В., Карташов В.М. Обнаружение объектов на изображении и измерение их координат. *19-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тезисы доп. (м. Харків, 20-22 квітня 2015 р.). Харків : ХНУРЕ, 2015. С. 24-25.

16. Беляев А.В., Карташов В.М. Предварительная обработка сигналов и изображений в мультимедийном стрелковом тренажере. *20-й юбилейный международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тезисы доп. (м. Харків, 19-21 квітня 2016 р.). Харків : ХНУРЕ, 2016. С. 24-25.

17. Беляев А.В., Карташов В.М. Предварительная фильтрация изображений в алгоритмах обработки информации мультимедийного стрелкового тренажера. *70-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів* : тезисы доп. (м. Одеса, 1-3 грудня 2015 р.). Одеса : ОНАЗ, 2015. С. 9-12.

18. Карташов В.М., Беляев А.В. Задача обнаружения объектов заданной формы и определение их координат на изображении в мультимедийном стрелковом тренажере. *4-а Міжнародна науково-технічна конференція "Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних"* : тезисы доп. (м. Харків, 13-16 жовтня 2015 р.). Харків : ХПІ, 2015. С. 13.

19. Fulei Zhang. Significances of Multimedia Technologies Training. *Physics Procedia*. 2012. Vol. 33. pp. 2005-2010.

20. de Winter J.C., de Groot S., Mulder M., Wieringa P.A., Dankelman J., Mulder J.A. Relationships between driving simulator performance and driving test results. *Ergonomics*. 2009. №52(2). pp.137-153.

21. Volair Sim Flight Chassis. *Avsim* : сайт. URL: <https://www.avsim.com/home/reviews/hardware/volair-sim-flight-chassis-r1499/> (дата звернення: 15.02.2018).

22. Комплексные тренажеры экипажей танков Т-72 и Т-90. URL: http://simulator.ua/files/tp/t72-90_ru.pdf (дата звернення: 15.02.2018).

23. He Ning, Hou Quanchao, Hu Fuchao. Architecture Designing of Astronaut Onboard Training System Based on AR Technology. *Proceedings of International Conference on Soft Computing Techniques and Engineering Application*. 2013. pp. 257-262.

24. Bennett S., Reilly P. Using interactive multimedia to improve operator training at Queensland Alumina Limited. *Australian Journal of Educational Technology*. 1998. №14(2). pp. 75-87.

25. Nawrat A., Jędrasiak K., Ryt A., Sobel D. Multimedia Firearms Training System. *International Journal of Computer and Information Engineering*. 2016. Vol.10, №11. URL: <https://waset.org/publication/Multimedia-Firearms-Training-System/10005892> (дата звернення: 15.02.2018).

26. Исследование возможности создания оптико-электронного тренажера для биатлона и пулевой стрельбы. Тренажеры ОЭТ и СТБ-3. Львов: п/о «Полярон», 1987. 79 с.

27. Техническое описание и инструкция по эксплуатации электронно-лазерных тиров ЭЛТ-2, ЭЛТ-6. Львов: п/о «Полярон», 1983. 82 с.

28. Schavone M. Firearms training simulator simulating the recoil of a conventional firearm. US patent US7581954B2. 2001.

29. Takeda Nobuo, Niwa Shinya, Kumada Yoshihide, Watanuki Kazuhito. Shooting simulator, shooting game apparatus, and target device. JP patent 2003-006813. 2003.

