

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

**АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Дослідження методів збільшення дальності тепловізійних систем  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ЕППм 18-1

Патров Д.О.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Стрілкова Т.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Бондаренко І.М.  
(прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)  
Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 171 «Електроніка»  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма «Електронні пристрої та системи»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Патрову Денису Олеговичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ»

затверджена наказом по університету від 04 листопада 2019 р. № 1635 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ грудня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

Діапазон робочих частот: від 6 ТГц до 430 ТГц

Діапазон робочих довжин хвиль: від 0,74 мкм до 50 мкм

Температурний діапазон від 0°C до 40°C

Діапазон вимірювання: від 25 см до 200 см

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1 Огляд тепловізійних систем

2 Основні характеристики па принцип дії тепловізійних систем

3 Методи збільшення дальності дії тепловізійних систем

4 Експериментальна частина

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Актуальність обраної теми

Методи підвищення дальності дії тепловізійних систем

Математичне обґрунтування дальності дії тепловізійних систем

Математичне обґрунтування вибору методу накопичення для збільшення дальності дії тепловізійних систем

Математичне моделювання методу накопичення кадрів

Експериментальні дослідження дальності дії тепловізійних систем

Висновки

Застосування

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел	04.11.19 – 05.11.19	Виконано
2	Дослідження	6.11.19 – 15.11.19	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик	16.11.19 – 18.11.19	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів	19.11.19	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	20.11.19 – 24.11.19	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	25.11.19 – 29.11.19	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	30.11.19 – 07.12.19	Виконано
8	Підготовка до захисту атестаційної роботи	08.12.19 – 16.12.19	Виконано

Дата видачі завдання 04 листопада 2019 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 73 с., 73 рис., 10 табл., 2 додатки, 32 джерела.

ТЕПЛОВІЗОР, ТЕПЛОВІЗІЙНА СИСТЕМА, ЗБІЛЬШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ, ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ІНФРАЧЕРВОНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії інфрачервоного випромінювання з елементами системи та середовищем.

Предмет дослідження – методи обробки сигналів в тепловізійних системах.

Мета роботи – підвищення дальності тепловізійних систем.

Метод дослідження – аналіз літератури, аналіз подібних конструкцій, комп'ютерне моделювання та проектування.

У дипломному проекті розглянуті типові тепловізійні системи їх основні характеристики та методи збільшення дальності дії тепловізійних систем.

## ABSTRACT

The explanatory note of the master's graduation project contains: 73 pages, 73 figures, 10 tables, 2 appendices, 32 sources.

THERMAL IMAGER, THERMAL IMAGING SYSTEM, RANGE INCREASE, MAIN CHARACTERISTICS, INFRARED RADIATION.

The object of study is the process of interaction of infrared radiation with elements of a thermal imaging system and the environment.

The subject of research is the methods of signal processing in thermal imaging systems.

The purpose of work is to increase the range of action of thermal imaging systems.

The research method is literature analysis, analysis of similar structures, computer modeling and designing.

In the graduation project were reviewed typical thermal imaging systems, their main characteristics and methods for increasing the range of action of the thermal imaging systems.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	8
ВСТУП	9
1 ОГЛЯД ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ	10
1.1 Тепловізор Pulsar Quantum HD38S	13
1.2 Тепловізор Skanda 60	14
1.3 Тепловізор Infray Xeye E2n	15
1.4 Тепловізор FLIR C2	16
2 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ	18
2.1 Структурна схема ТС	19
2.1.1 Оптична система ТС	20
2.2 Основні характеристики тепловізійних систем	21
2.2.1 Порогова температурна чутливість	22
2.2.2 Дальність дії тепловізійної системи	22
2.2.3 Роздільна здатність тепловізійної системи	24
2.2.4 Спектральна характеристика тепловізійних систем	25
2.2.5 Робочий температурний діапазон	27
2.2.6 Кут поля зору	27
2.2.7 Просторовий кут поля зору	28
2.3 Енергетичний розрахунок дальності дії ТС	28
3 МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ	32
3.1 Метод підвищення роздільної здатності системи	33
3.2 Метод покращення оптичної системи	34
3.3 Метод охолодження матриці	37
3.4 Застосування методик шумоподавлення	38

3.5	Збільшення завадостійкості системи	38
3.6	Метод накопичення кадрів	39
3.7	Метод накладання контурів	40
3.8	Метод накладання TV-зображення	40
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	41
4.1	Математичне моделювання процесу формування тепловізійних кадрів.	42
4.2	Експериментальні дослідження дальності дії тепловізійної системи	45
	ВИСНОВКИ	69
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	70
	ДОДАТОК А	74
	ДОДАТОК Б	75

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНИЧКИ

FIR – far infrared

FPA – focal plane array

LW – long-wave

MDTD – minimum detectable temperature difference

MRTD – minimum resolvable temperature difference

MW – mid-wave

NETD – noise equivalent temperature difference

NIR – near-infrared

SNR – signal to noise ratio

SW – short-wave

АОЕП – активний оптико-електронний прилад

МДД – максимальна дальність дії

МДВ – максимальна дальність виявлення

МДВ – максимальна дальність розпізнавання

зарядового зв'язку

ОС – оптична система

ОЕП – оптико-електронний прилад

ОЕСС – оптико-електронна система спостереження

ПВ – приймач випромінювання

ТПСС – тепловізійна система спостереження

ТС – тепловізійна система

## ВСТУП

На сьогоднішній день тепловізійні системи застосовуються в таких областях діяльності людини, як: наука, техніка, будівництво, теплоенергетика, медицина, оборонні системи і комплекси. Питання збільшення дальності тепловізійних систем займає особливе місце в зв'язку з зростаючими потребами сучасних науки і техніки, і особливо гостро стоїть для оборонних систем. Існують різні класи тепловізорів, створені для вирішення різних завдань, і тому немає універсального методу збільшення дальності, а існує цілий комплекс методів і технічних рішень, які застосовуються відповідно до виду завдання і класу тепловізора.

В даній атестаційній роботі буде проаналізовано методи підвищення дальності дії тепловізійних систем з метою удосконалення існуючих методів, чи пропозиції нового методу підвищення дальності.

Існує велика кількість методів збільшення дальності тепловізійних систем, але всі вони мають різні особливості і недоліки. Їх застосування на практиці виявляє: підвищену вартість використовуваних матеріалів; складність в масовому виготовленні; незадовільні масо-габаритні параметри; використання додаткових енергоємних систем. У реаліях сьогоднішнього дня потрібно розробити метод збільшення дальності тепловізійних систем, використання якого дозволить: зменшити собівартість приладу; максимально можливо спростити конструкцію для якнайшвидшого впровадження в масове виробництво; підвищити надійність приладу

Для вирішення поставленого завдання дана робота сконцентрована на огляді методів підвищення дальності тепловізійних систем.

## 1 ОГЛЯД ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

Тепловізори – прилади, які призначені для спостереження теплового випромінювання нагрітих об'єктів. Їх призначення – у перетворенні інфрачервоного випромінювання в електричні сигнали, подальшій обробці цих сигналів та створенні термограми. Теплові (інфрачервоні) зображення – це зображення створені власним тепловим випромінюванням об'єкта. Зміни температури поверхні випромінювання об'єкта в певній мірі відповідають деталям візуально спостережуваної картини, тому створювані тепловізором зображення в основному відповідають уявленням про форму і розміри розглянутих об'єктів [1, с. 9].

Існує таке визначення : «оптико-електронний прилад, призначений для безконтактного (дистанційного) спостереження, вимірювання та реєстрації просторового та просторово-часового розподілу радіаційної температури об'єктів, що знаходяться в полі зору приладу, шляхом формування часової послідовності термограм та визначення температури поверхні об'єкта за відомими коефіцієнтами випромінювання та параметрами зйомки (температура навколишнього середовища, пропускання атмосфери, дистанція спостереження і т.п.)» [2].

Основні технічні характеристики тепловізійних систем: Діапазон вимірюваних температур [ $^{\circ}\text{C}$ ], Температурна чутливість [ $^{\circ}\text{C}$ ], Спектральний діапазон [ $\mu\text{м}$ ], Частота кадрів [Гц], Робоча температура [ $^{\circ}\text{C}$ ], Система запису термограм, Формат кадру и бітність цифрового зображення.

За принципом отримання зображення бувають:скануючі тепловізори та матричні теплові зори.

Термограма в скануючих теплові зорах створюється за допомогою оптико-механічного сканування простору. Система з дзеркал, що обертаються і гойдаються, та призм по черзі експонує на приймач

випромінювання від кожної точки спостережуваного простору. Приймач випромінювання може бути одноелементним, лінійкою чутливих елементів або невеликою матрицею [1, с. 16]. Перевага скануючих систем: кожна точка термограми отримана за допомогою одного датчика (в випадку одноелементної системи). Недоліком скануючих систем є: наявність механічних вузлів (рухомі деталі); і відносно довгий час формування термограми. До скануючих тепловізорів можна віднести AGEMA 470, IPTIC.

Матричні тепловізори (тепловізори з матрицею в фокальній площині, FPA – focal plane array). У фокальній площині оптичної системи таких тепловізорів встановлено багатоелементний приймач інфрачервоного випромінювання – матриця. Кожна точка (піксель) в термограмі – результат перетворення інфрачервоного випромінювання відповідним детектором матриці [1, с. 16]. В сучасних тепловізорах немає залежності між розміром матриці і одержуваною термограмою. У початкових (простих) моделях можуть встановлювати матриці як  $60 \times 60$  так і  $180 \times 180$  пікселів. У спеціально призначених (професійних) тепловізорах можуть встановлювати в матриці  $640 \times 480$  пікселів. Більша частина сучасних тепловізійних систем – матричні. До таких систем можна віднести FLIR P640 і FLIR T640 .

За спектральним діапазоном тепловізійні системи поділяються на короткохвильові та довгохвильові.

Робочий спектральний діапазон короткохвильових тепловізійних систем можна обмежити середньохвильовим ІЧ-діапазоном, який відповідає вікнам прозорості атмосфери, тобто в рамках від 3 мкм до 5 мкм. Лінзові об'єктиви короткохвильових тепловізорів виготовляють з кремнію. Це охолоджувані тепловізійні камери, в яких використовують азотне охолодження, термоелектричне охолодження, та охолодження за допомогою мікрохолодильників Стірлінга [1, с. 16-17]. До короткохвильових ТС відносять FLIR GasFindIR і FLIR SC7000.

Робочий спектральний діапазон довгохвильових тепловізійних систем знаходиться в рамках від 8 мкм до 14 мкм. Матриці таких тепловізорів не вимагають охолодження. Лінзові об'єктиви довгохвильових тепловізорів виготовляють з германію [1, с. 17]. Більша частина комерційних ТС – довгохвильові. До них можна віднести FLIR P640, FLIR T640.

За типом виконання тепловізійні системи бувають стаціонарні та портативні.

Призначенням стаціонарних ТС є спостереження за певною визначеною зоною. В цих системах передача інформації здійснюється по лінії зв'язку. У деяких випадках стаціонарні системи встановлюють на привід наведення. У промисловості стаціонарні тепловізори зазвичай стежать за температурним режимом рухомих об'єктів (наприклад, на конвеєрі) або поверхонь (наприклад, обертових печей) [1, с. 17]. До таких систем можна віднести FLIR A-series .

Портативні ТС застосовуються у різних галузях діяльності, зокрема в будівництві, енергетиці та промисловості. Сучасні моделі мають моноблочний корпус, який містить всі системи тепловізора: оптику, матрицю, електроніку, екран, органи управління, носій для запису термограм, акумулятор. Портативні тепловізори також оснащуються вбудованими фотоапаратами, лазерними вказівками, лампами підсвічування, аудіо-гарнітурами. Вони мають малу вагу від 350 грам до 2 кг. Автономне акумуляторне живлення забезпечує роботу до 8 годин [1, с. 17].

За можливістю вимірювання температури ТС бувають спостережними та вимірювальними.

Спостережні ТС роблять теплове випромінювання об'єктів видимим, представляючи інтенсивність інфрачервоного випромінювання за допомогою обраної колірної шкали (палітри) [1, с. 18].

Призначенням вимірювальних ТС є візуалізація температурних полів і безконтактне вимірювання температури поверхонь [1, с. 18].

## 1.1 Тепловізор Pulsar Quantum HD38S



Рисунок 1.1 – Тепловізор Pulsar Quantum HD38S

Це монокулярний тепловізійний прилад, призначений для розпізнавання живих об'єктів у нічний час або в умовах поганої видимості (за пеленою сильного дощу або снігу, за листям, чагарником і наметовою тканиною). Ця тепловізійна система обладнана приймачем на основі неохолоджених мікроболометрів, який має високу роздільну здатність, що забезпечує виявлення теплових об'єктів на відстані до 900 метрів. Вона дозволяє на близькій відстані розпізнавати зброю під одягом і залишки теплових слідів, залишених живими об'єктами і механізмами.

Характеристики системи [3]:

- тип приймача випромінювання: Неохолоджувана мікроболометрична матриця;
- роздільна здатність мікроболометра: 384×288 пікс.;
- частота зміни кадрів: 30 Гц;
- спектральний діапазон: від 7.7 мкм до 13.2 мкм;

- збільшення:  $\times 2.1$ ;
- об'єктив: F38/1.2;
- дистанція виявлення: 950 м (для об'єкта з розмірами  $1.7 \times 0.5$  м);
- температурна чутливість:  $< 50$  мК;
- діапазон робочих температур: від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ ;
- поле зору:  $14,4^{\circ}$  (гориз.)  $\times$   $10,8^{\circ}$  (верт.).

## 1.2 Тепловізор Skanda 60



Рисунок 1.2 – Тепловізор Skanda 60

Тепловізійна система Skanda 60 застосовується в якості оптичного прицілу для нарізної зброї для виявлення цілей на коротких та середніх дистанціях, у нічний час або в умовах поганої видимості і в важких погодних умовах. Відмінно зарекомендував себе для гірського полювання, безвідмовно працює в суворих зимових умовах. Його можна використовувати як при одиночній, так і при автоматичній стрільбі. Рекомендований для

застосування на дистанціях до 700/900 метрів. Ця тепловізійна система працює в пасивному режимі.

Характеристики системи [4]:

- спектральний діапазон: від 8 мкм до 14 мкм;
- збільшення: x3;
- поле зору: 9,2°(гориз.) x 6,9°(верт.)
- тип приймача випромінювання: Неохолоджувана мікроболометрична матриця;
- роздільна здатність мікроболометра: 640×480 пікс.;
- розмір пікселя матриці: 25 мкм;
- температурна чутливість: < 50 мК
- дистанція виявлення 2000 м (для об'єкта з розмірами 1.7×0.5 м);
- частота зміни кадрів: 50 Гц;
- діапазон робочих температур: від -32°C до 60°C.

### 1.3 Тепловізор Infray Xeye E2n



Рисунок 1.3 – Тепловізор Infray Xeye E2n

Тепловізійна система Infrared Xeye E2n використовується в якості монокулярного тепловізійного приладі, призначеного для розпізнавання живих об'єктів у нічний час або в умовах поганої видимості на відкритій місцевості на дистанції до 800-900 метрів. Основною особливістю тепловізора Infrared Xeye E2n є застосування матриці, виробленої по технології VOX (оксид ванадію). Ця технологія дозволяє отримувати більш насичені та контрастніші зображення. Також прилад оснащений цифровим масштабуванням зі значенням 2X.

Характеристики системи [5]:

- роздільна здатність матриці: 240x180;
- ядро VOx: 17 мкм;
- спектральний діапазон: від 8 мкм до 14 мкм;
- частота зміни кадрів: 50 Гц;
- діаметр об'єктиву: 13 мм;
- збільшення: x1;
- поле зору: 17° (гориз.) x 13° (верт.);
- дальність виявлення: 870 м (для об'єкта з розмірами 1.7×0.5 м);
- діапазон робочих температур: від -20°C до 50°C.

#### 1.4 Тепловізор FLIR C2

Тепловізійна система FLIR C2 являє собою повнофункціональну компактну тепловізійну камеру, призначену для застосування в будівельній галузі. Вона дозволяє виявляти невидимі оком витoki енергії, структурні дефекти, протікання водопроводу і т.п.; а також створювати радіометричні зображення з роздільною здатністю до 4800 пікселів та зберігати термограми в форматі JPEG. Також до особливостей цієї системи можна віднести широкий кут огляду, що забезпечує зручність при зйомці, і високу термічну чутливість для виявлення найменшої різниці температур.



Рисунок 1.4 – Тепловізор FLIR C2

Основні характеристики системи FLIR C2 [6]:

- діапазон температур об'єкта: від  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- діапазон робочих температур: від  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- роздільна здатність:  $80\times 60$  (4800 пікселів);
- теплова чутливість:  $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- кут огляду:  $41\times 31^{\circ}$ ;
- частота зміни кадрів: 9 Гц;
- дальність виявлення: 50 м;
- спектральний діапазон: від 7.5 мкм до 14 мкм.

Після розгляду класифікації ТС для подальшого вивчення питання збільшення дальності дії ТС доцільно перейти до розгляду їх принципу дії та основних характеристик.

## 2 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

Принцип роботи тепловізійної системи [1 с. 42-43] полягає в наступному: Інфрачервоне випромінювання з зовнішнього середовища фокусується за допомогою оптичної системи на приймач випромінювання, який видає сигнал, зазвичай у вигляді зміни напруги або електричного опору. Отриманий сигнал реєструється, оброблюється та, за потреби, перетворюється в електронне зображення (термограму) за допомогою електронного блоку обробки.

Термограма це зображення об'єкта, яке пройшовши цикл обробки тепловізійною системою являє собою тепловий аспект вихідного зображення – тобто на вихідне зображення накладаються градації кольору які відповідають розподілу інтенсивності інфрачервоного випромінювання у середовищі.

Існує також інше визначення: Термограма – багатоелементне, двувимірне зображення, кожному елементу якого приписується колір/ або градація одного кольору/ або градація яскравості екрана, яка визначається відповідно до умовної температурної шкали [2].

При спостереженні на екрані тепловізора об'єктів, що знаходяться на великих (граничних) відстанях, вводять два поняття: виявлення і розпізнавання. Під виявленням розуміють виділення об'єкта на навколишньому тлі і віднесення до класів об'єктів, що становлять інтерес. Розпізнавання означає віднесення виявленого об'єкту до вузького класу об'єктів, що цікавлять спостерігача, і встановлення типу об'єкта. При використанні апаратури тепловачення процес пошуку і розпізнавання характеризується єдиною можливістю сприйняття, яка залежить від багатьох факторів, які впливають на цей процес. Ці фактори визначаються

характеристикою об'єкта (кутовий розмір, градієнти зміни яскравості на краях великих деталей зображення, положення на екрані, швидкість руху, режим роботи, контраст відносного фону), характеристикою спостерігача (тренуваність, стомлення, вік, інтелект, робоче навантаження, периферична гострота зору, отримання попереднього інструктажу), характеристикою системи (просторово-частотна передаточна функція, число рядків сканування, що припадають на кутовий розмір об'єкта, кутовий розмір екрану, теплова постійна часу мішені) і різномірними чинниками (площа зони пошуку, освітленість в кабіні спостерігача, вібрації зображення або спостерігача, допустимий час пошуку) [1, с. 35-36].

