

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)

(позначення документа)

Методи поліпшення дальності виявлення ІЧ випромінювання об'єктів
тепловізійною системою
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ЕППМ 19-1

Сгіян Г.Д.

(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 доц.каф МЕЕПП Фролова Т.І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2020

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 Єгіяну Григорію Давидовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «МЕТОДИ ПОЛІПШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ІЧ
ВИПРОМІНЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОВІЗІЙНОЮ СИСТЕМОЮ»

затверджена наказом по університету від 06 11 2020 р. № 1561

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Матриця DALI FPA 640 P15: тип приймача aSi, спектральний діапазон 8-14 мкм, шаг
пікселю 25 мкм, роздільна здатність 640 X 480, дистанція виявлення 1200 м, розмір 32 X 23.5
X 7.6мм, діапазон робочих температур від -40 до +60° C

Тепловізор Pulsar Axion Key XM22 : тип приймача aSi, спектральний діапазон 8-14 мкм, шаг
пікселю 20 мкм, роздільна здатність 320 X 240, дистанція виявлення 950 м, розмір 30 X 21 X
7мм, діапазон робочих температур від -40 до +50° C

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Сучасні тепловізійні системи

2 Методи поліпшення дальності дії тепловізійних систем і принцип їх дії в різних
галузях використання

3 Принцип роботи тепловізійної системи

4 Розрахунок нової оптичної системи»

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури по тематиці дипломного проекту		Виконано
2	Дослідження сучасних тепловізійних систем		Виконано
3	Чисельний розрахунок формули дальності дії тепловізійної системи, складання алгоритму		Виконано
4	Аналіз та перевірка роботи алгоритму		Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки		Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів		Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії		Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи		Виконано

Дата видачі завдання ____ листопада ____ 2020 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 53 с., 21 рис., 3 табл., 2 додатки., 24 джерела.

ДАЛЬНІСТЬ ДІЇ, ДІАПАЗОН, ІНФРАЧЕРВОНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, МАТРИЦЯ, ОПТИЧНА СИСТЕМА, СЕНСОР, ТЕПЛОВІЗОР.

Об'єкт дослідження – процес реєстрації оптичного випромінювання ТС.

Предмет дослідження – виявлення та розпізнавання об'єктів в ІЧ діапазоні.

Мета роботи – поліпшення дальності виявлення ІЧ випромінювання об'єктів тепловізійною системою.

Метод дослідження – аналітичний, експериментальний.

При виконанні атестаційної роботи були розглянуті сучасні тепловізійні системи. Проаналізовано останні розробки в області ІЧ-випромінювання. Розроблено та розраховано алгоритм розрахунку дальності дії тепловізійної системи. Розроблено тепловізор на основі нової мікроболометричної матриці.

Отримані результати свідчать про актуальність розвитку даного напрямку та вказують на перспективу дослідження в цій сфері.

ABSTRACT

The explanatory note of the master's graduation project contains: 53 pages, 14 figures, 21 appendices, 3 tables, 24 sources.

RANGE OF ACTION, RANGE, INFRARED RADIATION, MATRIX, OPTICAL SYSTEM, SENSOR, THERMAL VISOR.

Object of research - The process of registration of optical radiation of the vehicle.

Subject of research – Detection and recognition of objects in the IR range.

The purpose of work – To improve the detection range of IR radiation of objects by thermal imaging system.

The research method – analytical, experimental.

During the certification work. The latest developments in the field of infrared radiation are analyzed. An algorithm for calculating the range of the thermal imaging system has been developed and calculated. A thermal imager based on a new microbolometric matrix has been developed.

The results obtained indicate the relevance of the development of this area and indicate the prospects for research in this area.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	8
ВСТУП	9
1 СУЧАСНІ ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ І ПРИНЦИП ЇХ ДІЇ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ВИКОРИСТОВУВАННЯ.....	10
1.1 Типи тепловізійних систем	12
1.1.1 Структурна схема ТС	16
1.1.2 Принцип роботи ТС	17
1.2 Методи поліпшення дальності дії тепловізійних систем.....	18
1.2.1 Процес збільшення роздільної здатності тепловізійної системи.....	19
1.2.2 Процес поліпшення оптичної системи.....	20
1.2.3 Процес охолодження матриці	22
1.2.4 Залучення процесу зменшення шумів.....	23
1.2.5 Покращення системи завадостійкості.....	24
1.2.6 Процес накопичення	24
1.2.7 Процес накладання контурів.....	25
1.2.8 Процес накладання телевізійного зображення	25
1.3 Фізико-математична модель ТС	26
1.4 Застосування сучасних ТС в різних галузях	31
1.5 Висновки	34
2 РОЗРАХУНОК ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОВІЗІЙНОЮ СИСТЕМОЮ.....	35
2.1 Оптична система ТС	35
2.1.1 Матриця ТС.....	37
2.1.2 Вплив розміру матриці на результат роботи ТС.....	38
2.2 Постановка завдання.....	38
2.3 Розробка алгоритму розрахунку ТС	40

2.4 Математична модель.....	40
2.5 Висновки	45
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПОЛІПШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ	46
3.1 Результати розрахунку.....	46
3.2 Порівняння з аналогом	47
3.3 Висновки	49
ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	52
ДОДАТОК А	
ДОДАТОК Б	