30. Haptec, Inc. Method and apparatus for shooting simulator haptic system. JP patent 2017-547384. 2015.

31. Strange Trade Co., Ltd. Combined landing point flash device. JP patent 3173296. 2011.

32. Ceccaroni L. Frequency responsive light target. US patent US3918714A. 1975.

33. Giannetti C. Light operated target shooting systems. US patent US4048489A. 1977.

34. McFarland R., Bradshaw S. Laser weapons simulation system. US patent US4063368A. 1977.
35. Kimble J. Dotson E. Small arms laser training device. US patent US4352665A. 1982.
36. Zaenglein W. Jr. Shooting simulating process and training device. US patent US5194006A. 1993.
37. Budmiger H. Anlage zum simulierten Schiessen. Switzerland patent №612004. 1979.
38. Marshall A., McCormack R., Purvis E., Wolff R., Towle H. Marksmanship expert trainer. US patent US4923402A. 1990.
39. Zaenglein W. Jr. Shooting simulating process and training device using a virtual reality display screen. US patent US5641288A. 1997.
40. Timander K., Johansson U. Device to determine, indicate and record aim of object. US patent US4452458A. 1981.
41. Fritz K. In our defense. *texture*. 2012. URL: http://fritzcomm.com/Clips/024-27%20Feature-Defense_LR.pdf (дата звернення: 15.02.2018).
42. Laser Shot Simulations. *Laser Shot, Inc.* : сайт. URL: <https://www.lasershot.com> (дата звернення: 15.02.2018).
43. Chenkuan Liu, Songhua Mao. Technical analysis of air rifle shooting in elite shooters. *18 International Symposium on Biomechanics in Sports*. 2000.
44. Noptel company profile. *Noptel Oy* : сайт. URL: <http://www.noptel.com/> (дата звернення: 15.02.2018).
45. Kiploks J., Knoks M., Vjaters J. The Field Shooting Simulator New Development. *Security and protection*. 2016. URL: https://www.rtu.lv/writable/public_files/RTU_j_kiploks_m_knoks_the_field_shooting_simulator_new_development.pdf (дата звернення: 15.02.2018).
46. Пат. № 59467 UA. Електронний лазерний стрілецький тренажер. МПК F41G3/26 / Зубков О. В., Коритцев І. В., Олейніков В. М., Сідоров Г. І., Кондрашов Є. В.; заявник та патентовласник Харківський національний

університет радіоелектроніки. – № u201015833; заявл. 28.12.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.

47. Fredericks D. E. Acoustic targeting system for off-axis firing. *US army armament research and development command*. 1981. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a108448.pdf> (дата звернення: 15.02.2018).

48. Пат. № 92312 UA. Лазерний стрілецький тренажер. МПК F41G3/26 / Бродецький Ф. А., Карташов В. М., Олейніков В. М., Сідоров Г. І.; заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u201402633; заявл. 17.03.2014; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.

49. Физика. Часть 2. Оптика и волны / Перевод с английского под ред. А. С.Ахматова. М.: Наука, 1973. 300 с.

50. Jacques S. Firearm simulation equipment for training purposes – emits light beam reflected by target onto receiver connected to impulse counter. French patent FR2337872A1. 1977.

51. Marshall A. Laser system for weapon fire simulation. US patent US3898747A. 1975.

52. Лазерный тир «Рубин». *Лазерные технологии: научно-технический центр* : сайт. URL: <http://www.lasertools.ru> (дата звернення: 15.02.2018).

53. Мультимедийный тир «Ингул». *ООО «Герц»* : сайт. URL: <http://www.gerts.shtorm.com> (дата звернення: 15.02.2018).

54. ИСТ-Механика. *EAST Интерактивные стрелковые тренажеры* : сайт. URL: <http://www.east-tir.ru/index.php> (дата звернення: 15.02.2018).

55. Пат. № 109927 UA. Електронний модульний тренажер стрілецький. МПК F41G3/26 / Семиглазов В. В., Семиглазов В. В., Рибченко С. М., Удачин А. А.; заявник та патентовласник Товариство з Обмеженою Відповідальністю «Науково-виробниче підприємство «Параллакс». – № u201606824; заявл. 22.06.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.

56. Martono K.T., Nurhayati O.D., Wulwida C.G. Augmented reality – based shooting simulator system to analysis of virtual distance to real distance

using unity 3d. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*. 2017. Vol. 95. № 23. pp. 6359-6368.

57. The ST-2 Simulator. *Marksman Training Systems* : сайт. URL: https://www.marksman.se/images/pdf/Brochure/BROCHURE_20161103.pdf (дата звернення: 15.02.2018).