## 2.1 Структурна схема ТС

Звичайна тепловізійна система – дуже мало відрізняється від інших оптичних систем, адже вона стандартизована на придатна до масового виробництва. І тому вона має типовий для оптичних систем набір компонентів: об'єктив, кришка об'єктиву, дисплей, приймач випромінювання, електронний блок обробки даних, органи управління, та пристрої зберігання даних.

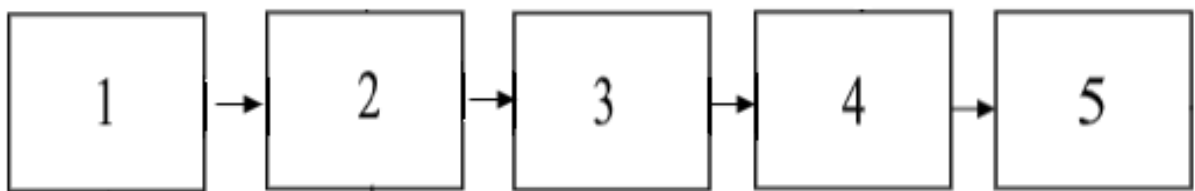


Рисунок 2.1 – Схема типової тепловізійної системи

Стандартна тепловізійна система складається з: оптичної системи (1), приймача оптичного випромінювання (2), електронного тракту (3), відео-контрольного пристрою (4) і ока оператора (5).

Оптична система виконує фокусування і спектральну фільтрацію випромінювання, що надходить із зовнішнього середовища.

Приймач оптичного випромінювання фіксує ІЧ-випромінювання і перетворює його в електричний сигнал електронного тракту.

Електронний тракт використовується для передачі електричного сигналу до відео-контрольного пристрою.

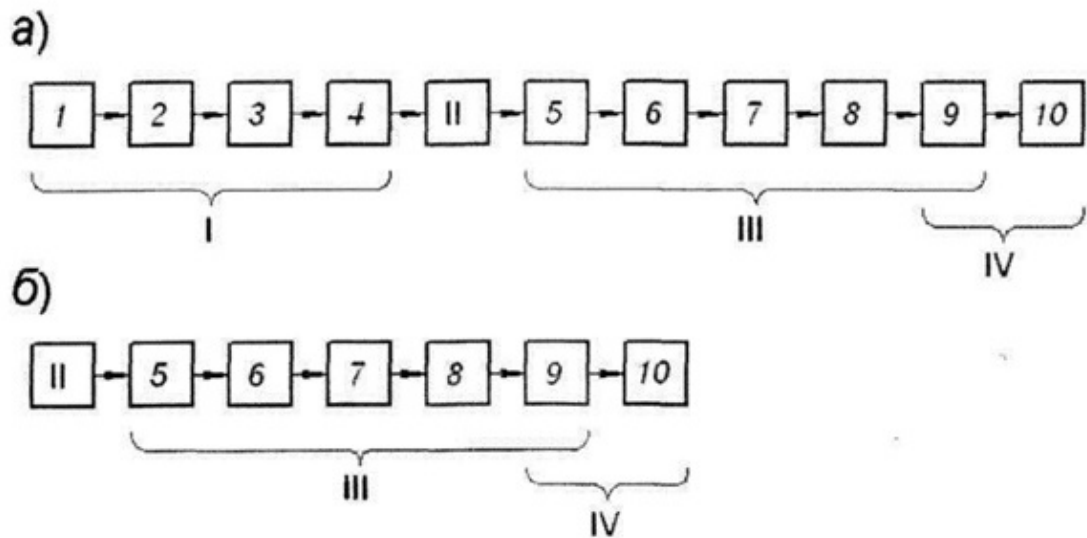
Відео-контрольний пристрій перетворює електричний сигнал в форму, зручну, для сприйняття отриманої інформації людиною.

2.1.1 Оптична система ТС. Оптична система тепловізійних пристроїв та систем може складатися, як з одного об'єктиву (у більшості систем), так і декількох об'єктивів (у спеціальних системах).

Об'єктив тепловізора збирає інфрачервоне випромінювання і фокусує його на приймачі випромінювання [1, с.46].

Основними завданнями, які розв'язуються оптичними системами [1, с.124-125] є:

- огляд частини простору, в якій знаходиться об'єкт пошуку, орієнтир або об'єкт спостереження;
  - аналіз оптичного зображення об'єкта в певному масштабі з метою подальшої його реєстрації;
  - забезпечення необхідної освітленості на поверхні приймача випромінювання;
  - концентрація потоку випромінювання штучних джерел;
  - визначення кутових координат об'єктів і дальності до них
- Групи характеристик оптичних систем:
- техніко-економічні та експлуатаційні;
  - габаритні;
  - енергетичні;
  - абераційні;
  - просторово-частотні.



I - передавальна система; II - об'єкт дослідження; III - прийомна система; IV - електрична система;

1 - джерело випромінювання, 2 - модулятор, 3 - фільтр, 4 - оптична система освітлювача, 5 - об'єктив, 6 - компенсатор, 7 - оптичний аналізатор, 8 - конденсор, 9 - приймач випромінювання, 10 - підсилювач сигналу

Рисунок 2.2 – Структурні схеми оптичних систем активних (а) і пасивних (б) ОЕП [1, с.124]

Оскільки звичайне оптичне скло непрозоре в середньому ІЧ діапазоні, оптику тепловізорів роблять зі спеціальних матеріалів. Найчастіше це германій, але він дорогий, тому іноді використовують халькогенідне скло, селенід цинку або навіть поліетилен. У лабораторних цілях оптику також можна робити з деяких солей, наприклад повареної солі, також прозорої в необхідному діапазоні довжин хвиль.

## 2.2 Основні характеристики тепловізійних систем

Основні характеристики тепловізійних систем визначаються їх призначенням, наприклад: промислові теплові зори використовуються для оцінки теплових втрат будівель, або для знаходження перегрітих

електричних чи механічних вузлів; або військові тепловізійні прилади нічного бачення призначені для виявлення живої сили та техніки супротивника. Але існуючі технічні параметри та технології ставлять обмеження на можливостях покращення характеристик систем.

До основних характеристик тепловізійних систем відносяться: дальність дії (дальність виявлення малорозмірних тепловипромінюючих об'єктів), роздільна здатність, спектральна характеристика об'єктиву та матриці, кут поля зору, поріг температурної чутливості.

2.2.1 Порогова температурна чутливість. Чутливість тепловізійної системи – це величина мінімального температурного перепаду, яку здатна зафіксувати система. На чутливість впливають параметри оптичної системи та матриці, а також шар атмосфери між об'єктом і приладом.

Порогова температурна чутливість або інакше різниця температур, яка еквівалентна шуму – прирощення температури, яке дорівнює середньоквадратичному значенню шуму в термограмі, при спостереженні однорідного фону с заданою температурою [2].

Порогова температурна чутливість впливає на контрастність кінцевого зображення (термограми).

Підвищена порогова температурна чутливість потрібна для виявлення ділянок з підвищеною вологістю; протікань; перегрітих ділянок електронних схем та електричних і механічних установок; прихованих дефектів і т.п.

2.2.2 Дальність дії тепловізійної системи. Одним з основних параметрів тепловізійної системи є її дальність дії. Під дальністю дії прийнято розуміти максимальну відстань на якій тепловізійна система здатна виявляти малорозмірні тепловипромінюючі об'єкти [1, с. 371].

Дальність виявлення – максимальна відстань між точковим об'єктом спостереження і тепловізором, при якій вихідний сигнал останнього перевищує в задане число разів середньоквадратичне значення шуму. Цей параметр залежить від великої кількості факторів (характеристик тепло

випромінюючого об'єкта, стану атмосфери, характеристик фону, на якому знаходиться спостережуваний об'єкт) [1, с. 400].

Дальність дії тепловізійної системи залежить як від внутрішніх параметрів системи так і від зовнішніх факторів. До характеристик системи відносять [1, с. 399]: просторово-частотну передавальну функцію, число рядків сканування, що припадають на кутовий розмір об'єкта, кутовий розмір екрану, теплову постійну часу мішені. До зовнішніх факторів можна віднести [1, с. 399]: характеристику спостерігача (тренуваність, стомлення, вік, інтелект, робоче навантаження, периферична гострота зору, отримання попереднього інструктажу), та різні чинники (площа зони пошуку, освітленість в кабіні спостерігача, вібрації зображення або спостерігача, допустимий час пошуку)

Для подальшого аналізу тепловізійних систем слід ввести такі поняття: МДВ  $R_d$  – це максимальна дальність між ОЕСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт виявляється на екрані дисплея із заданою ймовірністю  $P_d$  у разі необмеженого часу спостереження; та МДР  $R_r$  – це максимальна дальність між ОЕСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт розпізнається на екрані дисплея із заданою ймовірністю  $P_r$  у разі необмеженого часу спостереження [7, с. 220].

Чинники які впливають на дальність тепловізійної системи: атмосфера, внутрішні джерела перешкод, зовнішні джерела перешкод, матеріал лінзи оптичної системи, характеристики тепловипромінюючого об'єкта, характеристики фону. До характеристик об'єкту відносять [1, с. 378]: кутовий розмір, градієнти зміни яскравості на краях великих деталей зображення, положення на екрані, швидкість руху, режим роботи, контраст відносного фону.

Якщо параметри системи можливо корегувати, то з чинниками навколишнього середовища доводиться рахуватися Зовнішнім джерелом перешкод для тепловізійних систем є інфрачервоне випромінювання тобто

всі нагріті тіла, які потрапляють в радіус дії приладу. Внутрішнім джерелом перешкод для тепловізійних систем є внутрішній шум матриці фотоприймача. Серед зовнішніх чинників слід приділити особливу увагу особливостям поширення ІЧ-випромінювання.

На виявлення об'єкта позначаються характеристики фону і тепловипромінювального об'єкта – чим більшим буде контраст між об'єктом і фоном, тим вище буде ймовірність виявлення об'єкта що, в свою чергу, позитивно позначається на дальності дії тепловізійної системи.

2.2.3 Роздільна здатність тепловізійної системи. Роздільна здатність – величина, що характеризує кількість зчитувальних елементів зображення на одиницю довжини. Зазвичай розмірність цієї величини вказують в точках на дюйм. Роздільна здатність детектора вказує на кількість теплових точок (горизонталь  $\times$  вертикаль) – пікселів, які здатний зареєструвати тепловізор [1, с. 53]. Пікселем називають найменший окремий елемент матричного приймача випромінювання, який вловлює інфрачервоне випромінювання.

Збільшення кількості пікселів матриці підвищує якість зображення та збільшує рівень його деталізації. Чим більша кількість пікселів, тим докладніше, детальніше, та чіткіше представлені об'єкти вимірювання на знімках. На сьогоднішній день використовують прилади з роздільною здатністю (в пікселях): 160x120 – для первинної діагностики; 320x240 – для докладної; 640x480 і більше – для детальної діагностики [1, с. 42].

Роздільну здатність прийнято розділяти на фізичну (апаратну) та інтерполяційну. Фізична роздільна здатність характеризує конструктивні можливості сканера в дискретизації зображення по горизонталі і вертикалі [1, с. 53]. Оптичну роздільну здатність підвищують шляхом ущільнення реєструючих елементів або одночасним використанням декількох фотоприймачів (зображення складається з окремих частин які об'єднують автоматично або вручну).

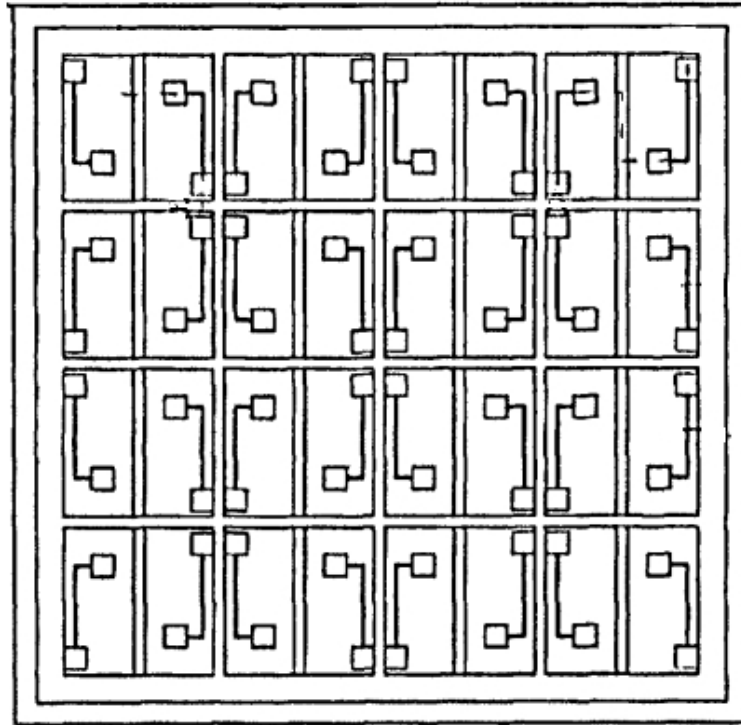


Рисунок 2.3 – Матриця в фокальній площині, FPA

Щоб зафіксувати інфрачервоне випромінювання використовують матричний приймач випромінювання (матрицю в фокальній площині, FPA) який представляє собою пристрій отримання зображення, що складається з масиву (зазвичай прямокутного) чутливих до випромінювання пікселів, розташованих в фокальній площині об'єктива [1, с. 42].

2.2.4 Спектральна характеристика тепловізійних систем. Спектральна характеристика ТС обумовлена двома факторами – Особливостями ІЧ-випромінювання з одного боку та характеристиками оптичної системи з іншого.

Матеріал лінзи оптичної системи виконує роль фільтра – визначає спектральну характеристику випромінювання яке потрапляє на фотоприймач. Через вибіркковість поглинання енергії випромінювання більшості приймачів, їх чутливість до монохроматичного випромінювання змінюється зі зміною довжини хвилі падаючого потоку. Цю чутливість прийнято називати спектральною, а залежність її від довжини хвилі називають спектральною

характеристикою приймача. Спектральна фільтрація полягає в використанні спектральних фільтрів, які пропускають на фотоприймач оптичне випромінювання в заданому інтервалі довжин хвиль.

Інфрачервоне випромінювання - електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між червоним кінцем видимого світла (з довжиною хвилі  $\lambda = 0,74$  мкм і частотою 430 ТГц) і мікрохвильовим радіовипромінювання ( $\lambda \sim 1-2$  мм, частота 300 ГГц) [1, с. 22].

Інфрачервоне випромінювання ділять на умовні діапазони [1, с. 23]:

- ближня область (Near-infrared, NIR):  $\lambda = 0,74 - 1,4$  мкм;
- короткохвильова область (Short-wave, SW):  $\lambda = 1,4 - 3$  мкм;
- середньохвильова область (Mid-wave, MW):  $\lambda = 3 - 5$  мкм;
- довгохвильова область (Long-wave, LW):  $\lambda = 8 - 14$  мкм;
- дальня область (Far infrared, FIR):  $\lambda = 14 - 1000$  мкм

В діапазонах NIR і SW фіксують відбите від об'єкта ІЧ-випромінювання. так як в цих діапазонах при звичайних температурах реєструється не власне,

Діапазони MW і LW є основними робочими діапазонами для систем теплобачення тому, що в їх межах реєструють, пов'язане з температурою, власне теплове випромінювання об'єктів.

Межі цих робочих тепловізійних діапазонів визначені вікнами прозорості атмосфери. Справа в тому, що проходячи через земну атмосферу, інфрачервоне випромінювання ослаблюється в результаті розсіяння і поглинання. Азот і кисень повітря послаблюють ІЧ-випромінювання в результаті розсіювання, яке значно менше, ніж для видимого світла. Особливо сильно поглинають ІЧ-випромінювання пари води і вуглекислий газ. До додаткового ослаблення інфрачервоного випромінювання призводить наявність в атмосфері зважених часток: диму, пилу, дрібних крапель води (серпанок, туман), а також опади (сніг, дощ) [1, с. 23].

2.2.5 Робочий температурний діапазон. Сфера застосування тепловізійної системи визначається її робочим температурним діапазоном. Робочим називають температурний діапазон в якому система може виконувати вимірювання.

Для застосування в будівельній галузі, тобто для тепловізійної зйомки будівель на наявність витоків тепла, доцільним є використання тепловізійних систем з верхньою межею робочого температурного діапазону до  $+100^{\circ}\text{C}$ . Для діагностики електроустановок та промислових установок доцільним є використання тепловізійних систем з верхньою межею робочого температурного діапазону до  $+350^{\circ}\text{C}$ . Для перевірки різноманітних котлів, теплогенераторів доцільним є використання тепловізійних систем з верхньою межею робочого температурного діапазону до  $+650^{\circ}\text{C}$ . В ливарній, скляній, хімічній промисловості, та в енергетиці, доцільним є використання тепловізійних систем з верхньою межею робочого температурного діапазону до  $+1200^{\circ}\text{C}$ .

2.26 Кут поля зору. Кут поля зору – просторовий кут, в межах якого здійснюється формування термограми [2].

Кутом поля зору називають параметр об'єктива тепловізійної системи, який описує розміри простору при знімку об'єкта. Найчастіше вимірюється в градусах. Основні параметри поля зору розраховуються за допомогою простої геометрії. Що продемонстровано на рисунку 2.4, де  $D1, D2, D3$  – відстані від об'єктиву тепловізора до до об'єкта вимірювання;  $X1, X2, X3$  – Ширина огляду по горизонталі;  $Y1, Y2, Y3$  – Ширина огляду по вертикалі;  $S1, S2, S3$  – Мінімальний розмір об'єкта "видимий" з заданої відстані. З чого можна зробити висновок: Чим меншим є кут поля зору, тим далі можна відійти від об'єкта, не втративши при цьому в якості знімка. Фізично зображення об'єкту проектується на детекторі, при цьому, чим далі тепловізор знаходиться від об'єкта, тим більш «розмитим» є зображення.

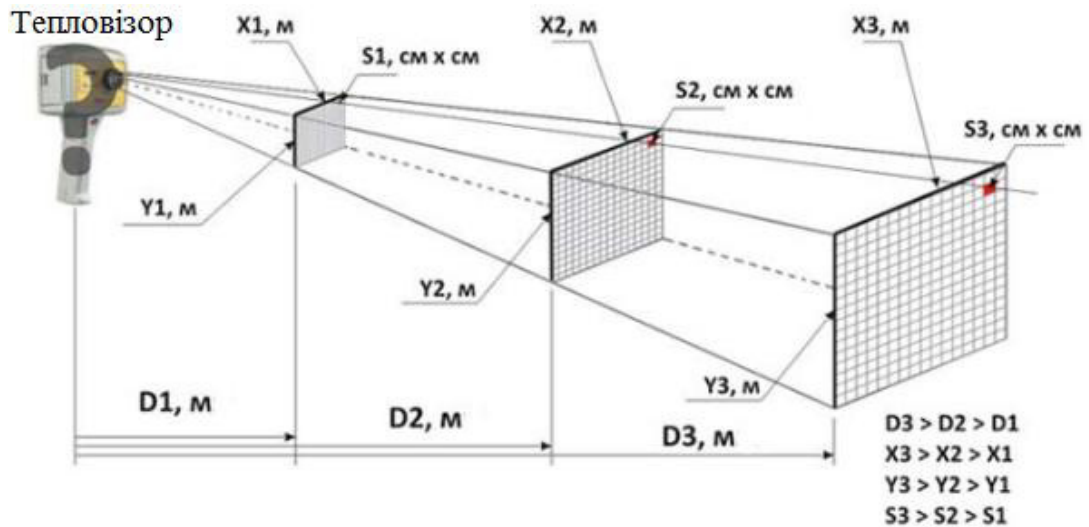


Рисунок 2.4 – Кут поля зору тепловізійної системи

2.2.7 Просторовий кут поля зору. Просторовий кут, в межах якого інфрачервоне випромінювання сприймається одним фоточутливим елементом фотоприймального пристрою [2].