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АЧТ – абсолютно чорне тіло

ВПС – Відео підсилювач

ВОП– відеооглядовий пристрій (монітор)

ЕПТ – електропроменева трубка

LW – long-wave

МВВ – метеорологічна відстань видимості

МВРТ – мінімальна виявлювальна різниця температур

МПФ– модуляційна передаточна функція

МРРТ – мінімальна роздільна різниця температур

МДД – максимальна дальність дії

МДВ – максимальна дальність виявлення

ОЕП – оптично-електронний прилад

ОС – оптична система

ОЕП – оптико-електронний прилад

ПВ – приймач випромінювання

ТС – тепловізійна система

ТПСС – тепловізійна система спостереження

ВСТУП

Тепловізійні системи є одним з найбільш важливих і популярних варіантів забезпечення безпеки в стратегічно важливих місцях. Концепція тепловізійних систем досить таки проста – пристрій починає отримувати тепло від випромінювання будь-якого об'єкта (автомобіля, людини або тварини).

На даний момент використання тепловізійних систем впливає на такі сфери людської діяльності, як: наука, техніка, теплоенергетика, будівництво, медицина, оборонні системи і комплекси. Поліпшення дальності виявлення ІК випромінювання об'єктів тепловізійною системою відіграє особливу роль в світлі зростаючих потреб сучасної науки і техніки і особливо актуально для оборонних систем. Існують різні класи тепловізорів, призначені для вирішення різних проблем, і отже не існує універсального методу збільшення дальності, а є ряд методів та технічних рішень, які застосовуються в залежності від типу проблеми і класу тепловізора.

В даній атестаційній роботі будуть проаналізовані методи поліпшення дальності виявлення ІК випромінювання об'єктів тепловізійною системою з метою модернізації методів які використовуються на даний момент.

Існує безліч способів поліпшення дальності виявлення ІК випромінювання об'єктів тепловізійною системою, але всі вони мають різні характеристики і недоліки. Їх практичне застосування виявляє: досить високу ціну тепловізійного приладу; складність масового виробництва; непрактична конструкція; використання енергоємних систем.

Мета дипломної роботи: дослідження методу поліпшення дальності виявлення ІК випромінювання об'єктів тепловізійною системою, який дозволить: знизити вартість пристрою; спростити якомога більше конструкцію пристрою, для того щоб запуснути його в масове виробництво; підвищити надійність пристрою.

1 СУЧАСНІ ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ І ПРИНЦИП ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ

Будь-який об'єкт, нагрітий до певної температури, починає випромінювати електромагнітні хвилі [1]. У загальному випадку потік випромінювання залежить від температури об'єкта та випромінюючої і відбиваючої здатності його поверхні. Для характеристики теплового поля користуються значенням ефективної температури поверхні, яка дорівнює температурі абсолютно чорного тіла (АЧТ), яке створює еквівалентний потік випромінювання. Інфрачервоне випромінювання об'єктів містить інформацію про їх розміри, форму та місцезнаходження у просторі, а також про процеси, які відбуваються у них.

Основним завданням тепловізійної системи (ТС) є перетворення невидимого інфрачервоного випромінювання тепло-контрастних об'єктів спостереження в аналог видимого зображення на екрані відеооглядового пристрою (ВОП) для їх виявлення, розпізнавання та дослідження.

Оскільки теплове зображення формується, в основному, за рахунок власного випромінювання об'єктів та фонів, які мають різний розподіл по поверхні температури та коефіцієнта випромінювання, то воно істотно відрізняється від свого аналога у видимій області спектра. Наприклад, теплове (інфрачервоне) зображення не має тіней, що утруднює просторове сприйняття об'єктів. Крім того, для більшості об'єктів і фонів відсутній взаємозв'язок між коефіцієнтом відбиття та температурним полем і коефіцієнтом випромінювання. Однак теплове поле звичайно відповідає формі та розмірам об'єкта, що дозволяє розпізнавати об'єкти по їхнім контурам [1].

Головні характеристики тепловізійних систем:

- температурна чутливість [$^{\circ}\text{C}$];
- діапазон вимірюваних температур [$^{\circ}\text{C}$],
- частота кадрів [Гц],
- робоча температура [$^{\circ}\text{C}$],

- спектральний діапазон [мкм],
- формат кадру та бітність цифрового зображення, система запису термограм [1].

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 навколишній його 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'єктів. 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 різнорідними чинниками (площа зони пошуку, освітленість в кабіні спостерігача, вібрації зображення або спостерігача, допустимий час пошуку).

В даний час для фіксації інфрачервоного випромінювання використовують матричний приймач випромінювання (матриця в фокальній площині, ФРА) – це пристрій отримання зображення, що складається з масиву (зазвичай прямокутного) чутливих до випромінювання пікселів, розташованих в фокальній площині об'єктива. Типові матричні приймачі випромінювання сучасних тепловізорів мають розмір від 16x16 до 640x480 пікселів. Піксель є найменшим окремим елементом матричного приймача випромінювання, який може вловлювати інфрачервоне випромінювання [2].