58. Soares E., Corazza S., Piovesan A., Azevedo R., Vasconcellos S. Creation, validation, and reliability of a shooting simulator instrument for reaction time evaluation. *Motriz: Revista de Educação Física*. 2016. Vol. 22. №4. pp. 277-282.

59. Blancher P. Device for training in rifle shooting. French patent FR2414185A1. 1980.

60. PlayStation VR Aim Controller. *Sony Interactive Entertainment LLC* : сайт. URL: <https://www.playstation.com/en-us/explore/accessories/playstation-vr-aim-controller/> (дата звернення: 15.02.2018).

61. Hendry J., King P. Target trainer. US patent US4824374A. 1989.

62. Marshall A., Shaw B., Towle H., Riordan T., Siragusa G. Electro-optic infantry weapons trainer. US patent US4336018A. 1982.

63. PM Shooter. URL: <http://www.pms shooter.pl> (дата звернення: 15.02.2018).

64. Пат. № 95007 UA. Спосіб визначення координат точки влучення кулі у відеомішень при навчанні стрільби та пристрій для його здійснення. МПК F41G3/26 / Зубков О.В., Коритцев І.В., Сидоров Г.І., Сидоров Я.Г.; заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № а200912569; заявл. 04.04.2009; опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

65. Яншин В.В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. М.: Машиностроение. 1994. 112 с.

66. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. Перевод с английского. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 928 с.

67. Papageorgiou C., Poggio T. A Trainable System for Object Detection. *International Journal of Computer Vision*. 2000. Vol. 38. №1. pp. 15-33.
68. Zhouwen Tu. Parsing Unifying Segmentation, Detection, and Recognition. *Computer Vision*. 2003.
69. Schneiderman H., Kanade T. Object Detection Using the Statistics of Parts. *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 56. №3. pp. 151-177.
70. Cipolla R. *Computer Vision, Detection, Recognition and Reconstruction*. Berlin, Germany: Springer, 2010. 350 p.
71. Hotelling, H. Relations between two sets of variants (Canonical Correlation Analysis). *Biometrika*. 1936. №28, pp. 321-377.
72. Фурман Я. А., Юрьев А. Н., Яншин В. В. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. 248 с.
73. Параллельные методы и средства распознавания образов. Том 2. / Под ред. А.Н.Свенсона. Киев.: Наук. думка, 1985. 280с.
74. Сабельников П.Ю. Вычисление и использование моментов бинарных изображений при геометрическом сравнении объектов. *Искусственный интеллект*. 2013. №3. с. 223-232.
75. Настанова зі стрілецької справи. 7,62-мм кулемети Калашнікова, ПК, ПКМ, ПКС, ПКМС, ПКБ, ПКМБ і ПКТ. Київ. 2003 р. 153 с.
76. Настанова зі стрілецької справи. 7,62-мм снайперська гвинтівка Драгунова (СГД). Київ. 2006 р. 95 с.
77. Настанова зі стрілецької справи. 9-мм пістолет Макарова (ПМ). Київ. 2004 р. 64 с.
78. Про затвердження Курсу стрільб для поліцейських та норм витрат боєприпасів, пострілів, вибухових пакетів і гранат. Наказ НПУ №900 від 20.09.2016.
79. Правила по стрельбе из пистолета. *Международная Федерация Стрелкового Спорта* : сайт. URL: <http://www.shooting->

ukraine.com/files/documents/doc_12-31_rules_pistol_2017.pdf (дата звернення: 15.02.2018).

80. Правила проведения соревнований по стрельбе из винтовки. *Международная Федерация Стрелкового Спорта* : сайт. URL: http://www.shooting-ukraine.com/files/documents/doc_12-31_rules_rifle_2017.pdf (дата звернення: 15.02.2018).

81. Палагута Л., Косик С. Тренажеры, средства имитации и моделирования боевых действий сухопутных войск США. *Зарубежное военное обозрение*. 1993. №4. с. 31-36.

82. Веркиенко А. Ю. Точность измерений в тренажере. *Сб. трудов научно-молодежной школы по ФЦП "Интеграция"*. 1997. с.74-78.