Просторова роздільна здатність або миттєвий кут поля зору – це кут поля зору, який припадає на один піксель. Його легко порахувати, знаючи кут поля зору і кількість пікселів детектора, розділивши кут поля зору по одній з осей на відповідну кількість пікселів і перевівши значення в мілірадіани.

### 2.3 Енергетичний розрахунок дальності дії ТС

Методики енергетичного розрахунку ТС розглянуто в роботах [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]. Незважаючи на відмінності вони мають в своїй основі спільний алгоритм:

- отримати узагальнене енергетичне рівняння або нерівність, яке пов'язує між собою сигнал, шум та завади;
- представити корисний сигнал, шум і завади як функції параметрів і характеристик;

- розв'язати узагальнене рівняння відносного заданого параметру;
- вибрати і розрахувати інші параметри.

Спрощений енергетичний розрахунок ОЕСС виконують наступним чином: визначають параметри системи, які забезпечують необхідне відношення сигнал/шум на виході ПВ.

Під дальністю дії ОЕСС будемо розуміти ту найбільшу дальність до об'єкта спостереження, за якої величина потоку випромінювання від об'єкта забезпечує задане відношення сигнал/шум [7, с. 265].

Перед виконанням енергетичного розрахунку дальності дії ОЕСС потрібно розглянути три випадки які описані у роботі [15]:

- перший випадок: наявний тільки об'єкт, фон відсутній. Дальність дії у цьому випадку описується рівнянням:

$$R = \sqrt{\frac{It \cdot Ap}{SNR \cdot NEP \cdot kdf} \frac{kdr}{kdtп}}, \quad 2.1$$

де  $It$  – інтегральна сила випромінювання об'єкта;

$Ap$  – площа вхідної зіниці ОС;

$SNR$  – відношення сигнал/шум, яке залежить від ймовірності виявлення об'єкта;

$NEP$  – пороговий потік у одиничній смузі пропускання на еталонній частоті модуляції;

$kdr$  – коефіцієнт використання ПВ за реальним випромінювачем з урахуванням ослаблення випромінювання атмосферою й ОС;

$kdtп$  – коефіцієнт використання ПВ за еталонним випромінювачем;

$kdf$  – коефіцієнт використання ПВ за робочим частотним діапазоном.

- другий випадок: об'єкт знаходиться на рівномірному фоні Дальність дії у цьому випадку описується рівнянням:

$$R = \sqrt{\frac{Ab \cdot Ap(Lt \cdot kdrt - Lb \cdot kdrb)}{SNR \cdot NEP \cdot kdf \cdot kdtp \cdot kdb}}, \quad 2.2$$

де  $Ab$  – площа фону, обмежена полем зору системи;

$Lt$  – яскравість об'єкта;

$kdrt$  – коефіцієнт використання потоку випромінювання об'єкту ПВ;

$Lb$  – яскравість фону;

$kdrb$  – коефіцієнт використання потоку випромінювання фону ПВ;

$kdb$  – коефіцієнт, який характеризує збільшення порогового потоку ПВ через постійну фонову освітленість.

- третій випадок: об'єкт знаходиться на нерівномірному фоні. Дальність дії у цьому випадку описується рівнянням:

$$R = \sqrt{\frac{Ap(Lt \cdot kdrt - Lb \cdot kdrb)}{SNR \cdot m \cdot Lb \cdot \Omega_s \cdot kdrb}}, \quad 2.3$$

де  $m$  – глибина модуляції потоку від фону;

$\Omega_s$  – тілесний кут поля зору системи.

Розрахунок дальності дії тепловізійних систем виконують за допомогою методик [16], [17], [18] які визначають SNR на виході ПВ.

Для визначення МДВ і МДР необхідно вказати тип об'єкта (цілі) і фону та їх характеристики, стан атмосфери, а також ймовірність виявлення  $P_d$  і розпізнавання  $P_r$  [7, с. 289].

У роботі [7, с. 289-291] наведена методика, за допомогою якої можна розрахувати МДД у випадках коли об'єкт знаходиться на не випромінюючому фоні, на рівновипромінюючому фоні та на нерівно випромінюючому полі. Ключовими параметрами якої є характеристики ОС, ПВ, просторово-енергетичні характеристики об'єкту і фону, а також параметри шару атмосфери який знаходиться між ТС та об'єктом. МДД

визначають найбільшою відстанню від ОЕСС до об'єкта, при якій SNR на виході ПВ забезпечується потоком випромінювання від об'єкта.

При використанні пасивних ОЕСС величину МДВ для об'єктів малого розміру знаходять за формулою:

$$\Delta E_n = SNR \cdot NE, \quad (2.4)$$

де  $\Delta E_n$  – величина на яку енергетична освітленість вхідної зіниці ОС, утворена випромінюванням об'єкта, перевищує освітленість, утворену випромінюванням фону;

$NE$  – освітленість, еквівалентна шуму.

Також існує методика [19], у якій МДВ визначають відстанню до об'єкта, який розміщено на рівномірному фоні, за якої тепловий контраст об'єкта з урахуванням розсіювання і поглинання атмосферою забезпечує задану ймовірність виявлення зображення об'єкта на екрані дисплея.

Загальну методику розрахунку дальності дії ТПСС наведено у статті [20]. Для розрахунку МДД фіксують критичний розмір об'єкта, за яким спостерігають, температуру фону та об'єкту, метеорологічні умови. Спираючись на критерій Джонсона задають число смуг тест-об'єкта відповідно до його критичного розміру, розраховують MRTD з врахуванням різних штрихових мір та спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери для кожної дистанції. МДР – дистанція на якій значення MRTD дорівнює різниці температур об'єкт – фон.

Існує методика розрахунку МДД ТПСС [9] заснована на температурному розділенні. Температурне розділення ТС визначають температури NETD, MDTD, MRTD

Отримавши уявлення про основні вузли ТС їх принцип дії, параметри і характеристики, а також про розрахунок їх дальності дії слід приділити увагу існуючим методам підвищення дальності ТС.

### 3 МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

Максимальна дальність виявлення є одним з головних параметрів тепловізора при використанні його для виявлення і спостереження віддалених тепловипромінюючих об'єктів [1]. На максимальну дальність дії тепловізійної системи комплексно впливає цілий ряд параметрів, одним з яких є роздільна здатність тепловізійної системи. На сьогоднішній день існують такі [21] методи збільшення дальності тепловізійних систем:

- підвищення роздільної здатності системи;
- покращення оптичної системи;
- метод охолодження матриці;
- застосування методик шумопоглинання;
- збільшення завадостійкості системи;
- метод накопичення;
- метод накладання контурів;
- метод накладання TV-зображення.

Одні й ті самі задачі можуть бути вирішені за допомогою застосування різних методів й мати близькі кінцеві результати. Різниця полягатиме у складності, енерговитратності та вартості використаних методів – тому вирішення кожної окремої задачі вимагає доцільного підходу.

Кожен з методів має свої переваги, особливості та недоліки. Доцільність використання певного методу визначається великою кількістю чинників, таких як: енерговитратність; наявність процесора, здатного до виконання великого числа обчислень за короткий термін; масо-габаритні параметри готового пристрою; використання спеціальних матеріалів для виготовлення лінз; наявність готових елементів та собівартість готової системи.

### 3.1 Метод підвищення роздільної здатності системи

Роздільна здатність розглядається у роботах [22], [23], [24].

Роздільна здатність тепловізійних систем з використанням матричного приймача випромінювання визначається кількістю елементів матриці – пікселів. Зрозуміло твердження, що чим більшою буде кількість пікселів у матриці – тим більшою буде роздільна здатність тепловізійної системи.

А підвищення роздільної здатності (тобто збільшення елементів матриці) забезпечує більш точні уявлення про об'єкти за якими ведеться спостереження.

Метод підвищення роздільної здатності системи полягає у використанні типової фоточутливої матриці з більшою кількістю елементів, наприклад замість типової матриці  $320 \times 240$  пікселів встановити типову матрицю  $640 \times 480$  пікселів.

Використання матриці з більшою кількістю елементів призводить до потреби внесення змін в конструкцію приладу, адже матриця з більшою кількістю елементів має інші масо-габаритні параметри, що в свою чергу вимагає розробки нових конструкторсько-технічних рішень – і, як наслідок, створення нової тепловізійної системи. Тобто застосування методу підвищення роздільної здатності суттєво збільшує собівартість готового приладу.

Підвищення роздільної здатності системи дозволяє здійснити більш точне визначення форми об'єкту; дозволяє визначити відносно невеликий об'єкт на відносно великій дистанції. Чим більше кількість пікселів в приймачі випромінювання, тим докладніше, детальніше і чіткіше представлені об'єкти вимірювання. Крім того збільшення числа елементів матриці підвищує можливість помилкових спрацьовувань системи та вимагає застосування нових конструкторсько-технічних рішень.

### 3.2 Метод покращення оптичної системи

Оптичні системи ТС розглянуто у ряді робіт [25], [26], [27], [1].

Важливе місце у процесі отримання тепловізійного зображення займає узгодження властивостей оптоприймачів і лінз. Узгодження властивостей оптоприймачів і лінз полягає в використанні матеріалів лінз і оптоприймачів з максимально наблєженими спектральними характеристиками – тобто максимум пропускання лінзи повинен знаходитися в робочому діапазоні оптоприймача.

Суть методу полягає в використанні нових матеріалів для виготовлення об'єктивів тепловізійних систем. Так на сьогоднішній день більшість об'єктивів для тепловізійних систем виготовляють з германію, кремнію, халькогенідного скла та селеніду цинку.

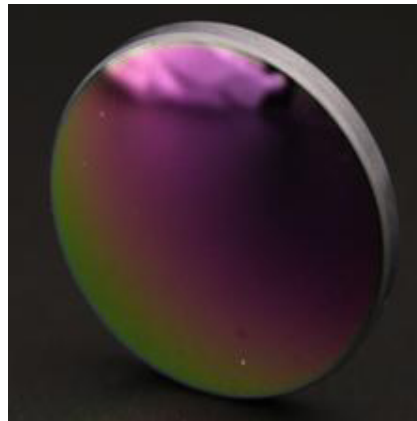


Рисунок 3.1 – Об'єктив з германію

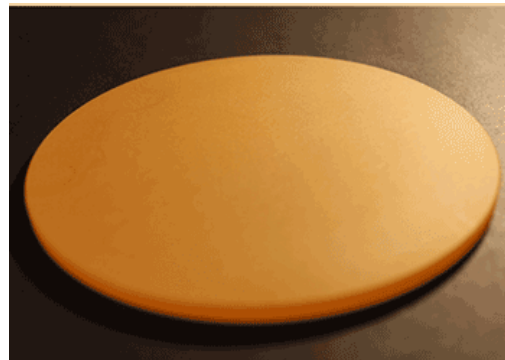


Рисунок 3.2 – Об'єктив з халькогенідного скла



Рисунок 3.3 – Об'єктиви з кремнію

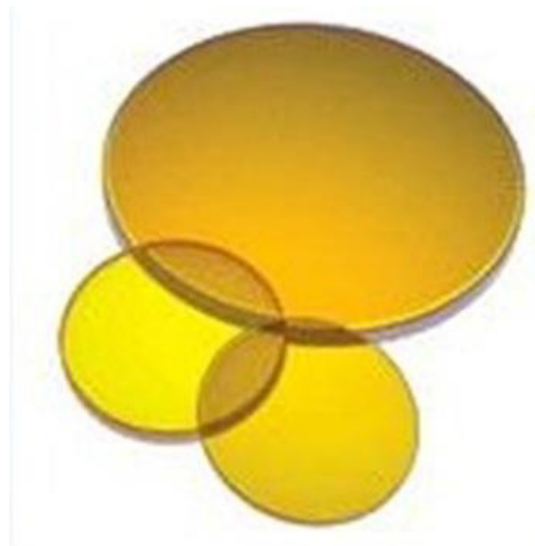


Рисунок 3.4 – Об'єктиви з селеніду цинку

Покращення оптичної системи дозволяє підвищувати спектральні пропускні характеристики що призводить до пропускання тільки інфрачервоного випромінювання, що значно знижує «помилкові засвітки» фотоматриці. Використання спеціальних матеріалів дозволяє дуже точно визначати межі робочих діапазонів довжин хвиль.

Варто зазначити, що прозорими у ІЧ-діапазоні є набагато більше матеріалів, але не всі з них доцільно використовувати в якості оптичних матеріалів для тепловізійних систем. Однак застосування рідкісних і складних в отриманні матеріалів значно підвищує собівартість системи.

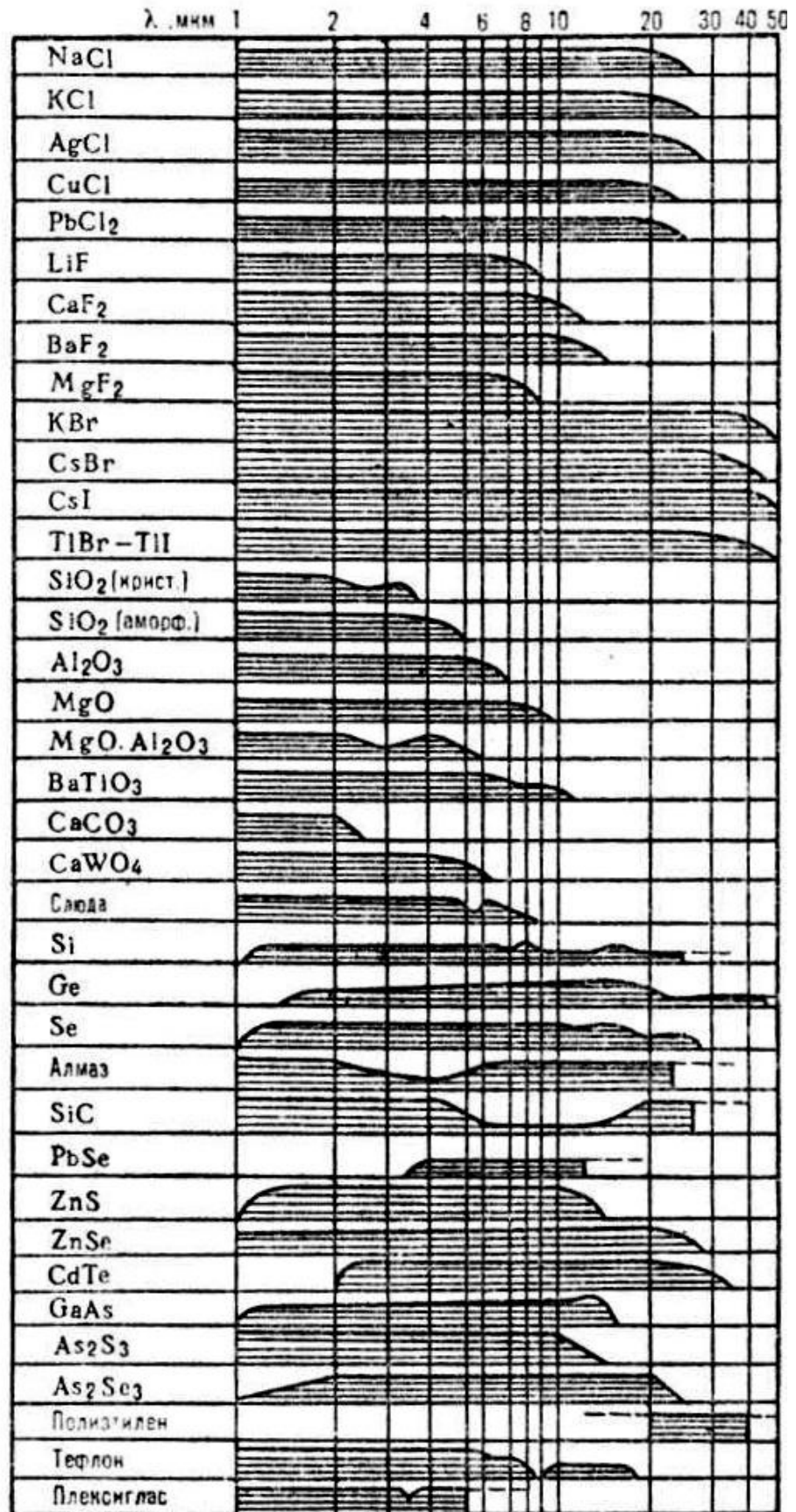


Рисунок 3.5 – Прозорість оптичних матеріалів в ІЧ області спектра

### 3.3 Метод охолодження матриці

Напівпровідникові матриці охолоджують різними способами [22], [1] для цього можуть використовувати азотне охолодження, термоелектричне охолодження, та охолодження за допомогою мікрохолодильників Стірлінга.

Застосування методу охолодження призводить до зниження теплових шумів фоточутливої матриці за рахунок того, що зниження температури зменшує хаотичний рух рухомих носіїв заряду в будь-якому провіднику електричного струму, який володіє активним опором, тобто зменшує ймовірність випадкової флуктуації сигналу, що в свою чергу, збільшує відношення сигнал\шум.

Методу охолодження матриці непрямим шляхом впливає на збільшення дальності дії тепловізійних систем. Цей метод призводить до зменшення внутрішніх теплових шумів і, як наслідок, до підвищення відношення сигнал/шум, що, в свою чергу, посилює контрастність – тобто збільшується різниця температур фону і об'єкту і саме це збільшення й виконує функцію підвищення дальності дії системи.

Необхідність охолодження збільшує вартість тепловізійних систем робить системи масивними та неповороткими, що сильно звужує область їх застосування.

Використання методу охолодження матриці дозволяє підвищувати дальність дії тепловізійної системи, Однак призводить до ускладнення системи; підвищення її енерговитратності та собівартості. Тому в сучасних тепловізійних системах поступово почали відмовлятися від ПЗЗ – матриць, які потребують охолодження на користь мікроболометричних матриць, які не потребують охолодження та дозволяють фіксувати малі зміни опору з великою точністю практично у всьому діапазоні інфрачервоного випромінювання.

### 3.4 Застосування методик шумоподавлення

Шумоподавлення розглядають у роботах [22], [23], [24], [28].

Джерелами шуму тепловізійних систем можуть бути різноманітні власні внутрішні шуми системи, такі як: тепловий, генераційно-рекомбінаційний та інші.