1.1 Типи тепловізійних систем

В залежності від мобільності ТС розділяються на:

– стаціонарні, їх використовують на промислових підприємствах для управління технологічними процесами в діапазоні температур від -20 до $+20000$ ° С. Такі моделі, як правило, мають азотне охолодження, щоб гарантувати нормальну роботу приймальних пристроїв. В основі таких систем лежать тепловізори третього покоління, встановлені на масивах напівпровідникових фотоприймачів. [3].

– переносні, необхідність відмовитися від використання дорогої і громіздкою охолоджуючої техніки привела до розробки в області застосування тепловізорів на базі неохолоджуваних мікроболометрів з кремнію. Ці прилади мають всі переваги своїх попередників, таких як малий крок вимірюваної температури ($0,1$ ° С), при цьому дозволяють застосовувати тепловізори в складних оціночних роботах, коли простота використання і портативність грають дуже велику роль. Головна перевага цих приладів - компактність, завдяки чому їх можна застосовувати в складних оціночних умовах [3].

В залежності від сфери використання:

– вимірювальні, використовуються для енергетичного аудиту, контролю.

– спостережні, їх застосовують для систем охорони і полювання. Тепловізори для туризму та полювання дають можливість вести ефективне спостереження за тваринами на дистанціях до 1500м, навіть через густий чагарник, і здійснювати підготовку табору (вибрати безпечне місце). Тепловізори для служб охорони володіють потужними об'єктивами і здатні виявляти предмети приймають тепло від людини (зброя) як найяскравішим днем, так і самої темної ночі. На рис 1.1 наведені типи сучасних тепловізорів, а на рис 1.2 представлені області використання даних ТС.



а) стаціонарний тепловізор, б) переносний тепловізор,
в) вимірювальний тепловізор, г) спостережний тепловізор

Рисунок 1.1 – Типи сучасних тепловізорів

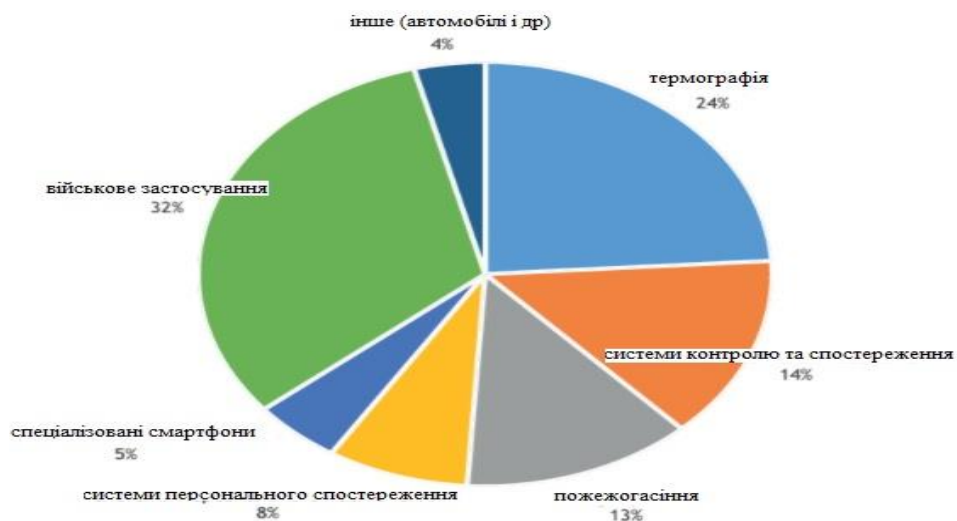


Рисунок 1.2 – Области використання ТС

Іч-спектр поділяють [4] на три ділянки, відповідно відокремлюють типи та класи та приймачі які його сприймають (рис 1.3).



Рисунок 1.3 – Типи та класи приймачів

На сьогоднішній день існують дві тенденції в розвитку тепловізійних пристроїв. До першої групи приладів відносяться тепловізори, в яких для перетворення оптичного сигналу ІК-діапазону в електричний сигнал використовується принцип оптико-механічного сканування (ОМС), а до другої групи приладів - тепловізори з електронним скануванням. У тепловізорах першого типу використовуються одноелементні або багатоеlementні ІК приймачі випромінювання (ПВ) миттєвої дії, а в тепловізорах другого типу в якості ПІ використовуються матричні приймачі випромінювання, так звані фокальні матриці, що працюють в режимі накопичення зарядів і засновані на різних фізичних принципах.[5]

На рис.1.4 представлена узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІК матрицею.

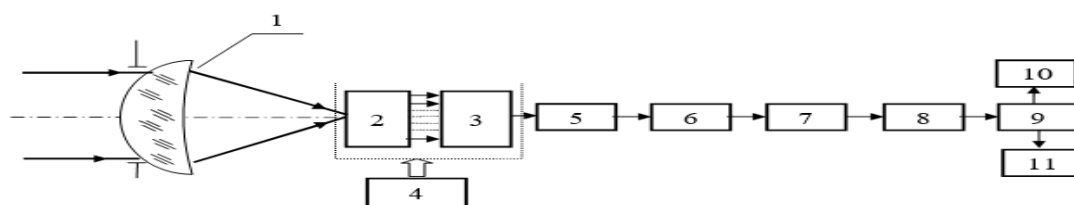


Рисунок 1.4 – Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею

На схемі зображено: 1 - оптична система; 2 - фокальна матриця з підсилювачами; 3 - мультиплексор; 4 - система охолодження; 5 - коректор

неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 - аналого-цифровий перетворювач; 7 - цифровий коректор неоднорідності; 8 - коректор неработаючі осередків; 9 - формувач зображення; 10 - дисплей; 11 - цифровий вихід.[5]

Фокальні ІК матриці можуть мати розмірність 128x128, 256x256 і навіть 512x512 елементів при розмірі цих чутливих елементів 30x30 мкм². Фокальні матриці виготовляються як функціонально закінчені фотоприймальні пристрої (ФП), що включають систему охолодження, підсилювачі, мультиплексор, коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів, аналого-цифровий перетворювач, блоки цифрової обробки і формувач вихідних сигналів. Сигнали з виходу такого ФП можуть передаватися на відеоконтрольний пристрій телевізійного типу або в цифровому вигляді в блоки цифрової обробки. На даний момент більшість передають перевагу матричним тепловізійним системам. До матричних тепловізійних систем можна віднести Dali і FLIR SC7000.[5]

На рис.1.5 представлена узагальнена функціональна схема тепловізора з системою ОМС.

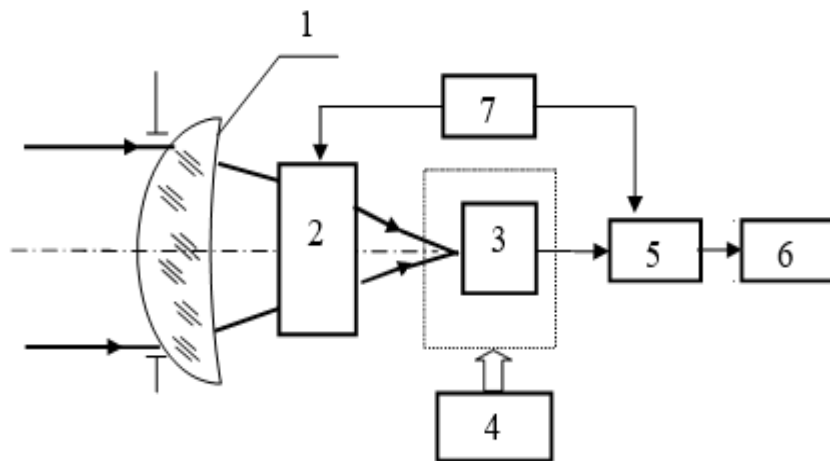


Рисунок 1.5 – Узагальнена функціональна скануючого тепловізора

На схемі зображено: 1 – оптична система; 2 – блок оптико-механічного сканування; 3 – приймач випромінювання; 4 – система охолодження; 5 – електронний тракт; 6 – відеоконтрольний пристрій; 7 – система синхронізації.

Система ОМС, в загальному випадку, повинна забезпечувати огляд простору предметів – сканування, як в напрямку рядків (по горизонту), так і по кадру (у вертикальному напрямку) [5].

Перевага систем сканування: усі точки термограми отримані за допомогою всього одного датчика (це тільки у випадку коли система одноелементна). Недоліком систем сканувань є: формування термограми відбувається досить довго та присутність механічних вузлів. До тепловізорів із системою сканування віднести Pulsar, Delta.

1.1.1 Структурна схема ТС

Стандартна система ТС складається (рис 1.6):

- оптична система (1). Задача полягає у фокусуванні та фільтрації випромінювання, що потрапляє із зовнішнього середовища;
- приймач оптичного випромінювання (2). Задача полягає у фіксації ІК-випромінювання і перетворенні його в електричний сигнал;
- електронний тракт (3). Використовується у ТС для передачі електричного сигналу;
- відео-контрольний пристрій (4). Перетворює електричний сигнал в форму, яка дозволяє сприймати отриману інформацію оператором.

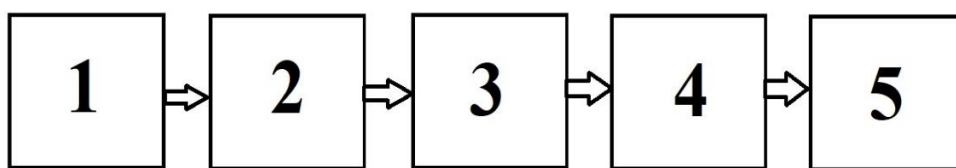


Рисунок 1.6 – Схема стандартної ТС

1.1.2 Принцип роботи тепловізійної системи.

Принцип дії тепловізійних систем виглядає наступним чином [2] :

Із зовнішнього середовища ІЧ випромінювання потрапляє в оптичну систему із спеціально підбраного матеріалу, який має спектральну характеристику, яка пропускає тільки ІК-випромінювання. В оптичній системі

відбувається фокусування випромінювання, що надходить із зовнішнього середовища. Відфільтроване і сфокусоване ІК-випромінювання потрапляє на приймач випромінювання, який фіксує ІК-випромінювання і перетворює його в електричний сигнал, у вигляді напруги. Напруга з фотоприймача передається за допомогою електронного тракту на відео-контрольний пристрій, який перетворює електричний сигнал в форму, зручну, для сприйняття отриманої інформації людиною. Отримана термограма сприймається оператором.