83. Корнилов И.Г. Результаты испытаний стрелкового тренажера на точность измерения координат точек попадания (наведения). *Труды НТК «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства»*. 2006. с. 84-89.

84. Пресняков Ю.П. Использование спекл-эффекта для анализа колебаний шероховатой поверхности. *Журнал технической физики*. 1997. Том 67. №8. с. 71-75.

85. Dainty J.C. Laser Speckle and Related Phenomena. *Applied Physics*. 1975. Vol.9. pp. 123-286.

86. Власов Н.Г., Кулиш С.М., Штанько А.Е. Устранение спекл-шума в интерференционных измерениях на основе нелинейной цифровой обработки. *Естественные и технические науки*. 2008. № 6.

87. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.

88. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П. Теория оптических систем. Учебное пособие для втузов. М.: Машиностроение, 1973. 488 с.

89. Корнилов И.Г., Казаков В.С. Модели лазерного пятна датчика координат стрелкового тренажера. *Материалы межд. НТК, посвященной 50-летию ИжГТУ, Ч.5*. 2002. с.82-85.

90. Короленко П.В. Оптика когерентного излучения. Учебное пособие. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 1997. 222 с.
91. Голік В. П. Навчальний посібник з дисципліни «Вогнева підготовка». *Національна академія оборони, Кафедра підготовки офіцерів запасу*. URL: studopedia.org/7-14411.html (дата звернення: 15.02.2018).
92. Keelan B., Cookingham R. Handbook of Image Quality. United States, NY: Marcel Dekker, Inc. 2002. 797 p.
93. Jayant R. Survey on various noises and techniques for denoising the color image. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*. 2015. №2.
94. Heintzmann R., Relich P., Nieuwenhuizen R., Lidke K. Calibrating photon counts from a single image. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.05654.pdf> (дата звернення: 15.02.2018).
95. Gardner D. Characterizing digital cameras with photon transfer curve. URL: http://www.couriertronics.com/docs/notes/cameras_application_notes/Photon_Transfer_Curve_Characterization_Method.pdf (дата звернення: 15.02.2018).
96. Guidash M., Ma J., Vogelsang T., Endsley J. Reduction of CMOS Image Sensor Read Noise to Enable Photon Counting. *Sensors. MDPI*. 2016. №16.
97. Mohammadnejad S., Roshani S., Nasiri M. Fixed Pattern Noise Reduction Method in CCD Sensors for LEO Satellite Applications. *Telecommunications (ConTEL)*. 2011.
98. Авдеев В. П. Тирь и стрельбища. М.: ДОСААФ, 1977. 111 с.
99. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы. М: Высшая школа, 1988. 369 с.
100. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М: Радио и связь, 1983. 320 с.
101. Полляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. М.: Советское радио, 1971. 400 с.

102. Elachi C, Bicknell T., Jarden R.L., Chialin W. Spaceborne Synthetic aperture Images Reader's applications. Techniques and Technology. *Proceedings of the IEEE*. 1982. Vol. 70. № 10. pp. 78-82.

103. Бакут П.А., Колмогоров Г.С. Сегментация изображений: Методы выделения границ областей. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1987. № 10. с.25.

104. Василенко Г.И. Голографическое опознавание образов. М: Сов. радио, 1977. 328 с.

105. Сергеев Г.А., Янутш Д.А. Статистические методы исследования природных объектов. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 300 с.

106. Лебедев Д.С., Цуккерман И.И. Телевидение и теория информации. М Сов радио, 1974. 220 с.

107. Лезин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. М. Сов. радио, 1969. 320 с.

108. Пугачев В.С., Сеницын И.Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. М.: Наука, 1990. 632 с.

109. Д.Форсайт, Ж.Понс. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.

110. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.

111. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974 г. 432 с.

112. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. М.: Советское радио, 1967. 400 с.

113. Эскобал П. Методы определения орбит. М.: Мир, 1970. 476 с.

114. Шапиро И. Расчет траекторий баллистических снарядов по данным радиолокационных измерений. М.: Изд-во Иностранная Литература, 1961. 317 с.