Шумоподавлення – це процес видалення шумів з корисного сигналу, шляхом застосування спеціальних електронних блоків обробки або спеціальних алгоритмів. До методик шумоподавлення відносять застосування алгоритмів просторової та частотної фільтрації. Процес шумоподавлення реалізують за допомогою спеціальних систем шумоподавлення – це системи обробки сигналу, які реалізують як електронні схеми або програмні алгоритми, призначенням яких є збільшення відношення сигнал/шум за рахунок надмірності або зниження розрядності сигналу. Використання методик шумоподавлення дозволяє зменшувати фоновий шум; виділяти відносно невеликі об'єкти. Однак призводить до ускладнення системи; відрізняється складністю і громіздкістю обчислень що викликає високі вимоги до обладнання; крім того при використанні методик шумоподавлення існує ймовірність «згладжування» корисного сигналу.

### 3.5 Збільшення завадостійкості системи

Збільшення завадостійкості системи розглядається у роботах [22], [23], [24] і полягає у прийнятті комплексних заходів які направлені на зменшення власних шумів системи шляхом застосування елементів з меншим власним шумом, зменшення довжини топології з'єднань, застосуванням різноманітних екранів для ізоляції системи від зовнішніх завад, зокрема теплових та електромагнітних. Збільшення завадостійкості призводить до зменшення шумів приймального пристрою, а також до підвищення енерговитратності пристрою та ускладнення системи в цілому.

### 3.6 Метод накопичення кадрів

Метод накопичення розглядається у роботах [22], [23], [24], [29], [30], [31], і полягає в збільшенні часу експозиції. Чим більшою буде тривалість часу експозиції тим більша кількість фотонів потрапить на фоточутливу матрицю – що дає змогу виявити менший об’єкт на більшій дистанції. Кількість випромінювання яке потрапить на фоточутливу матрицю залежить від граничної освітленості  $E_n$  [1]:

$$E_n = \frac{\varphi \cdot \Phi_\epsilon \cdot K(\Delta f) \cdot K_e}{A_{вх} \cdot K_p}, \quad (3.1)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт використання приймачем випромінювання об’єкта з врахуванням ослаблення середовищем й деталями оптичної системи;

$K_e$  – коефіцієнт використання приймачем випромінювання джерела;

$\varphi$  – відношення «сигнал/шум»;

$\Phi_\epsilon$  – пороговий потік приймача по випромінюванню еталонного джерела на одиницю полоси частот;

$A_{вх}$  – площа вхідного зрачка об’єктива ОЕП;

$K(\Delta f)$  – коефіцієнт, враховуючий змінення частоти модуляції и ширини полоси підсилювача з еталонними умовами вимірювання.

Застосування методу накопичення непрямым шляхом впливає на збільшення дальності дії тепловізійних систем. Метод накопичення призводить до зменшення дисперсії шуму і, як наслідок, до підвищення відношення сигнал/шум, що, в свою чергу, посилює контрастність – тобто збільшується різниця температур фону і об’єкту і саме це збільшення й виконує функцію підвищення дальності дії системи. Використання цього методу дозволяє суттєво збільшити дальність дії тепловізійної системи, але значною мірою знижує її швидкодію.

### 3.7 Метод накладання контурів

Метод накладання контурів розглядається у роботі [22] і полягає в застосуванні математичних методів цифрової обробки зображень –, тобто, алгоритму, який виділяє межі об'єкта на зображенні і аналізує знайдені межі. Накладання контурів дозволяє більш точно визначати клас об'єкта, що спостерігається, однак підвищує можливість помилкових спрацьовувань системи. До методів накладання контурів можна віднести алгоритми сегментації зображень, адже вони дозволяють виділити всі можливі області на зображенні, а також метод активних контурів (англ. Active Contour Model [32]) – варіаційний метод пошуку меж у зображенні. Цей алгоритм використовує модель активних контурів вільної форми, яка має динамічний характер

### 3.8 Метод накладання TV-зображення

Метод накладання TV-зображення розглядається у роботі [22] і полягає в поєднанні двох зображень, отриманих відповідно тепловізійною і оптичною камерами. Його використання дозволяє мінімізувати можливість помилкових спрацьовувань системи. Однак, застосування даного методу призводить до підвищення енерговитратності пристрою та ускладнення системи в цілому а також до підвищення вартості системи.

Розгляд методів збільшення дальності дії ТС виявив необхідність у проведенні експериментальних досліджень зі збільшення дальності дії ТС з застосуванням методу накопичення кадрів.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

План проведення експерименту включає в себе дві частини. Математичне моделювання та фізичний експеримент.

Математичне моделювання полягає в створенні математичної моделі кадрів, отриманих тепловізійною системою, аналізі відношення сигнал/шум для кожного кадру, та застосування методу накопичення для отриманих кадрів.

Фізичний експеримент полягає у безпосередній зйомці об'єкта за допомогою тепловізійної системи на визначених фіксованих відстанях та отриманні термограм цього об'єкту; та обробці отриманих термограм за допомогою спеціальних програмних засобів, тобто, проведення розрахунків характеристик виявлення, в нашому випадку це відношення сигнал/шум.

При проведенні експерименту буде застосовано тепловізійну систему FLIR C2.

Об'єкт експерименту повинен мати відмінні від фону оптичні властивості в інфрачервоному діапазоні, тобто мати інші поглинальну, пропускну і відбивну здатності.

В якості об'єкту експерименту буде використано металевий шків, скляну пластину та пластикову картку, які мають різні тепловідбивні властивості.

4.1 Математичне моделювання процесу формування тепловізійних кадрів.

За допомогою програми Microsoft Excel 2010 створюємо 10 кадрів використовуючи закон розподілу випадкової величини Пуассона, з параметрами:  $\lambda = 40$  для фону та  $\lambda = 50$  для сигналу.

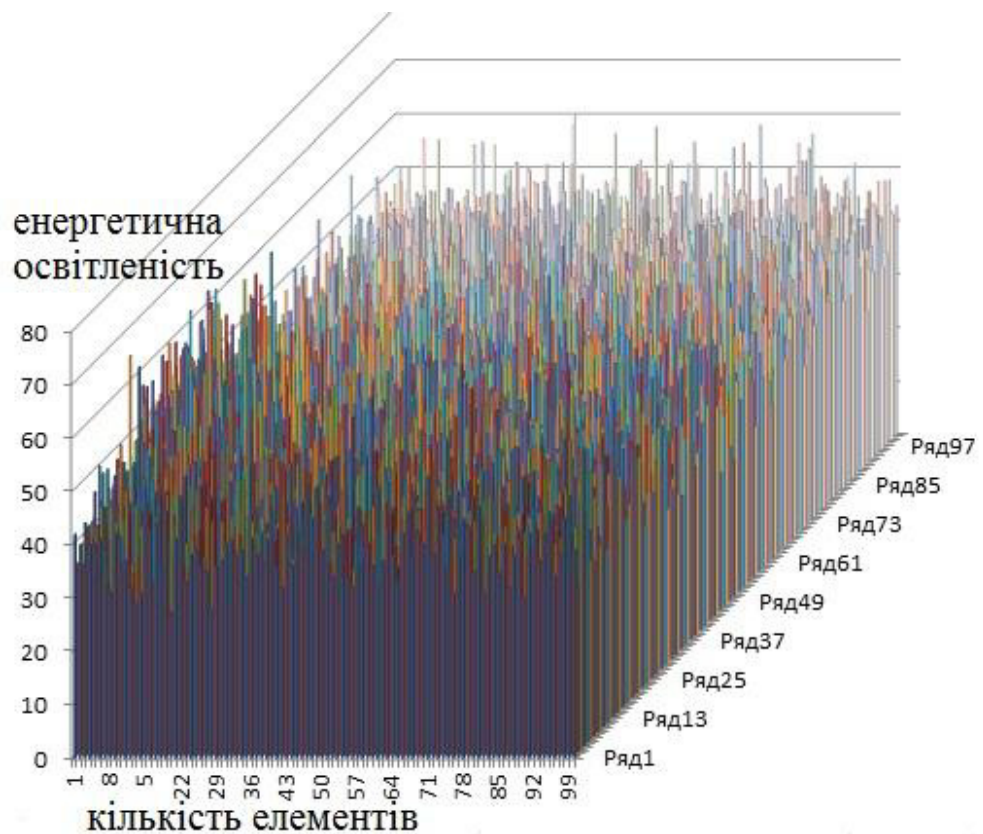


Рисунок 4.1 – Гістограма одного кадру

Розраховуємо відношення сигнал/шум, за допомогою формули 1.2:

$$\varphi = \frac{U_c}{\delta}, \quad (4.1)$$

де  $U_c$  – середнє арифметичне сигналу,

$\delta$  – середньоквадратичне відхилення шуму.

Таблиця 4.1 – Відношення сигнал/ шум для кожного кадру.

Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньоквадратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
40	6,4	7,78	49,8
40	6,4	7,87	50,4
40	6,4	7,87	50,1
40,1	6,2	8	50
39,8	6,3	7,92	49,9
39,9	6,2	8,04	49,9
40,3	6,3	7,92	49,9
40	6,3	7,92	49,9
40	6,2	7,98	49,5
39,9	6,2	8,12	50,4

Використовуємо метод накопичення для отриманих у процесі математичного моделювання тепловізійних кадрів. В математичному моделюванні процес накопичення можна відобразити як накладання кадрів – тобто складання значень пікселів одного кадру зі значеннями пікселів другого кадру з нормуванням на кількість складених кадрів. Розраховуємо відношення сигнал/шум використовуючи формулу 4.1.

Таблиця 4.2 – Відношення сигнал/шум з застосуванням методу накопичення

Кількість кадрів	Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньоквадратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
1	40	6,4	7,78	49,8
2	40,3	6,4	7,78	49,8
3	40,3	4,8	10,39	49,9
4	40,4	3,8	13,13	49,9
5	40,4	3,3	15,12	49,9
6	40,4	3,3	15,12	49,9
7	40,4	2,9	17,2	49,9
8	40,4	2,7	18,48	49,9
9	40,4	2,5	19,96	49,9
10	40,4	2,3	21,69	49,9

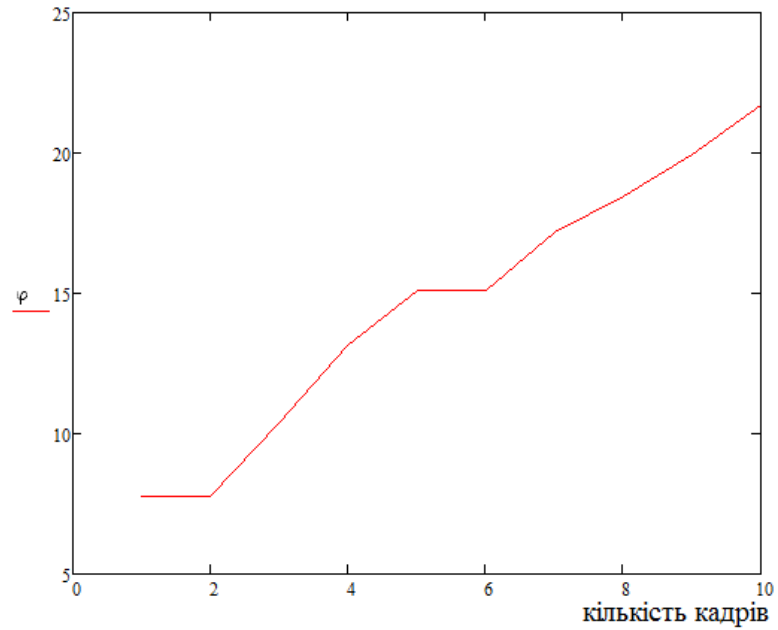


Рисунок 4.2 – Графік залежності відношення сигнал/шум від кількості кадрів

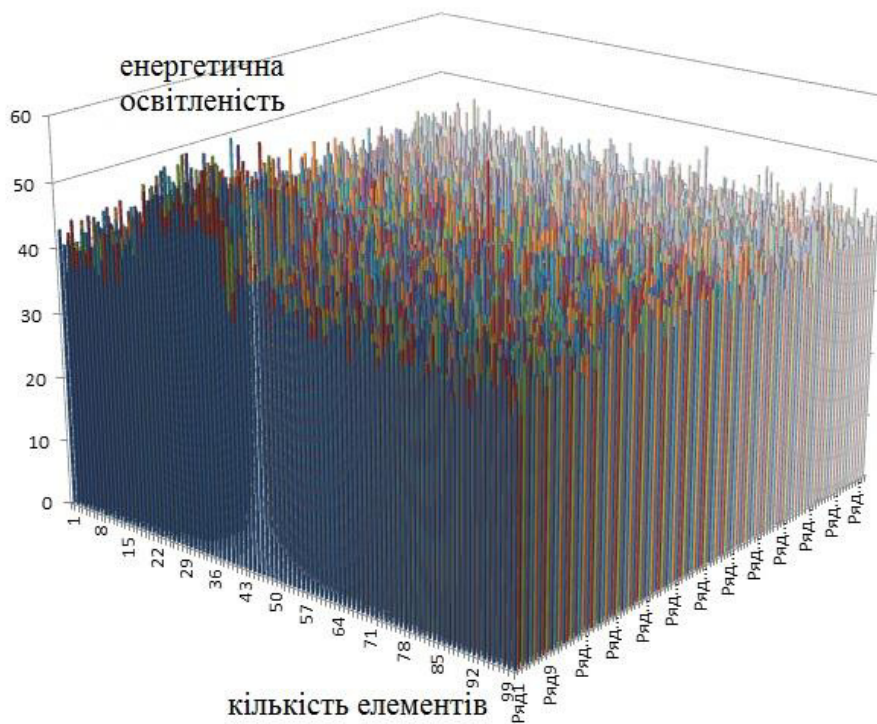


Рисунок 4.3 – Гістограма для десяти кадрів

Використання методу накопичення показало можливість збільшення відношення сигнал/шум пропорційно до кількості накопичених кадрів.

## 4.2 Експериментальні дослідження дальності дії тепловізійної системи

Для виконання експерименту з дослідження дальності дії тепловізійної системи було розроблено лабораторний макет, який дозволяє проводити тепловізійну зйомку заздалегідь встановленого об'єкту. Тепловізійна зйомка різних об'єктів проводиться з фіксованих відстаней. У даному лабораторному макеті передбачена можливість встановлення і використання джерела завад – світлодіодної лампи або лампи розжарювання



Рисунок 4.4 – Лабораторний макет для проведення експерименту з визначення дальності дії тепловізійної системи

Використовуючи тепловізор FLIR C2 робимо зйомку об'єкта металевий шків з різної дистанції.