Інфрачервона термографія - це наука використання електронно - оптичних пристроїв для реєстрації і вимірювання випромінювання і зіставлення його з температурою поверхонь. Випромінювання - це передача тепла у вигляді променевої енергії (електромагнітних хвиль) без проміжної середовища, використовуваної для передачі. Сучасна інфрачервона термографія використовує електронно-оптичні пристрої для вимірювання потоку випромінювання і обчислення температури поверхні обстежуваних конструкцій або обладнання. Нижче представлена функціональна схема узагальненої ТС (рис1.7).

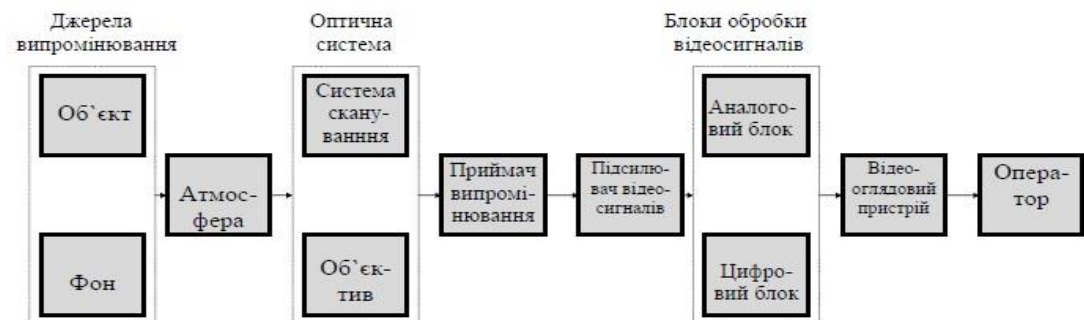


Рисунок 1.7 – Функціональна схема узагальненої ТС

1.2 Методи поліпшення дальності тепловізійних систем

Дальність виявлення - максимальна відстань між точковим об'єктом спостереження і тепловізором, при якому вихідний сигнал останнього перевищує в задане число t раз середньоквадратичне значення шуму. Цей

параметр залежить від великої кількості факторів (характеристик тепловипромінюючого об'єкта, стану атмосфери, характеристик фону, на якому знаходиться спостережуваний об'єкт) [2]. На рис 1.8 представлено приклад дальності виявлення.



Рисунок 1.8 – Дальність виявлення тепловізора

Максимальна дальність виявлення – один з основних параметрів тепловізійної системи, що використовується для виявлення і спостереження віддалених об'єктів, випромінюючих тепло [2].

На максимальний діапазон тепловізійної системи комплексно впливає ряд параметрів, одним з яких є дозвіл тепловізійної системи [5]. Є одним з головних параметрів тепловізора при використанні його для виявлення і спостереження віддалених тепловипромінюючих об'єктів [2].

Наразі існують такі способи поліпшення дальності тепловізійних систем:

- 1 – процес збільшення роздільної здатності тепловізійної системи;
- 2 – процес поліпшення оптичної системи;
- 3 – процес охолодження матриці;
- 4 – залучення методики зменшення шумів;
- 5 – покращення системи завадостійкості;
- 6 – процес накопичення;
- 7 – процес накладання контурів;

8 – процес накладання телевізійного зображення.

Одні і ті ж проблеми можуть бути вирішені різними методами і мати однаковий кінцевий результат. Різниця в складності, енергоспоживанні і вартості використовуваних методів.

У кожного процесу є свої переваги, особливості та недоліки. Цілеспрямованість використання того чи іншого методу визначається багатьма факторами, такими як: споживання енергії; наявність процесора, здатного виконувати велику кількість обчислень за короткий час; масогабаритні параметри готового пристрою; використання спеціальних матеріалів для виготовлення лінз, наявність готових елементів і вартість готової системи.

1.2.1 Процес збільшення роздільної здатності тепловізійної системи. Роздільна здатність в тепловізійних системах де застосовується матричний детектор випромінювання встановлюється загальною кількістю елементів матриці, а саме - пікселів. Зрозуміло, що чим більше пікселів в масиві, тим вище роздільна здатність тепловізійної системи.

А збільшення роздільної здатності (тобто підвищення елементів матриці) дає можливість отримувати більш точні уявлення спостережуваних об'єктів.

Спосіб збільшення роздільної здатності системи закладається в використанні фоточутливої матриці з великою кількістю елементів, а саме, замість звичайної матриці 320×240 пікселів, поставити характерну матрицю 640×480 пікселів.

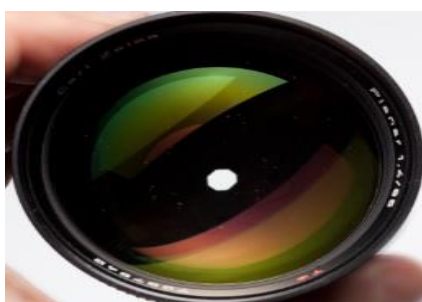
Використання матриці з великою кількістю елементів приводить до необхідності зміни конструкції пристрою, оскільки матриця з великою кількістю елементів має різні параметри маси та розміру, що рівним чином, наполягає розробити нові конструкторсько-технічні рішення – і, у зв'язку з цим, створити сучасну ТС.