115. Абезгауз Г.Г. Справочник по вероятностным расчетам. М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1970. 536 с.

Додаток А

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

Затверджую

Проректор ХНУРЕ з НМР

д.т.н., проф. Рубан І.В.



Акт впровадження

Комісія у складі: голова – професор кафедри МІРЕС, к.т.н., проф. Олейніков В.М. і члени – професор кафедри МІРЕС, к.т.н. Сідоров Г.І., доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Шейко С.О., розглянувши матеріали дисертаційного дослідження ас. кафедри МІРЕС Беляєва О.В. «Удосконалення методів обробки сигналів та зображень у мультимедійних стрілецьких тренажерах», прийшла до висновку, що матеріали дисертаційної роботи, а саме:

- моделі сигналів та зображень для мультимедійних систем;
- методи обробки зображень із застосуванням методу контурного аналізу,

впроваджені в навчальний процес і будуть використовуватися в лекційних курсах та лабораторних роботах у рамках дисциплін «Цифрові технології мультимедіа» та «Цифрова обробка сигналів».

Голова комісії

проф. Олейніков В.М.

Члени комісії

проф. Сідоров Г.І.

доц. Шейко С.О.

Затверджую

Проректор ХНУРЕ з НМР
д.т.н., проф. Рубан І.В.

« 26 » 2018 р.



Акт впровадження

Комісія у складі: голова – професор кафедри МІРЕС, к.т.н., проф. Олейніков В.М. і члени - доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Шейко С.О., к.т.н., доцент кафедри МІРЕС Зубков О.В., розглянувши матеріали дисертаційного дослідження ас. кафедри МІРЕС Беляєва О.В. «Удосконалення методів обробки сигналів та зображень у мультимедійних стрілецьких тренажерах», прийшла до висновку, що матеріали дисертаційної роботи, а саме:

- оптимальний метод виявлення та вимірювання координат двійково-квантованих сигналів за умови апіорної невизначеності;
- алгоритм визначення координат із застосуванням бази вагових функцій, впроваджені в НДР №318, рег.номер 0117U002526, «Розроблення системи первинної обробки акустичних сигналів в умовах дії завад для содарів виявлення безпілотних літальних апаратів».

Голова комісії

 проф. Олейніков В.М.

Члени комісії

 доц. Шейко С.О.

 доц. Зубков О.В.

Затверджую

Проректор ХНУРЕ з НМР

д.т.н., проф. Рубан І.В.



«26» 02 2018 р.

Акт впровадження

Комісія у складі: голова – професор кафедри МІРЕС, к.т.н., проф. Олейніков В.М. і члени - доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Шейко С.О., к.т.н., доцент кафедри МІРЕС Зубков О.В., розглянувши матеріали дисертаційного дослідження ас. кафедри МІРЕС Беляєва О.В. «Удосконалення методів обробки сигналів та зображень у мультимедійних стрілецьких тренажерах», прийшла до висновку, що матеріали дисертаційної роботи, а саме:

- метод попередньої фільтрації зображень на основі узгоджено-вибіркових детекторів контуру;

- метод обробки зображень з використанням алгоритму стробування, впроваджені в НДР №312, рег.номер 011U002541, «Розробка нових інформаційно-вимірвальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку».

Голова комісії

проф. Олейніков В.М.

Члени комісії

доц. Шейко С.О.

доц. Зубков О.В.