Рисунок 4.5 – Металевий шків

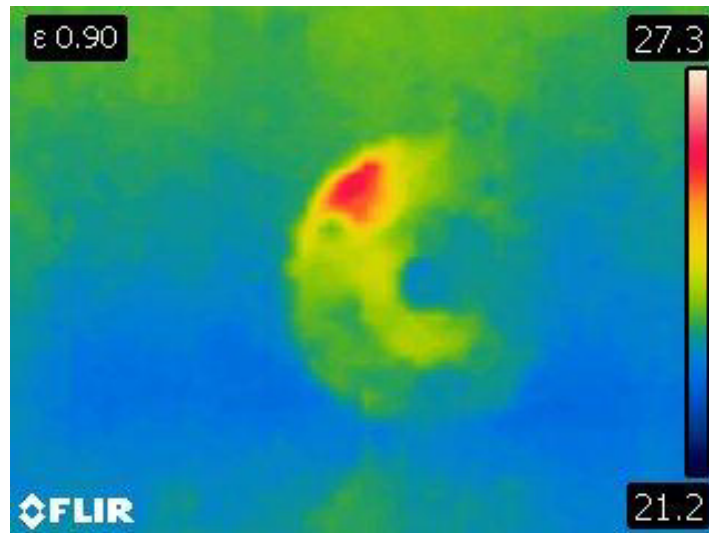


Рисунок 4.6 – Термограма металевого шківу з дистанції 25 см

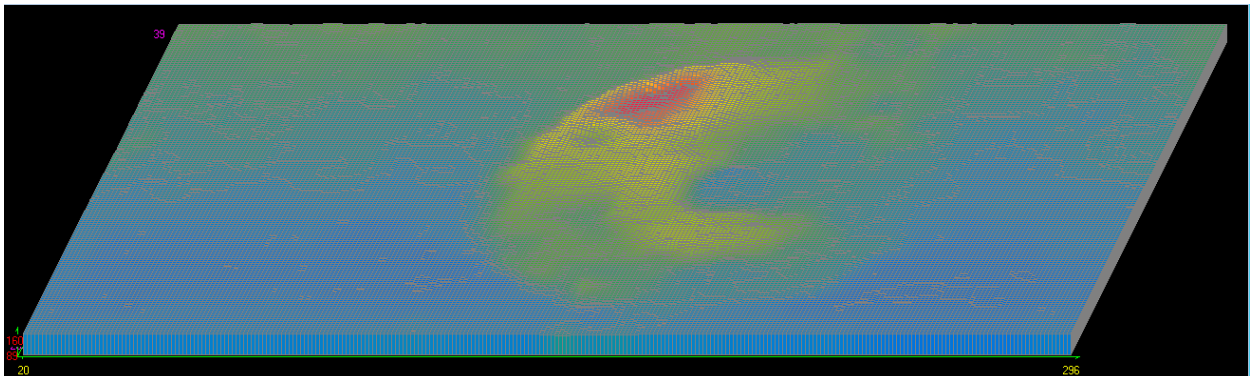


Рисунок 4.7 – Гістограма для термограми металевого шківу з дистанції 25 см

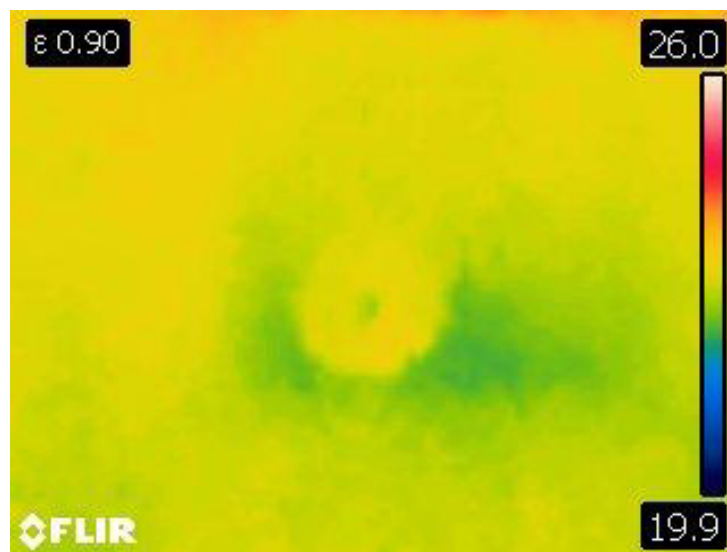


Рисунок 4.8 – Термограма металевого шківу з дистанції 50 см

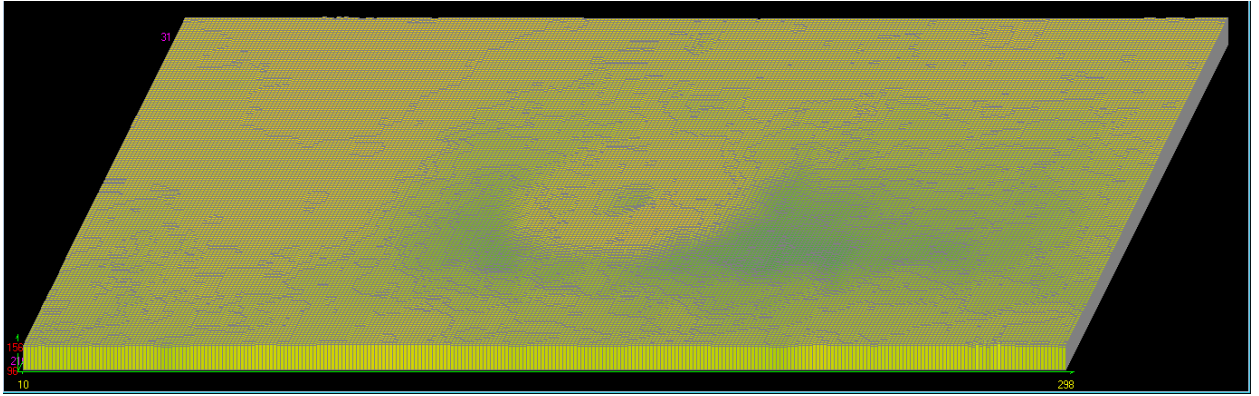


Рисунок 4.9 – Гістограма для термограми металевого шківу з дистанції 50 см

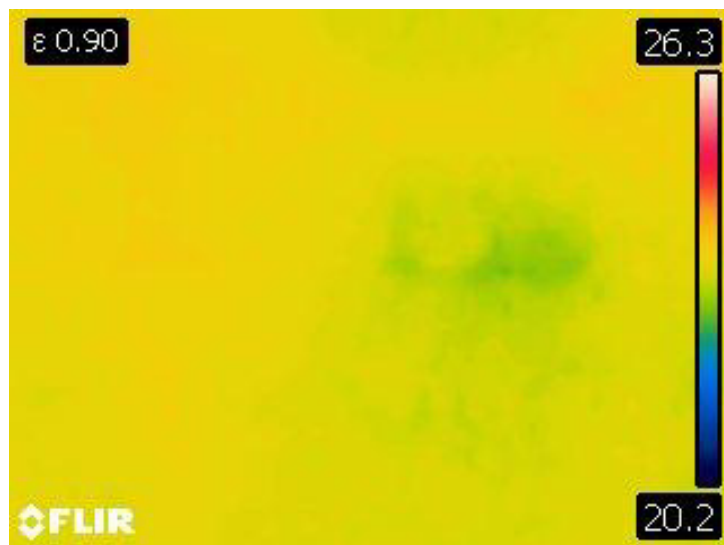


Рисунок 4.10 – Термограма металевого шківу з дистанції 1 м

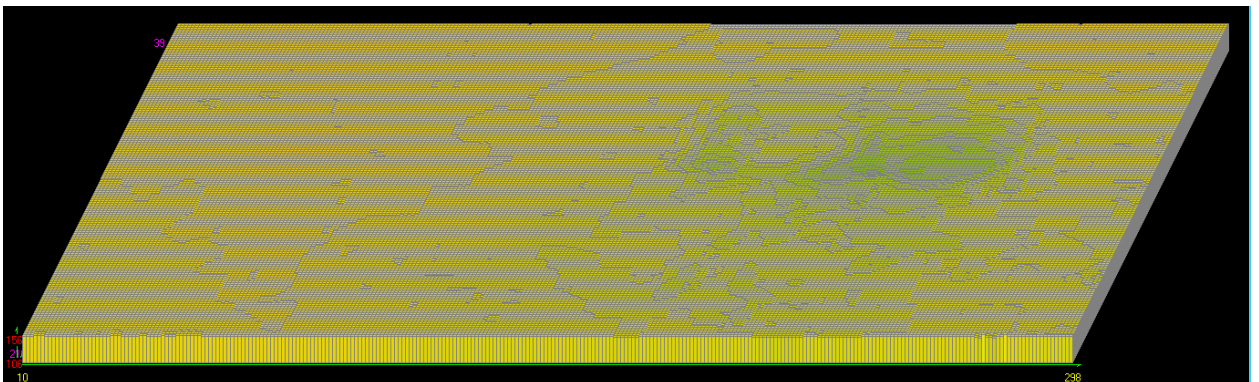


Рисунок 4.11 – Гістограма для термограми металевого шківу з дистанції 1 м



Рисунок 4.12 – Термограма металевого шківу з дистанції 1,5 м

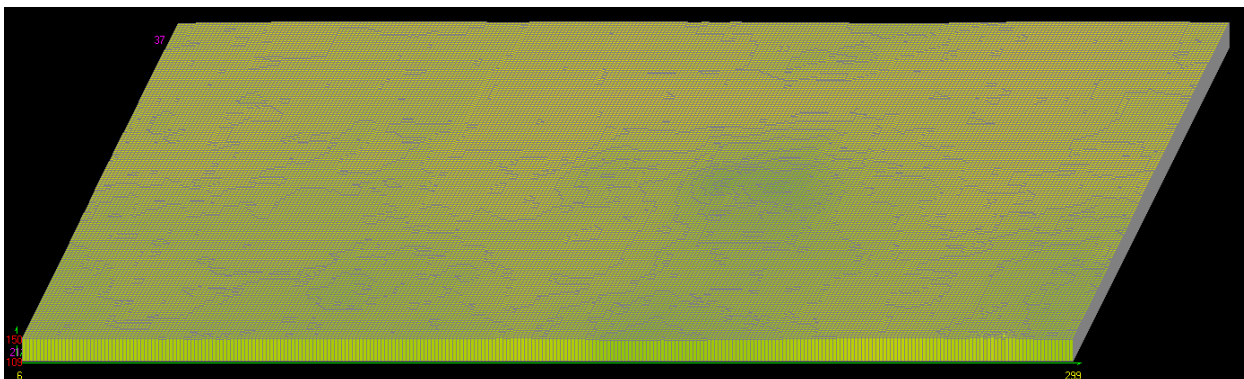


Рисунок 4.13 – Гістограма для термограми металевого шківу з дистанції 1,5 м

За допомогою формули 4.1 розраховуємо відношення сигнал/шум для отриманих термограм, результат розрахунків вносимо в таблицю 4.3

Таблиця 4.3 – Відношення сигнал/ шум для кожної термограми об'єкта металевий шків

Дистанція, см	Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньо-квдратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
25	50.5	2,42	43.9	102.1
50	111,9	3,89	30,1	117,2
100	150	0,54	242	131,1
150	143	1,37	93	128,2

За допомогою тепловізора FLIR C2 робимо зйомку об'єкта металевий шків у випадку, коли поруч з об'єктом наявне зовнішнє джерело завад, з різної дистанції. В якості джерела завад використовуємо світлодіодну лампу потужністю 3Вт. Помітно явище відбиття інфрачервоного випромінювання від поверхні металевого шківу.

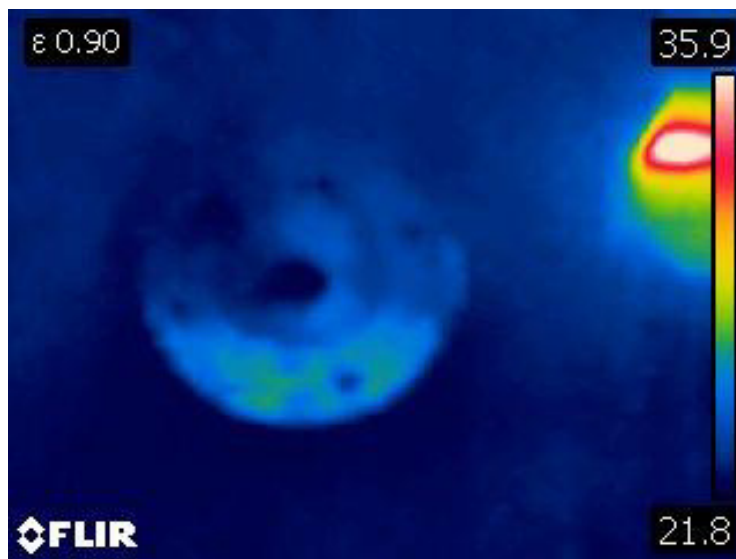


Рисунок 4.14 – Термограма металевого шківу з зовнішньою завадою з дистанції 25 см

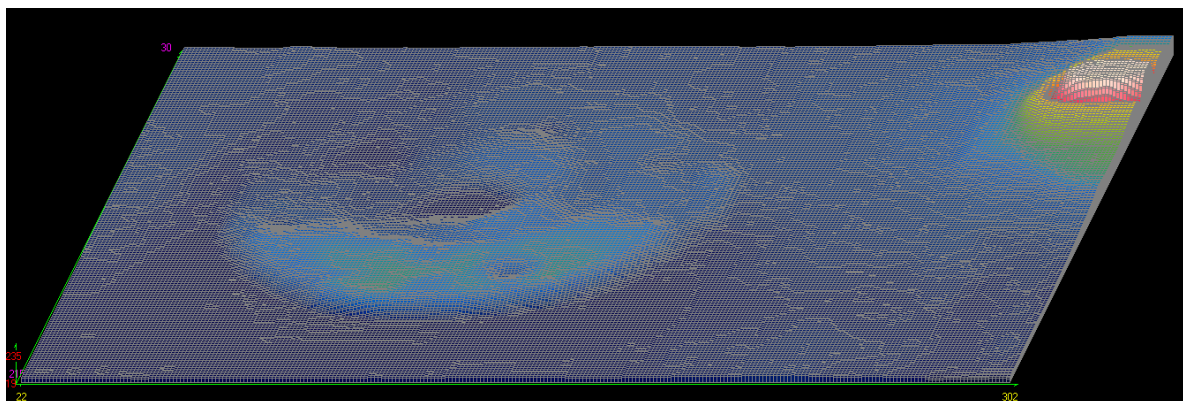


Рисунок 4.15 – Гістограма для термограми металевого шківу з зовнішньою завадою з дистанції 25 см



Рисунок 4.16 – Термограма металевого шківу з зовнішньою завадою з дистанції 50 см

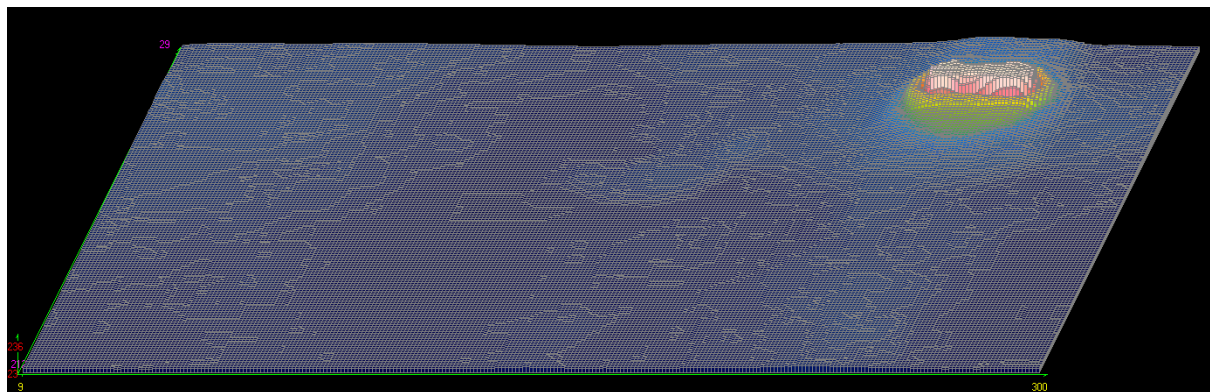


Рисунок 4.17 – Гістограма для термограми металевого шківу з зовнішньою завадою з дистанції 50 см

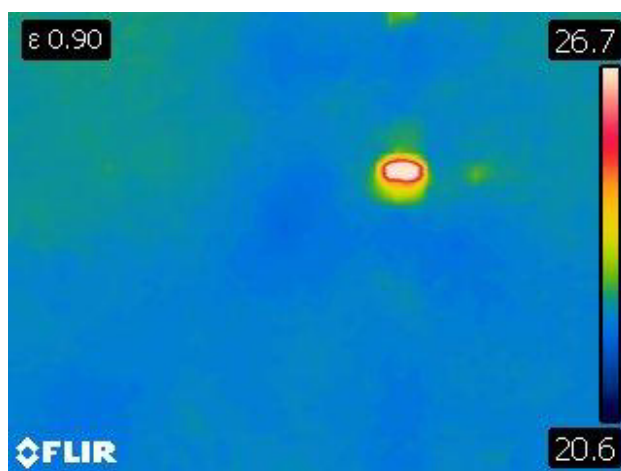


Рисунок 4.18 – Термограма металевого шківу з зовнішньою завадою з дистанції 1 м

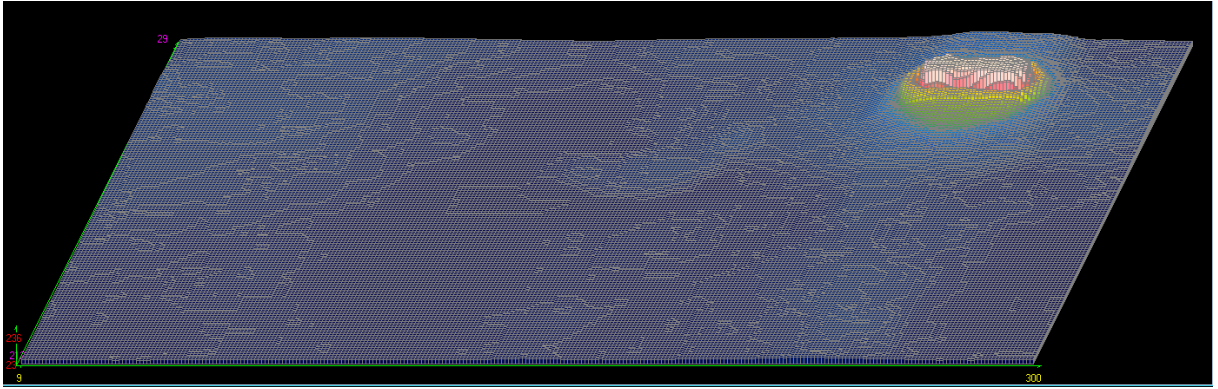


Рисунок 4.19 – Гістограма для термограми металевого шківу з зовнішньою завадою з дистанції 1 м

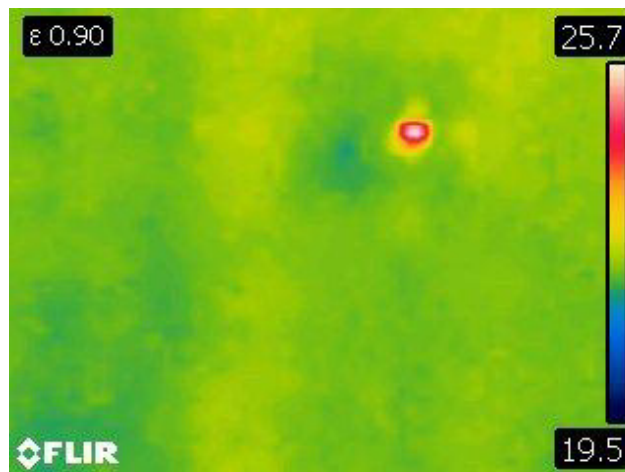


Рисунок 4.20 – Термограма металевого шківу з зовнішньою завадою з дистанції 1,5 м

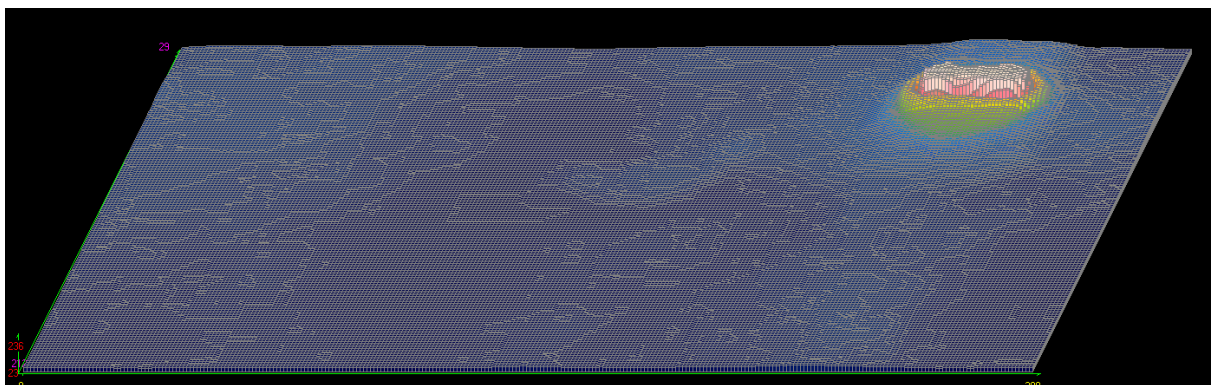


Рисунок 4.21 – Гістограма для термограми металевого шківу з зовнішньою завадою з дистанції 1,5 м

Таблиця 4.4 – Відношення сигнал/ шум для кожної термограми об'єкта металевий шків, з зовнішньою завадою

Дистанція, см	Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньоквадратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
25	35,6	3,87	21,3	82,4
50	44,3	3,6	12,4	44,9
100	111,9	0,8	139	111,9
150	103,5	2,56	41,9	107,3

Робимо тепловізійну зйомку об'єкта скляна пластина з різної дистанції.