Збільшення роздільної здатності системи дає можливість більш точно визначати форму об'єкта; дозволяє ідентифікувати порівняно невеликий об'єкт на порівняно великій відстані. Чим більше пікселів в приймальнику випромінювання, тим більш докладно, детально і ясно представлені

вимірювальні об'єкти. Разом з цим, збільшення кількості елементів в матриці збільшує ймовірність невірних спрацьовувань в системі і наполягає на застосуванні сучасних конструктивних і технічних рішень.

1.2.2. Процес поліпшення оптичної системи. Важливим місцем в процесі прийняття тепловізійного зображення є узгодження оптичних властивостей і лінз. Приведення в потрібну відповідність властивостей оптичних сенсорів і лінз передбачає впровадження матеріалів лінз і оптичних сенсорів з найбільш близькими спектральними характеристиками, тобто максимальне пропускання лінзи має бути в межах робочого діапазону, оптичного сенсору.

Сутність процесу передбачає використання сучасних матеріалів для виготовлення лінз тепловізійних систем. Тому сьогодні більшість лінз для тепловізійних систем виробляються із Кременію, Германію, Селеніду Цинку і халькогенідного скла. На рис 1.9 представлені лінзи із різних матеріалів: лінза з германію, лінза з халькогенідного скла, лінза з кремнію, лінза з селеніду цинку



а)



б)



в)



г)

а) лінза з германію, б) лінза з халькогенідного скла, в) лінза з кремнію, г) лінза з селеніду цинку

Рисунок 1.9 – Лінзи із різних матеріалів

Удосконалення оптичної системи дає можливість підвищити спектральні характеристики пропускання, що доводить до пропускання виключно інфрачервоного випромінювання, що явно знижує «помилковому радіовипромінюванню» фотоматриці. Застосування спеціальних матеріалів дає можливість з максимальною точністю встановити межу робочих діапазонів довжини хвилі.

Слід зазначити, що існує набагато більше прозорих матеріалів в інфрачервоному діапазоні, але далеко не всі з них рекомендується застосовувати в якості матеріалів для оптики призначених для тепловізійних систем. Але використання рідкісних і важкодоступних матеріалів значно збільшує вартість системи. На рис 1.10 представлені оптичні матеріали та їх прозорість в ІЧ області спектра.

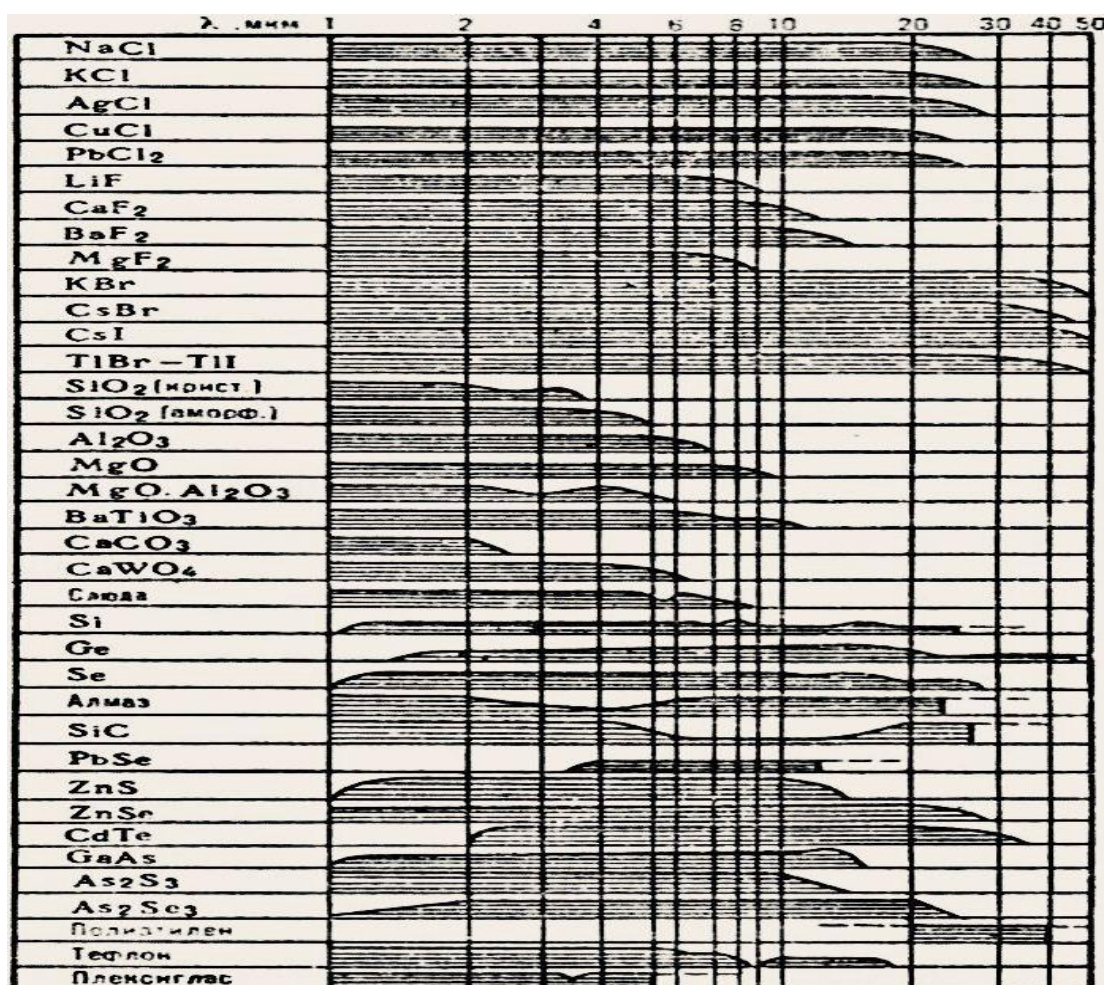


Рисунок 1.10 – Оптичні матеріали, прозорість в ІЧ області спектра

1.2.3 Процес охолодження матриці. Матриці із напівпровідників охолоджуються багатьма способами, наприклад можна використовувати охолодження азотом, охолодження термоелектричне а також охолодження із залученням механічних холодильних машин Стірлінга. [7].