ДОДАТОК Б

Список наукових праць за темою дисертації

1. Беляєв О.В., Карташов В.М. Виявлення об'єктів заданої форми та визначення їх координат на зображенні мультимедійного стрілецького тренажеру. *Системи обробки інформації* : зб. наук. пр. Харків, 2015. № 10. С. 16–21.
2. Bieliaiev, O., Kartashov, V., Loutouangou, F. Strobing the moving objects marks in the image processing system with stationary video camera // *Science Rise*. 2017. №3. pp. 66–71.
3. Карташов В.М., Беляєв О.В. Виявлення об'єктів заданої форми та визначення їх координат на зображенні мультимедійного стрілецького тренажеру. *Радіотехніка* : зб. наук. пр. Харків, 2015. № 182. С. 58-64.
4. Беляєв О.В., Зубков О.В., Карташов В.М. Застосування методу контурного аналізу зображень в системі обробки мультимедійного стрілецького тренажеру. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 20(1242). С. 109-118.
5. Беляєв О.В., Зубков О.В., Тарасов К.С., Карташов В.М. Обробка сигналів в універсальному мультимедійному стрілецькому тренажері. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 16(1238). С. 23-29.
6. Беляєв А.В., Карташов В.М. Моделі сигналів в універсальному мультимедійному стрілецькому тренажері. *ВІСНИК Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2017. № 44. С. 23-29.
7. Пат. № 80324 UA. Удосконалений електронний лазерний стрілецький тренажер. МПК F41G3/26 / Карташов В. М., Сідоров Г. І., Беляєв О. В.; заявник та патентовласник Харківський національний університет

радіоелектроніки. – № u201213148; заявл. 19.01.2013; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10.

8. Пат. № 83387 UA. Удосконалений електронний лазерний стрілецький тренажер. МПК F41G3/26 / Сліпченко М. І., Карташов В. М., Сідоров Г. І., Беляєв О. В.; заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u201301988; заявл. 18.02.2013; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.

9. Беляєв А.В., Карташов В.М., Корытцев И.В., Сидоров Г.И., Сидоров Я.Г. Универсальный мультимедийный стрелковый тренажер для подготовки силовых структур. *Науково-технологічне забезпечення оборонно-промислового комплексу України* : зб. матеріалів інформаційно-комунікативного заходу, Київ, 2014. С. 30-34.

10. Беляєв А.В., Карташов В.М., Сидоров Г.И. Лазерный стрелковый тренажер для подготовки снайперов *Науково-технологічне забезпечення оборонно-промислового комплексу України* : зб. матеріалів інформаційно-комунікативного заходу, Київ, 2014. С. 35-38.

11. Карташов В.М., Беляєв А.В. Задача обнаружения объектов заданной формы и определение их координат на изображении в мультимедийном стрелковом тренажере. *4-а Міжнародна науково-технічна конференція "Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних* : тези доп. (м. Харків, 13-16 жовтня 2015 р.). Харків : ХПІ, 2015. С. 13.

12. Беляєв А.В., Карташов В.М. Предварительная фильтрация изображений в алгоритмах обработки информации мультимедийного стрелкового тренажера. *70-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів* : тези доп. (м. Одеса, 1-3 грудня 2015 р.). Одеса : ОНАЗ, 2015. С. 9-12.

13. Беляєв О.В., Сідоров Г.І., Карташов В.М. Мультимедійні тренажери. *I Науково-практична конференція «Сучасні технології кіно»* : тези доп. (м. Шахтарськ, 2013 р.). Шахтарськ : Шахтарський кінотехнікум, 2013. С. 25-33.

14. Бе́ляев А.В., Си́доров Г.И. Метод имитации стрельбы из огнестрельного оружия в лазерном стрелковом тренажере. *17-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 22-24 квітня 2013 р.). Харків : ХНУРЕ, 2013. С. 104-105.

15. Бе́ляев А.В., Си́доров Г.И. Метод определения координат точки попадания лазерного луча в электронную мишень лазерного стрелкового тренажера. *18-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 14-16 квітня 2014 р.). Харків : ХНУРЕ, 2014. С. 99-100.

16. Бе́ляев А.В., Карташов В.М. Обнаружение объектов на изображении и измерение их координат. *19-й международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 20-22 квітня 2015 р.). Харків : ХНУРЕ, 2015. С. 24-25.

17. Бе́ляев А.В., Карташов В.М. Предварительная обработка сигналов и изображений в мультимедийном стрелковом тренажере. *20-й юбилейный международный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"* : тези доп. (м. Харків, 19-21 квітня 2016 р.). Харків : ХНУРЕ, 2016. С. 24-25.