Рисунок 4.22 – Скляна пластина



Рисунок 4.23 – Термограма скляної пластини з дистанції 25 см

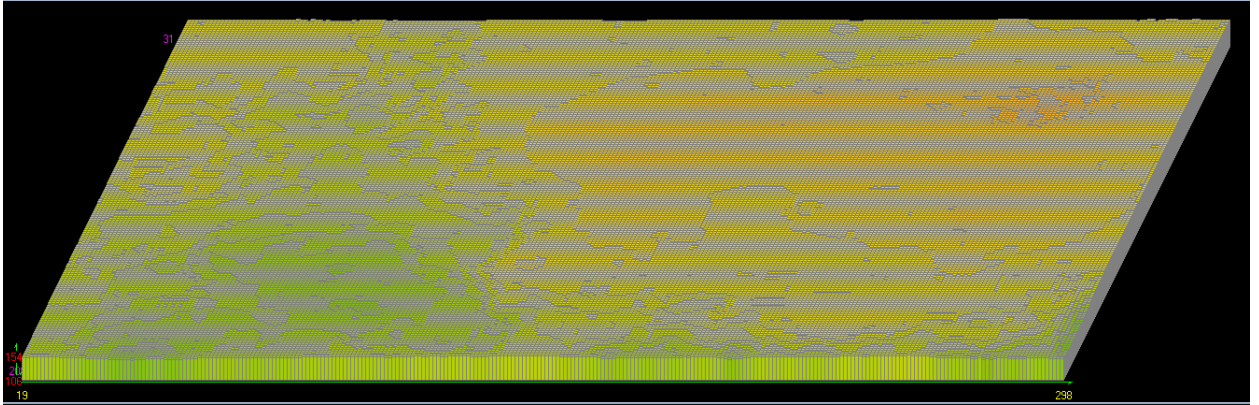


Рисунок 4.24 – Гістограма для термограми скляної пластини з дистанції 25 см

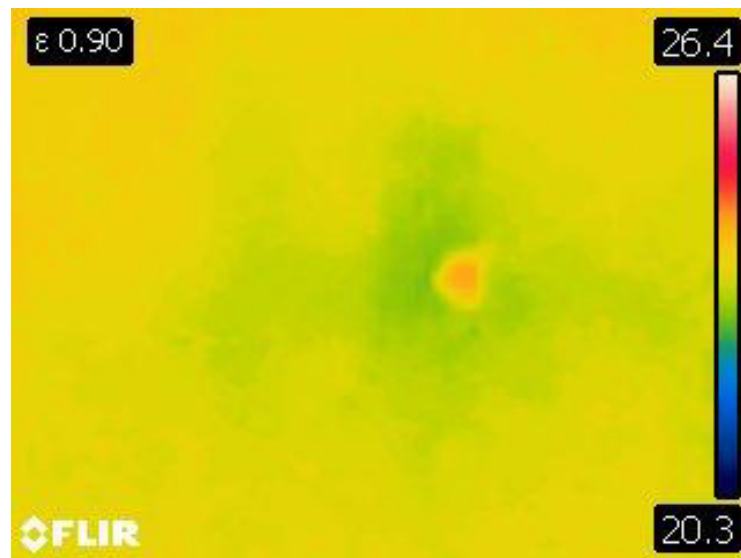


Рисунок 4.25 – Термограма скляної пластини з дистанції 50 см

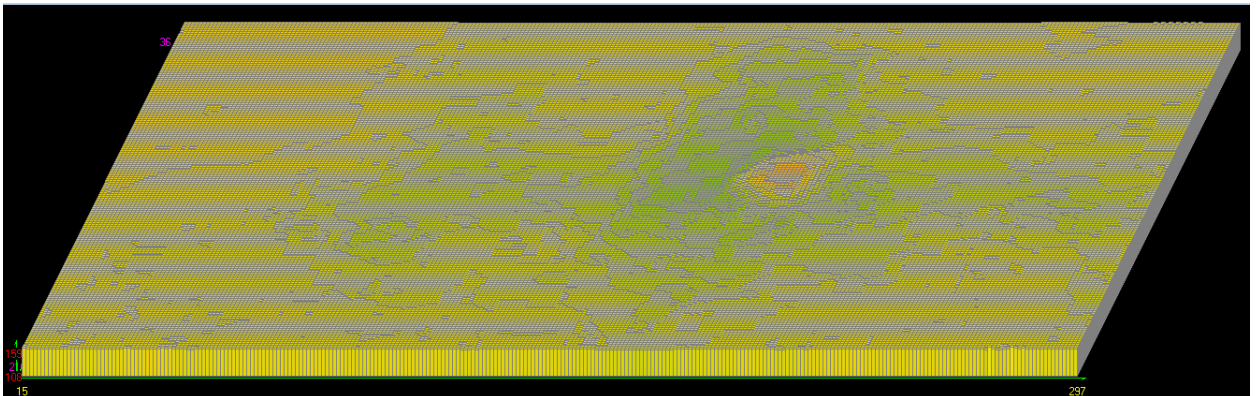


Рисунок 4.26 – Гістограма для термограми скляної пластини з дистанції 50 см

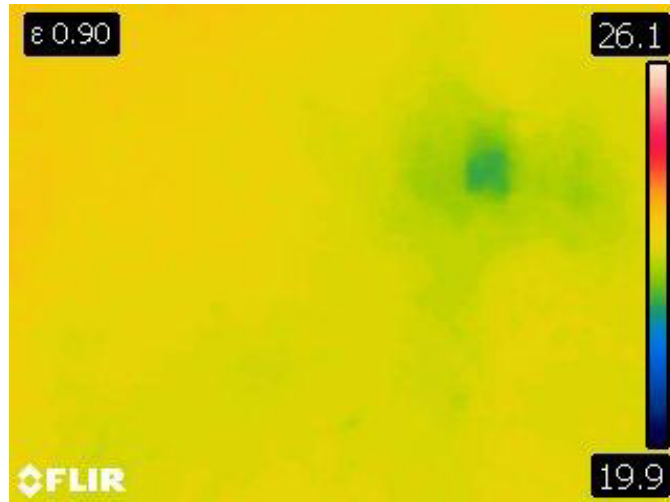


Рисунок 4.27 – Термограма скляної пластини з дистанції 1 м

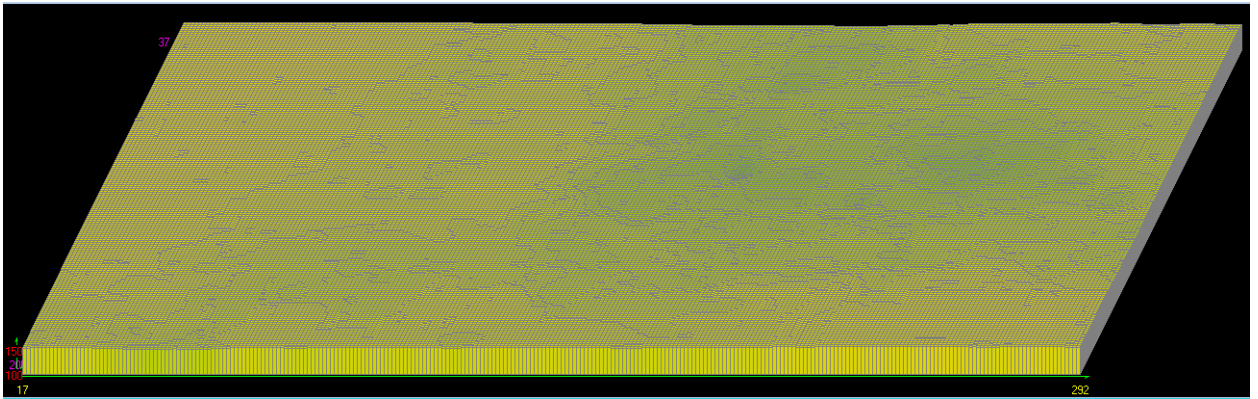


Рисунок 4.28 – Гістограма для термограми скляної пластини з дистанції 1 м

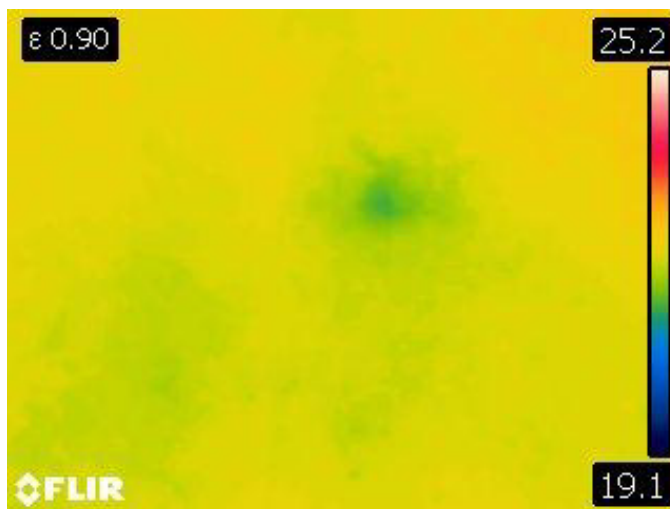


Рисунок 4.29 – Термограма скляної пластини з дистанції 1,5 м

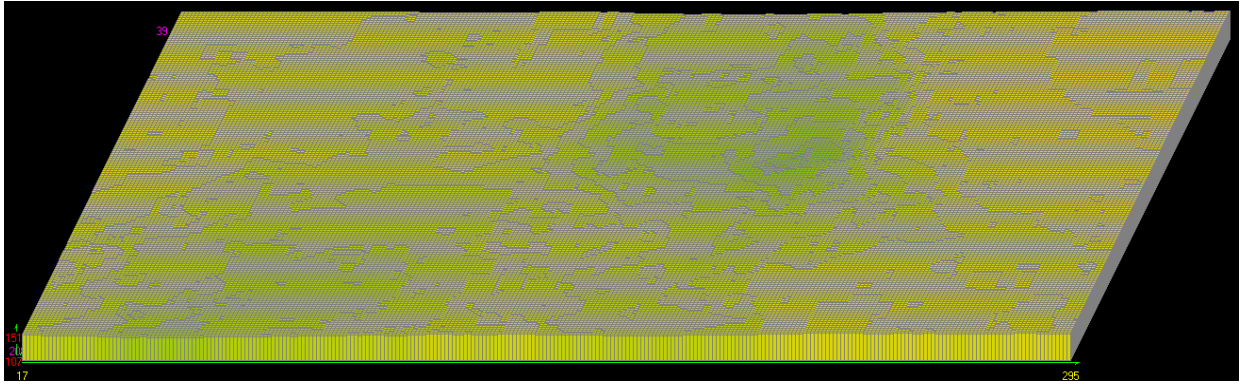


Рисунок 4.30 – Гістограма для термограми скляної пластини з дистанції 1,5 м

Таблиця 4.5 – Відношення сигнал/шум для термограм скляної пластини

Дистанція, см	Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньоквадратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
25	140,2	3,98	37,9	151
50	141,9	5,7	25,4	145
100	140	2,54	47,4	120,4
150	137,3	3,1	40,1	124,4

Проводимо зйомку об'єкта скляна пластини у випадку, коли поруч з об'єктом наявне зовнішнє джерело завад, з різної дистанції.

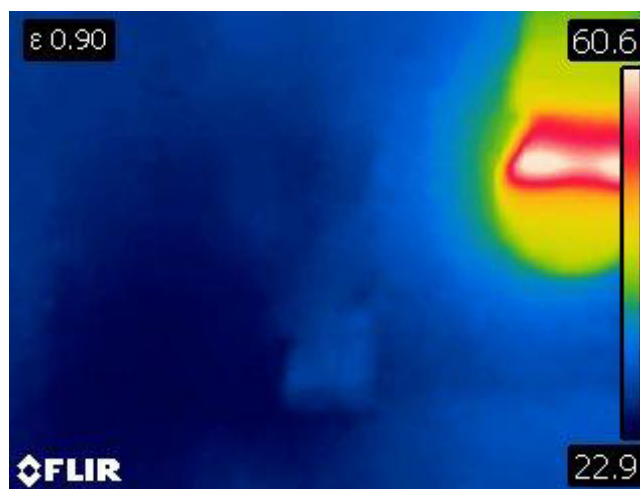


Рисунок 4.31 – Термограма скляної пластини з дистанції 25 см

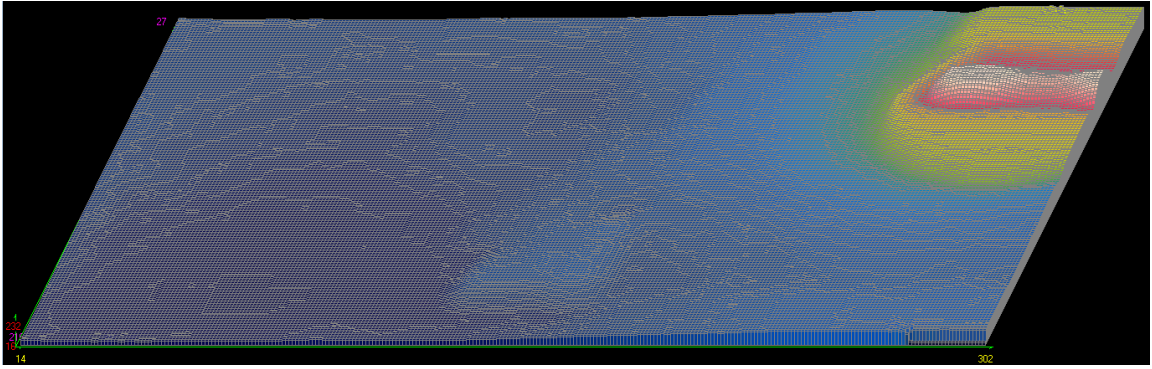


Рисунок 4.32 – Гістограма для термограми скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 25 см



Рисунок 4.33 – Термограма скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 50 см

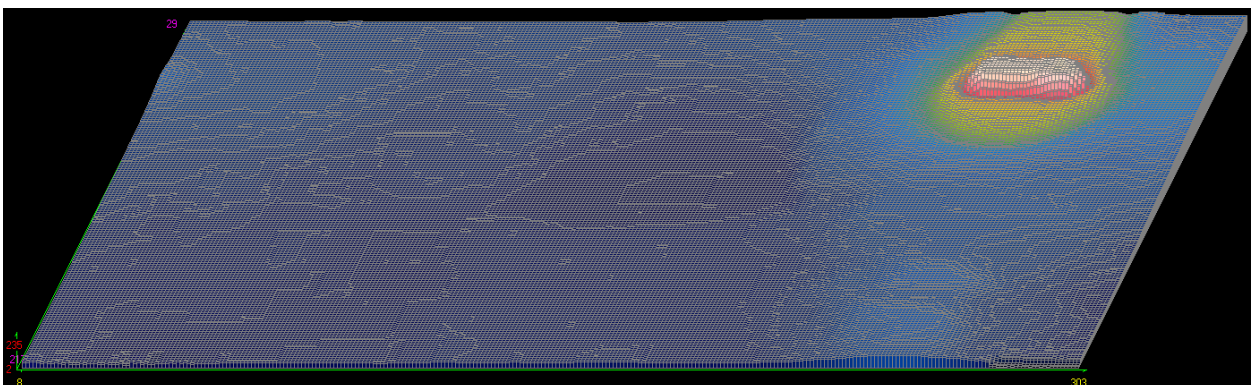


Рисунок 4.34 – Гістограма для термограми скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 50 см

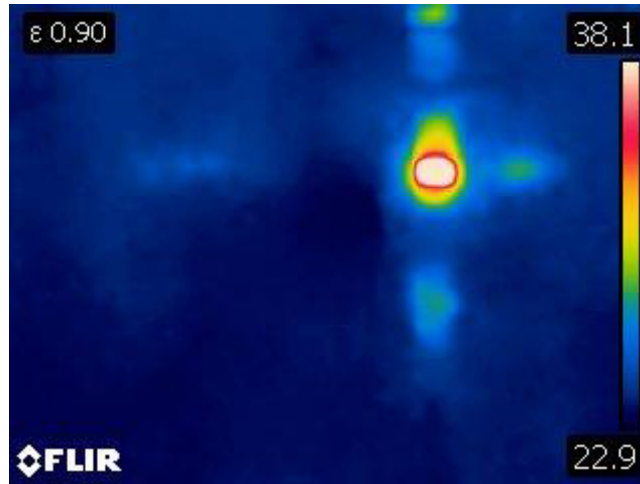


Рисунок 4.35 – Термограма скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 1 м

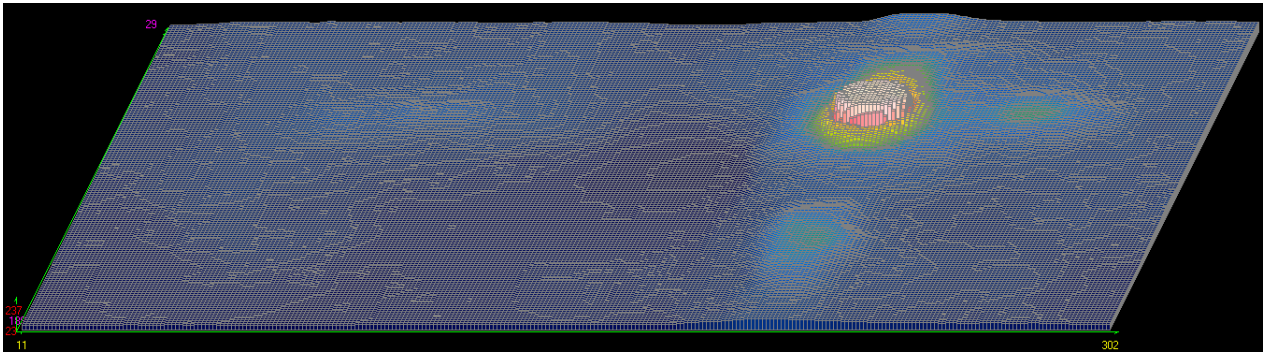


Рисунок 4.36 – Гістограма для термограми скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 1 м

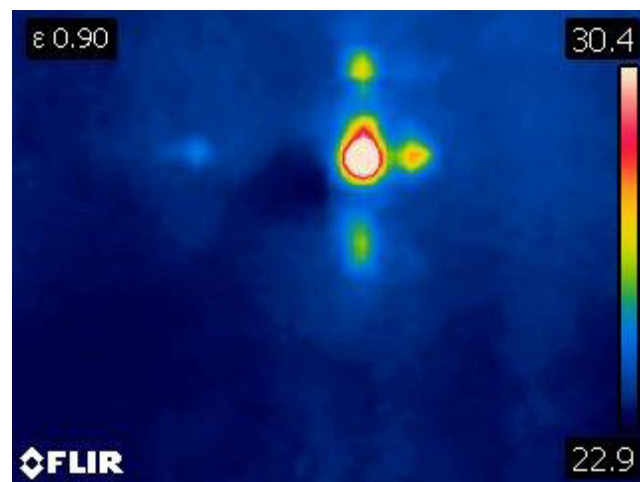


Рисунок 4.37 – Термограма скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 1,5 м

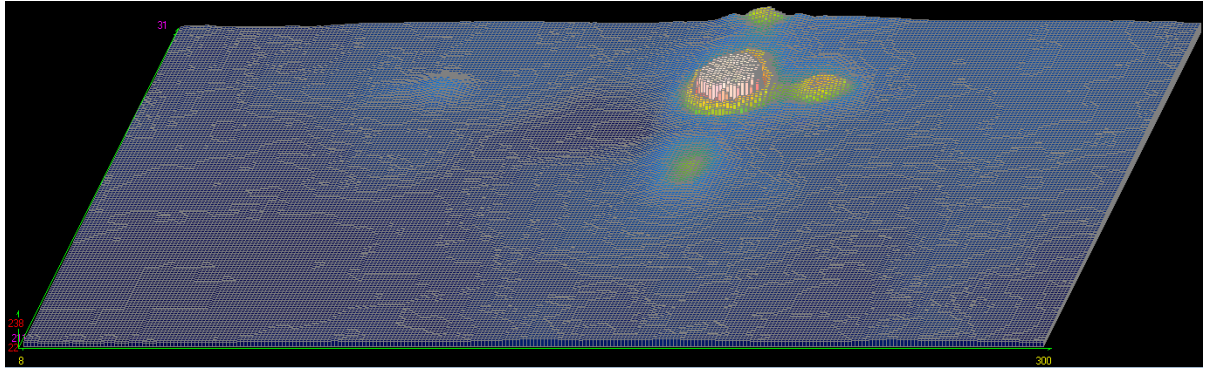


Рисунок 4.38 – Гістограма для термограми скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 1,5 м

Таблиця 4.6 – Відношення сигнал/шум для термограм скляної пластини з зовнішньою завадою

Дистанція, см	Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньо-квдратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
25	43,2	7,9	8,7	69,4
50	42,6	7,4	3,5	25,9
100	41,3	9,4	3,1	29,5
150	39,1	11,9	3,3	39,5

Проводимо зйомку об'єкта пластикова картка з різної дистанції.