Використання процесу охолодження приводить до зменшення теплового шуму фоточутливих матриць завдяки тому, що в будь-якому провіднику електричного струму, володіючому активним опором, при зниженні температури, відбувається зменшення хаотичного руху, рухомих носіїв заряду, в кожному провіднику електричного струму, кажучи іншими словами, зменшує можливість непередбаченої флуктуації сигналу, що рівним чином, підвищує співвідношення сигналу із шумом.

Процес охолодження матриці побічно впливає на поліпшення дальності дії тепловізійної системи. Даний метод приводить до зниження внутрішнього теплового шуму та в наслідок цього, до збільшення відносини сигнал / шум, який в свою чергу, покращує контраст, тобто різниця між температурами фону та об'єкту збільшуються, це підвищення і виконує функцію збільшення дальності дії тепловізійних систем.

Але використання системи охолодження в тепловізійних системах, значно збільшує їх вартість, збільшує конструкцію системи, та робить її громіздкою та неповоротною, завдяки цьому, область застосування звужується.

У тепловізійних системах із використанням процесу охолодження матриці значно підвищується дальність дії, але призводить до ускладнених конструкторсько – технічних рішень, підвищену енерговитратність та вартість. Завдяки цьому, у сучасних системах почали поступово обходитися без ПЗЗ – матриць, що потребують охолодження. Та почали долучати мікроболометричні матриці, які можуть працювати без охолодження, та з великою точністю дозволяють фіксувати будь-які зміни опору майже по всьому діапазону ІЧ випромінювання.

1.2.4 Залучення процесу зменшення шумів. В сучасних тепловізійних системах джерелами шуму можуть бути внутрішні власні шуми ТС системи, наприклад, генераційно – рекомбінаційний, тепловий та інші.

Процес зменшення шумів – це виведення шумів із корисних сигналів, за допомогою застосування конкретних електронних блоків для обробки, чи спеціальних алгоритмів роботи.

Зазвичай, до методики зменшення шумів можна віднести використання алгоритмів частотної та просторової фільтрацій.

Процес зменшення шумів можна реалізувати шляхом спеціальних, сучасних систем зменшення шумів, а саме систем для обробки сигналу, які використовують як програмні алгоритми або електронні схеми, які призначені для збільшення співвідношення сигнал/шум, завдяки зниженню розрядності сигналів або надмірності.

Реалізація методики зменшення шумів може дозволити зменшення фонового шуму; може виділяти порівняно невеликі об'єкти. Але може привести до ускладнення тепловізійної системи, різниться громіздкістю та складністю обчислень, в наслідок чого викликає високі вимоги до пристрою; а також при реалізації методики зменшення шумів, є вірогідність «зглажування» корисних сигналів.

1.2.5 Покращення системи завадостійкості. Покращення системи завадостійкості, це свого роду прийняття комплексних заходів, направлених на значне зменшення власних шумів обладнання шляхом реалізації елементів, із порівняно меншими власними шумами, застосування різних моніторів для ізоляції приладу від зовнішніх пошкоджень, а саме теплових і електромагнітних, а також скорочення довжин топології з'єднань. Поліпшення завадостійкості приводить до значного зниженню шумів приймального приладу, а також до поліпшення енерговитратності приладу та значне ускладнення системи.

1.2.6 Техніка накопичення. В основі техніки накопичення лежить збільшення часу експозиції. З максимальною тривалістю часу експозиції, на fotocутливу матрицю потрапить максимальна кількість фотонів, що в свою

чергу дає змогу виявляти об'єкт на більших дистанціях. Від граничної освітленості E_n залежить число випромінювання яке потрапляє на фоточутливу матрицю [7] :

$$E_n = \frac{\varphi \cdot \Phi \epsilon \cdot K(\Delta f) \cdot K_e}{A_{vx} \cdot K_p}, \quad (1.1)$$

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

K_e – коефіцієнт використання приймачем випромінювання еталонного джерела;

φ – відношення «сигнал/шум»;

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

A_{vx} – площа вхідного значка об'єктива ОЕП;

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

Реалізація техніки накопичення опосередковано впливає на поліпшення дальності дії тепловізійної системи. Метод приводить до спаду дисперсії шуму, а в наслідок цього також до підвищення співвідношення сигналу від шуму, що також посилює контрастність, кажучи іншими словами – підвищується температурна різниця між фоном та об'єктом, в свою чергу, саме це підвищення і виконує функцію поліпшення дальності дії пристрою.