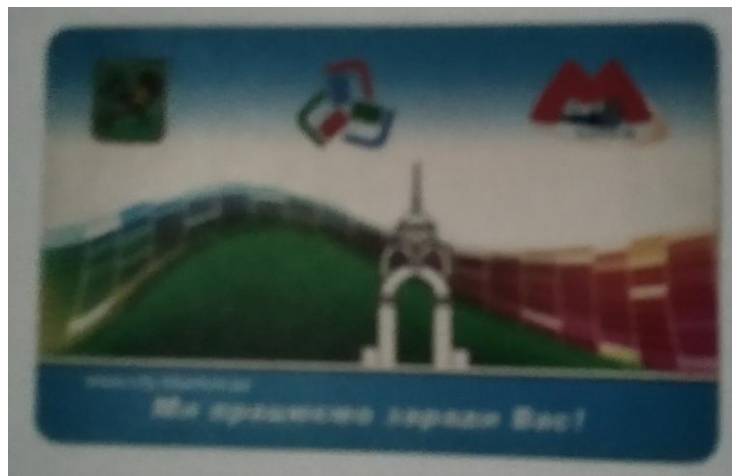


Рисунок 4.39 – Пластикова картка

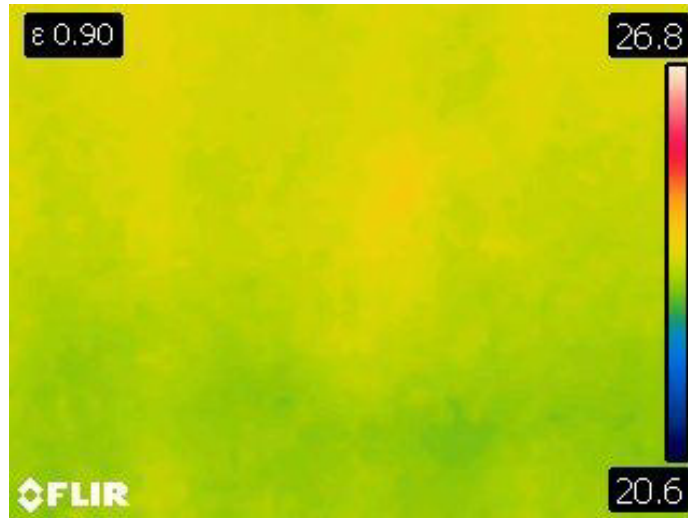


Рисунок 4.40 – Термограма пластикової картки з дистанції 25 см

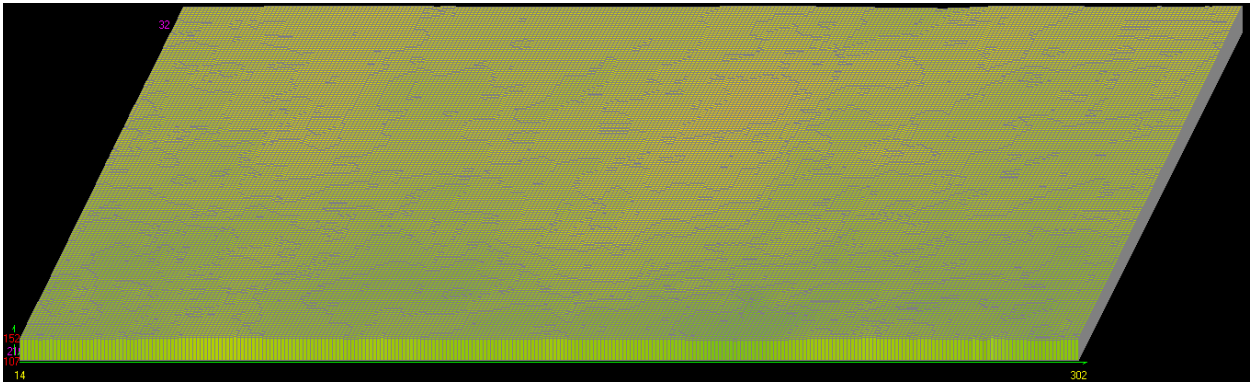


Рисунок 4.41 – Гістограма для термограми пластикової картки з дистанції 25 см



Рисунок 4.42 – Термограма пластикової картки з дистанції 50 см

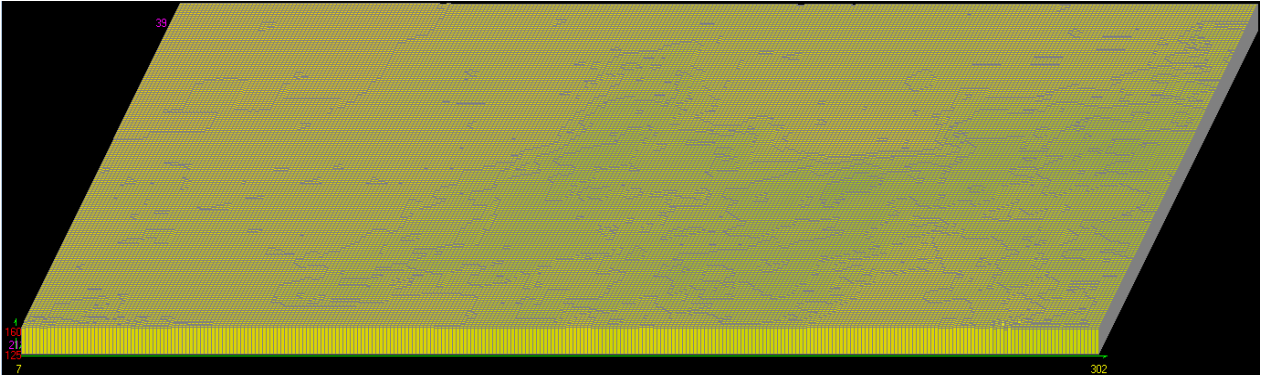


Рисунок 4.43 – Гістограма для термограми пластикової картки з дистанції 50 см



Рисунок 4.44 – Термограма пластикової картки з дистанції 1 м

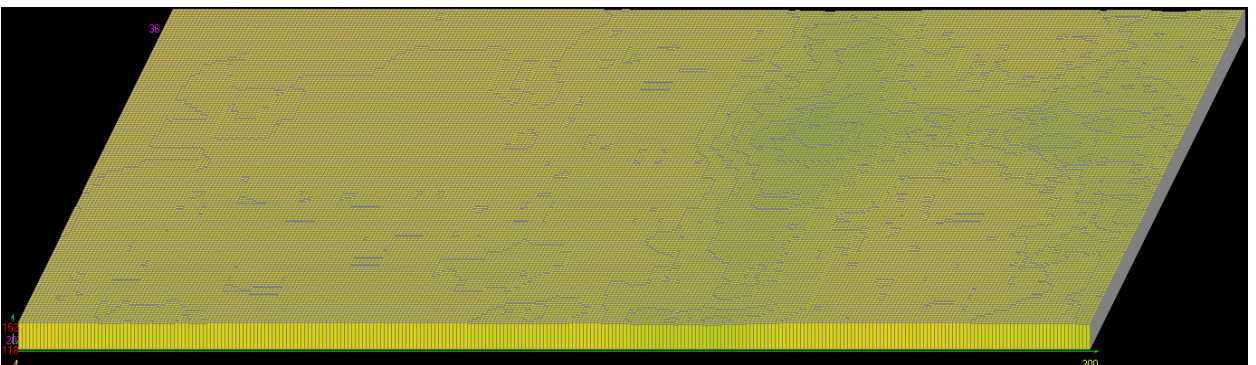


Рисунок 4.45 – Гістограма для термограми пластикової картки з дистанції 1 м



Рисунок 4.46 – Термограма пластикової картки з дистанції 1,5 м

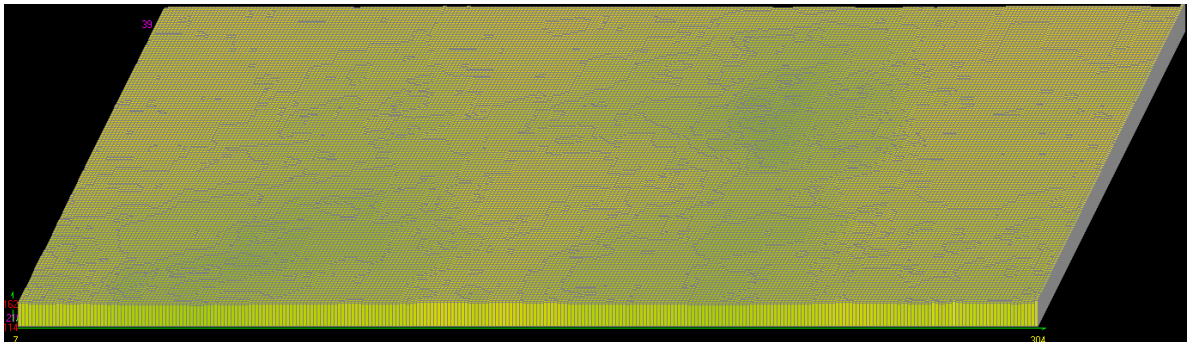


Рисунок 4.47 – Гістограма для термограми пластикової картки з дистанції 1,5 м

Таблиця 4.7 – Відношення сигнал/шум для термограм пластикової картки

Дистанція, см	Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньоквадратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
25	140,2	3,98	35,1	140
50	141,9	5,7	25	143
100	140	2,54	55	140
150	137,3	3,1	43	134,4

Проводимо зйомку об'єкта скляна пластина у випадку, коли поруч з об'єктом наявне зовнішнє джерело завад, з різної дистанції.

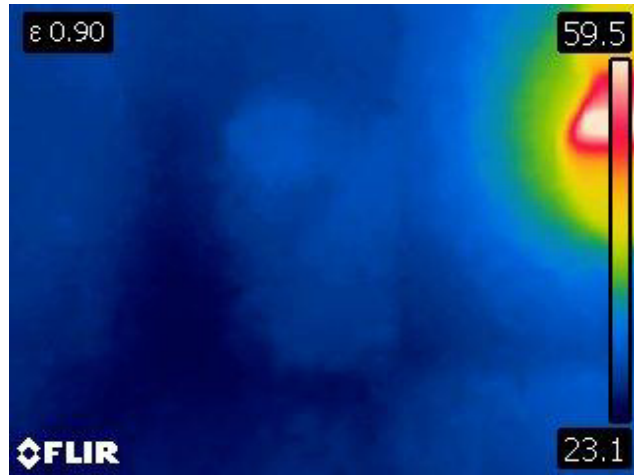


Рисунок 4.48 – Термограма скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 25 см

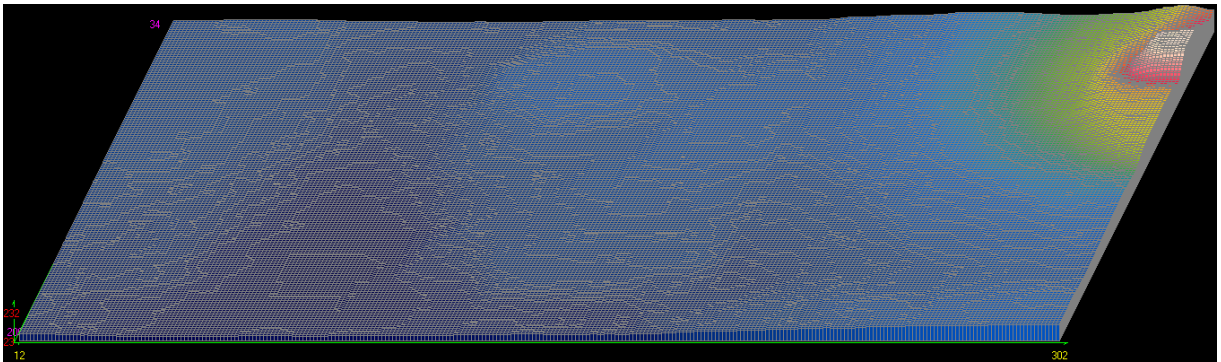


Рисунок 4.49 – Гістограма для термограми пластикової картки з зовнішньою завадою з дистанції 25 см



Рисунок 4.50 – Термограма скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 50 см

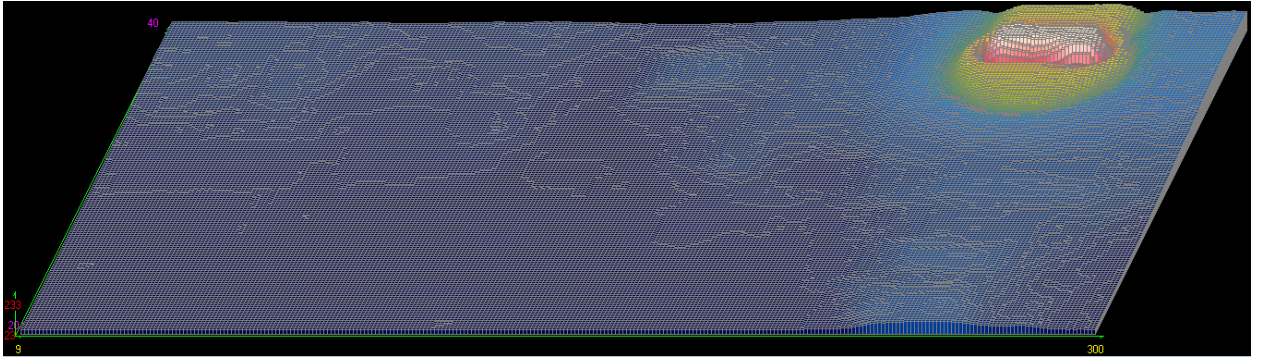


Рисунок 4.51 – Гістограма для термограми пластикової картки з зовнішньою завадою з дистанції 50 см

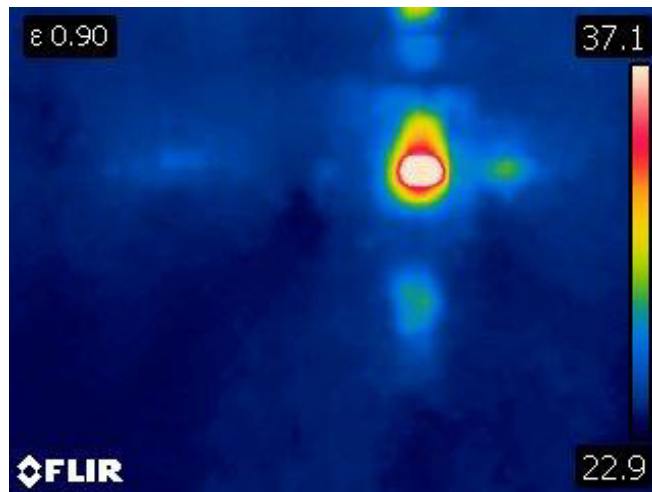


Рисунок 4.52 – Термограма скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 1 м

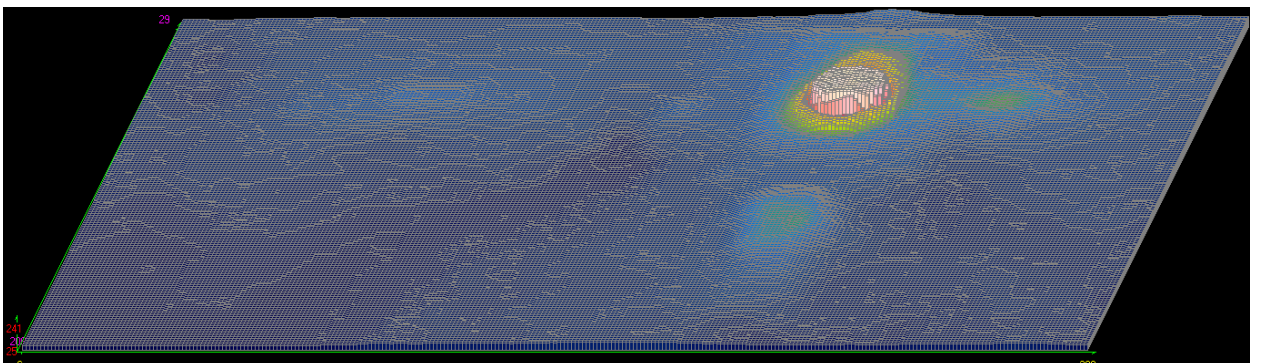


Рисунок 4.53 – Гістограма для термограми пластикової картки з зовнішньою завадою з дистанції 1 м

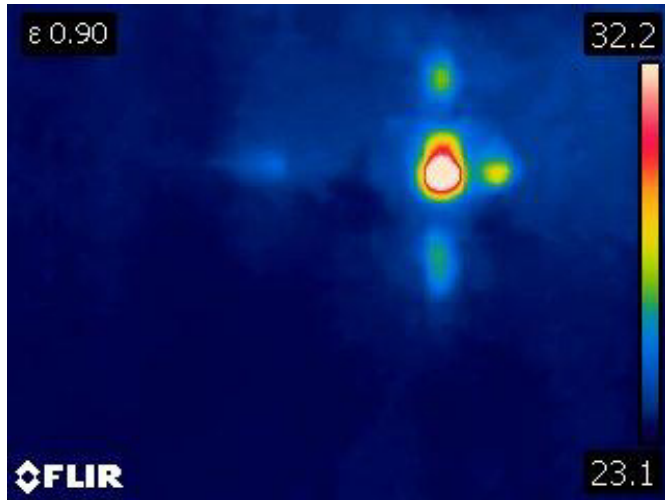


Рисунок 4.54 – Термограма скляної пластини з зовнішньою завадою з дистанції 1,5 м

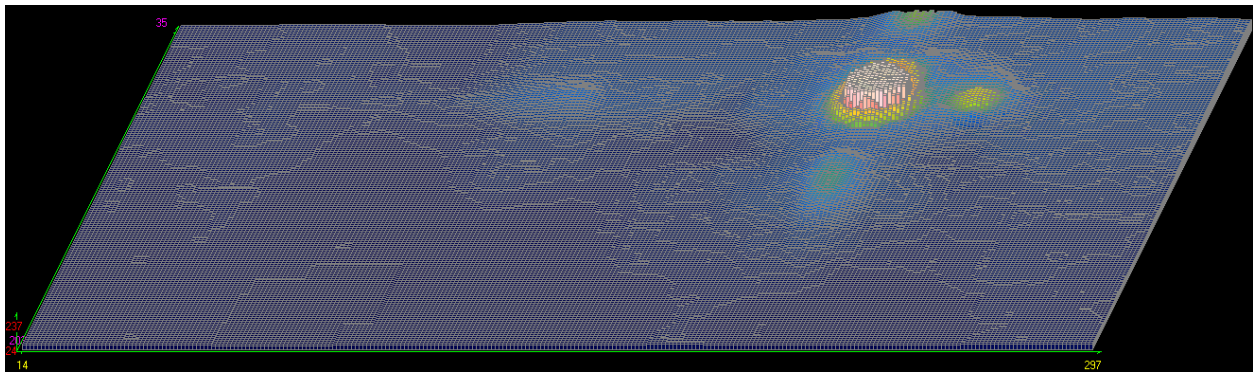


Рисунок 4.55 – Гістограма для термограми пластикової картки з зовнішньою завадою з дистанції 1,5 м

Таблиця 4.8 – Відношення сигнал/ шум для термограм пластикової картки з зовнішньою завадою

Дистанція, см	Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньо-квдратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
25	43,2	7,9	5,5	44
50	42,6	7,4	5,8	42,9
100	41,3	9,4	4,3	40,5
150	39,1	11,9	3,3	39,5

Знімаємо десять кадрів об'єкта металевий шків з відстані 50 см та розраховуємо відношення сигнал/ шум для отриманих кадрів.

Таблиця 4.9 – Відношення сигнал/ шум для кожної термограми

Середнє арифметичне шуму, $U_{ш}$	Середньоквадратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $U_c$
111,9	3,89	30,1	117,2
110,3	3,89	34	132,3
105,4	4,67	29,1	136
112,2	4,06	33,7	137
110,4	4,23	27,9	118,4
111,8	4,54	31,2	142
109,4	4,09	31,27	127,9
109,4	3,74	33,1	124
111,9	3,96	34	134,7
110,5	3,86	34,8	134,5

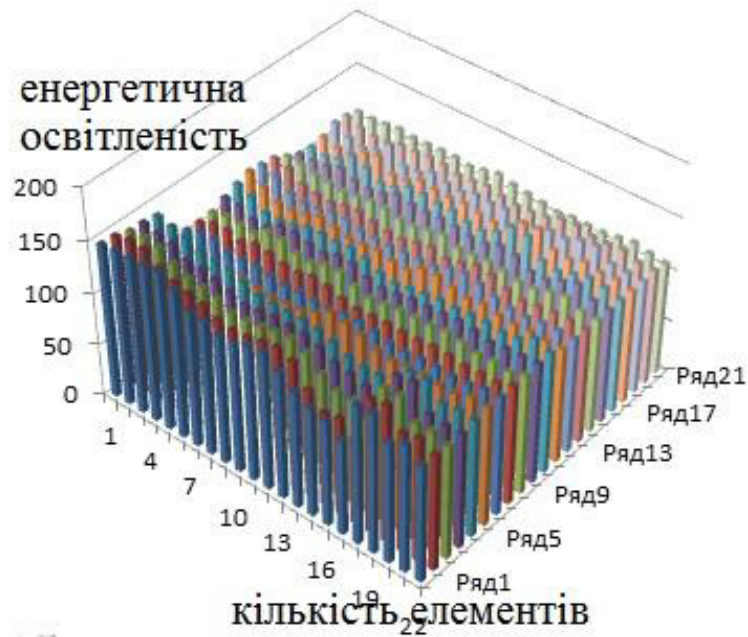


Рисунок 4.56 – Гістограма для одного кадру

Використовуємо метод накопичення для отриманих кадрів об'єкта металевий шків з відстані 50 см та розраховуємо відношення сигнал/шум за формулою 4.1. Отримані результати вносимо в таблицю 4.10.

Таблиця 4.10 – Відношення сигнал/шум з застосуванням методу накопичення для кадрів об'єкту металевий шків з відстані 50 см

Кількість кадрів	Середнє арифметичне шуму, $Uш$	Середньоквадратичне відхилення шуму, $\delta$	Відношення сигнал/шум, $\varphi$	Середнє арифметичне сигналу, $Uс$
1	111,9	3,89	30,1	117,2
2	111,6	2,79	44,4	124
3	109,2	2,25	57,1	128,5
4	110	2	65	130
5	110	1,84	69,5	128
6	110	1,87	69	129
7	110	1,64	78,5	128,9
8	110	1,48	86,6	128,3
9	110,3	1,41	91,4	129
10	110,3	1,34	97,3	130,4

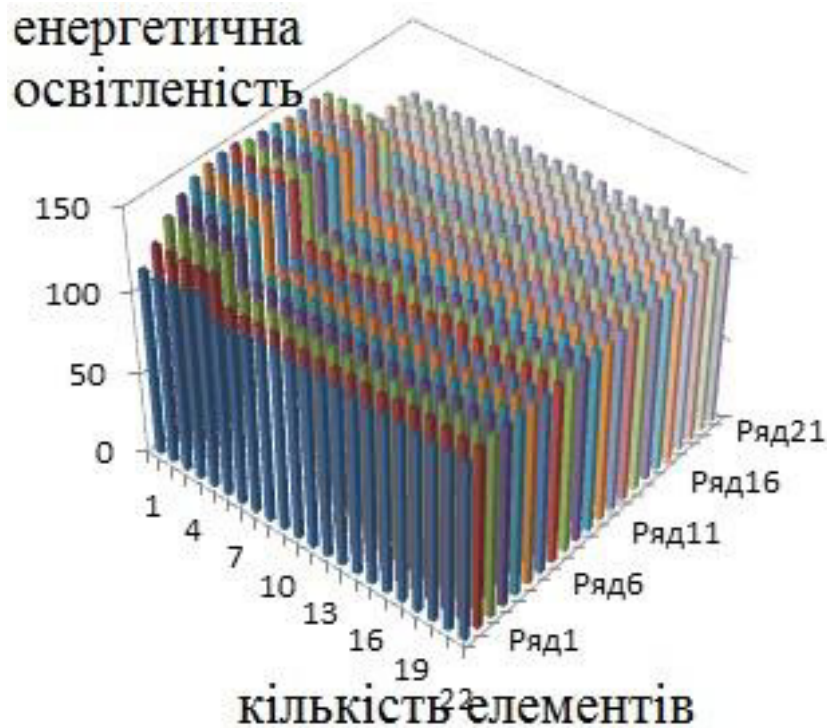


Рисунок 4.57 – Гістограма для десяти кадрів

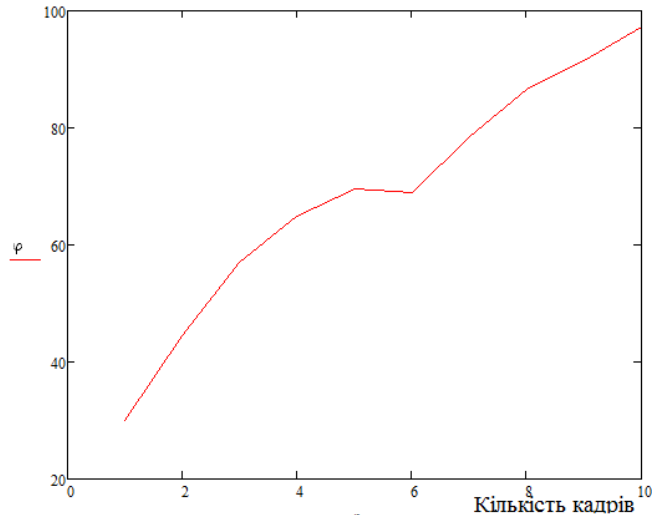


Рисунок 4.58 – Графік залежності відношення сигнал/шум від кількості кадрів

Зі збільшенням відстані від об'єкта зменшується ймовірність виявлення цього об'єкта, адже зменшується відношення сигнал/шум, що демонструється на рис. 4.59.

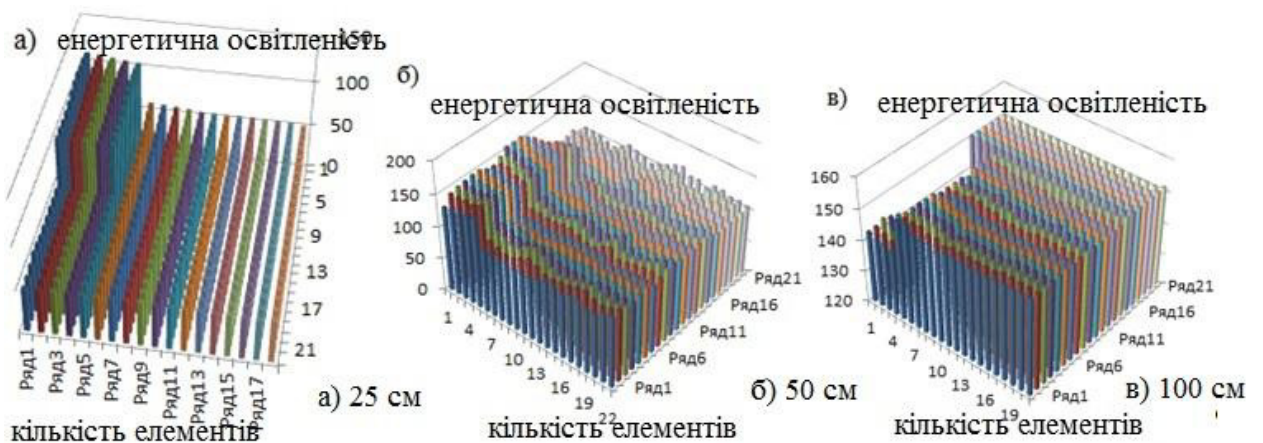
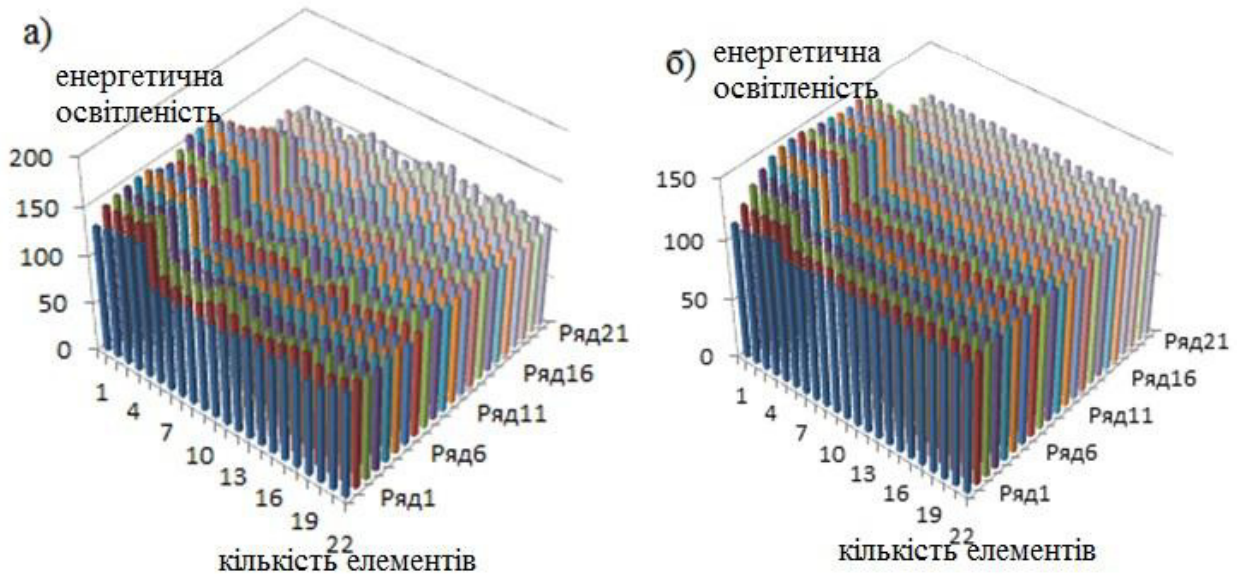


Рисунок 4.59 – Гістограма для кадрів об'єкта металевий шків знятих з різних відстаней

Застосування методу накопичення призводить до зменшення випадкових флуктуацій – тобто, до збільшення відношення сигнал/шум за рахунок зменшення дисперсії шуму, що продемонстровано на рис.4.60.



а) для одного кадру; б) після застосування методу накопичення.

Рисунок 4.60 – Гістограма об'єкта металевий шків з дистанції 50 см

Порівнявши відношення сигнал/шум для одного кадру об'єкта металевий шків з відстані 25 см та відношення сигнал/шум після застосування методу накопичення кадрів для десяти кадрів об'єкта металевий шків робимо висновок що після застосування методу накопичення відношення сигнал/шум зросло у три рази – що еквівалентно збільшенню дальності дії ТС у три рази.

Застосування методу накопичення непрямым шляхом впливає на збільшення дальності дії тепловізійних систем.

Метод накопичення призводить до зменшення дисперсії шуму і, як наслідок, до підвищення відношення сигнал/шум, що, в свою чергу, посилює контрастність – тобто збільшується різниця температур фону і об'єкту і саме це збільшення й виконує функцію підвищення дальності дії системи.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання атестаційної роботи було проаналізовано основні технічні характеристики, які впливають на дальність дії тепловізійних систем та проведено огляд різних методів збільшення дальності дії тепловізійних систем. Виявлено їх особливості, переваги та недоліки.

В даній атестаційній роботі було проаналізовано методи підвищення дальності дії тепловізійних систем з метою удосконалення існуючих методів, чи пропозиції нового методу підвищення дальності

У якості методу для збільшення дальності тепловізійних систем було обрано метод накопичування. Переваги цього методу: відсутність будь-яких змін у конструкції пристрою; можливість його застосування на існуючих системах; відсутність потреби у складних обчислювальних операціях, а тому й у потужних блоках обробної електроніки. Недоліки методу накопичення: довгий час експозиції і тому існує ймовірність відсутності спрацювання, якщо об'єкт дуже швидко покине зону огляду системи.

У процесі огляду тепловізійних систем став очевидним такий момент: не існує універсального методу збільшення дальності дії тепловізійних систем. Адже різні системи виконують різні завдання, і рішення прийнятні для військових приладів нічного бачення можуть бути зовсім непридатними для застосування у промислових системах.

Однією з основних умов вибору методу була можливість його застосування без зміни конструкції пристрою та великих фінансових витрат.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Кононюк А.Е Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта Книга 3 Зрительное восприятие изображений искусственным интеллектом Часть 4 Системы тепловидения как расширяющие средства зрения в СИИ. Киев, Украина: «Освіта України», 2017. – 480 с.
2. ГОСТ Р 8.619-2006 Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. – Введ. 2007-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 19 с.
3. Тепловізійна система Pulsar Quantum HD38S URL: <http://teplovizorgid.ru/teplovizor-pulsar-quantum-hd38s-texnicheskiexarakteristiki-otzyvy-i-seny/> (дата звернення: 7.11.2019)
4. Тепловізійна система Skanda 60 URL: [https://antiterror.com.ru/teplovizory-i-obnaruzhiteli-optiki?product\\_id=7138](https://antiterror.com.ru/teplovizory-i-obnaruzhiteli-optiki?product_id=7138) (дата звернення: 7.11.2019)
5. Тепловізійна система Infray Xeye E2n URL: <https://sotnyk.net/p1060974356-teplovizor-infray-iray.html> (дата звернення: 7.11.2019)
6. Тепловізійна система FLIR C2 URL: <https://etalonpribor.com.ua/flir-c2.html> (дата звернення: 7.11.2019)
7. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження. Київ, НТУУ «КПІ», 2007. – 363 с.
8. Грязин Г.Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства: Системы телевидения. Л. Машиностроение, 1988. – 224 с.
9. Колобродов В.Г., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підруч. для вузів. К.:Тираж, 1999. – 340с.
- 10.Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учебн. пособие для вузов. Л. Машиностроение, 1977. – 600с.

11. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учебн. пособие для приборостроительных вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. Л. Машиностроение, 1983. – 696 с.
12. Мосягин Г.А., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем: Учебник для студентов вузов по оптическим специальностям. М. Машиностроение, 1990. – 696 с.
13. Порфирьев Л.Ф. Основы преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Л. Машиностроение, 1989. – 387 с.
14. Тарасов М. М., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М. Логос. 2004. – 444 с.
15. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы (основы теории и расчета). М. Энергия, 1974. – 360 с.
16. Колобродов В.Г., Лихолит Н.И. к определению максимальной дальности обнаружения и распознавания тепловизионной системы БТТ// Артиллерийское и стрелковое вооружение. 2002. – Вып.5. - с. 35-39.
17. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для вузов. Л. Машиностроение, 1977. – 600 с.
18. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы (основы теории и расчета). М.: Энергия, 1974. – 360с.
19. Вафиади А. В. Аналитические модели сканирующих тепловизионных приборов// Оптический журнал 1997 – №1 – С.5–8.
20. Lei Lin, Benkang Chang. New apparent distance-detecting equation for low-lighting level imaging system// Optical Engineering. – 1998 – Vol.37. – №7 – p. 1902– 1913
21. Д.О. Патров, Т.А Стрелкова. «Исследование методов увеличения дальности тепловизионных систем», «SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT #22TECHNICS AND TECHNOLOGY», London, 2019, с.32-35.
22. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. Техносфера. 2005. – 1072 с.

23. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь. М. Высшая школа, 1978. – 524 с.
24. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М. Радио и связь, 1989. – 496 с.
25. Наливайко В.И., Покровский А.Н, Пономарев М.А, Абель О. Я., Соснов А. Н. Использование халькогенидных материалов для решения задач современных оптических технологий // Сб. матер. Междунар. науч. конгресс Интерэкспо Гео-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгресс 10–20 апреля 2012. – Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника и нанотехнологии»: Сб. матер. в 2 т. Т. 1. Новосиб: СГГА, 2012. – С. 121 – 125.
26. Н.Кульчицкий, А.Наумов, В.Семенов Современные опто-электронные приборы на основе селенида цинка // Фотоника. Выпуск №6. 2015. – С. 90 – 99.
27. Ульянова Е.О., Алдохин П.А. ИК-объективы для широкоформатных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств диапазонов 3-5 мкм и 8-12 мкм // Интерэкспо гео-сибирь. Новосибирск. Сибирский государственный университет геосистем и технологий . 2014 – №1. – С. 32 – 36
28. Стрелков О.І., Барсов В.І., Соломко Є.О. Дослідження стійкості алгоритму стискування зображень WAVELET до впливу завад випадкового характеру. // Системи озброєння і військова техніка. Х. ХУ ПС. 2007 – №2 (10). – С.104-106.
29. Стрелков А.И., Лисовенко С.А., Панасенко Д.П. Обработка серии короткоэкспозиционных слабоконтрастных телевизионных кадров // Зб. наук. праць ХУ ПС.Х. ХУ ПС. 2006 – №6 (12). – С.46-49.
30. Стрелков А.И., Барсов В.И., Стрелкова Т.А., Кац Е.Н. Оценка эффективности метода накопления серии короткоэкспозиционных слабоконтрастных телевизионных сигналов // Зб. наук. Праць ХУ ПС. Х. ХУ ПС. 2007. – №1 (13). – С.44-47.

31. Стрелков А.И., Кальной С.Е., Барсов В.И., Соломко Е.А. Об эффективности метода накопления слабоконтрастных кадров при цифровой обработке изображений с использованием алгоритма сжатия Wavelet. // Системи обробки інформації. 2008. – № 3(70). – С. 136-138.

32. Kass M., Witkin A. and Terzopoulos D. "Snakes: Active Contour Models" // International Journal of Computer Vision. 1987. Vol. 1. pp. 321-331.