1.2.7 Процес накладання контурів. В основі процесу накладання контурів лежить застосування математичного методу цифрового оброблення зображень, а саме алгоритму, який частково виділяє кордони об'єкту на зображенні, проаналізувавши знайдені обмеження.

Даний процес дає можливість набагато точніше визначити клас об'єкту під наглядом, але і збільшується можливість помилкового спрацювання приладу.

Алгоритм сегментації зображення також можна віднести до даного методу накладання контурів, тому що він дозволяє виділяти будь-які області на зображеннях. Також до даного методу можна віднести варіаційну техніку пошуку кордонів у зображенні. У цьому алгоритмі використовується модель активного контуру довільної форми, що має динамічний символ [8].

1.2.8 Процес накладання телевізійного зображення. Процес накладання телевізійного зображення складається з об'єднання двох зображень, отриманих з тепловізійної і оптичної камер. Використання даної техніки зводить до мінімуму можливе помилкове спрацьовування приладу. Але застосування цього методу призводить до збільшення енергоспоживання приладу і ускладнення системи в цілому та до подорожання системи.

1.3 Фізико-математична модель ТС

Загальні характеристики оптоелектронних тепловізійних систем (ОЕТП) або критерії якості є мірою успішного виконання завдань, що стоять перед системою, і враховують різні тактичні, технічні, експлуатаційні та техніко-економічні вимоги. У більшості випадків на практиці використовуються критерії якості, які можна розділити на наступні групи [9]:

- критерії якості зображення, яке сформовано в ОЕТП;
- технічні параметри і характеристики системи;
- показники ефективності досягнення мети, заради якої створено ОЕТП;
- техніко-економічні показники.

Якість зображення визначається такими показниками, як геометричний дозвіл або кутовий і лінійний поділ, функція передачі модуляції (МТФ).

Тактико-технічні характеристики і властивості визначають можливість вирішення проблем, з якими стикається ОЕТП в різних умовах експлуатації. Найбільш важливими з них є еквівалентна шумова різниця температур і мінімальна різниця температур (МРТ). Ці показники також включають в себе:

чутливість (порогову чутливість) динамічний діапазон яскравості, одержуваний ОЕТП; робочий спектральний діапазон; кутове поле зору; миттєве поле зору; пропорції (рамка), кількість роздільників і деякі інші.

Для оптико-електронних систем найбільш важливими узагальненими характеристиками є максимальна дальність виявлення (МДВ) і максимальна дальність розпізнання (МДР) із заданими ймовірностями виявлення. Ці властивості залежать від просторової роздільної здатності; енергетичної роздільної здатності; функції передачі сигналу; передавальної функції; освітленості; еквівалентної шуму; еквівалентний шумовий перепад температур; мінімальної виявлюваної різниці температур; мінімальної роздільної різниці температур; спектрального робочого діапазону; динамічного діапазону.

Сформулюємо визначення цих параметрів і характеристик:

Максимальна дальність виявлення (Maximum Detectable Range-MDR) R_d - це максимальна відстань між тепловізійною системою спостереження (ТПСС) і стандартним тестовим об'єктом, при якому тестовий об'єкт з'являється на екрані дисплея з заданою вірогідністю P_d в разі необмеженого часу спостереження. Нижче представлена формула дальності тепловізора [10].

$$l = \frac{hr_{\Sigma(v)}\Delta T_{paz}(T_r f_k)^2 C_2 D \times (d / f')^2 f' \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [S(\lambda)\tau_0(\lambda)\varepsilon(\lambda)W(\lambda, T)\lambda^{-1}]d\lambda}{6\sqrt{2k_3}T^2 \sqrt{\Delta f_R N_m}} \quad (1.2)$$

де D^* - питома виявлююча здатність приймача оптичного випромінювання (ПВІ);

$S(\lambda)$ - відносна спектральна чутливість ПВІ;

Δf_R - шумова смуга частот електричної схеми включення ПВІ;

(λ_1, λ_2) - межі спектральної чутливості ПВІ;

K_3 - коефіцієнт використання ПВІ випромінювання еталонного джерела;

m - відношення «сигнал / шум»;

- $W(\lambda, T)$ - спектральна світність АЧТ з температурою T ;
- $\varepsilon(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкту;
- $\tau_o(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи тепловізора;
- $\tau_a(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт пропускання шару атмосфери між об'єктом і приладом;
- C_2 - постійна в формулі Планка;
- T_e - постійна часу очі;
- f_k - частота кадрів тепловізора;
- ν - просторова частота в просторі предметів, мрад-1;
- $r_\Sigma(\nu)$ - результуючий модуль передавальної функції всіх ланок тепловізора;
- d - діаметр вхідної зіниці оптичної системи тепловізора;
- f' - заднє фокусна відстань оптичної системи тепловізора;
- N - критерій (число) Джонсона.

Якщо розглядати тепловізор як лінійну систему з послідовно розташованими ланками у вигляді оптичної системи, приймача оптичного випромінювання, електронного тракту, відеоконтрольного пристрою і очі оператора, то сумарний модуль $r_\Sigma(\nu)$ передавальної характеристики тепловізора представляється у вигляді:

$$r_\Sigma(\nu) = r_0(\nu) r_{пр}(\nu) r_{ин}(\nu) r_{син}(\nu) r_{в}(\nu) r_{ус}(\nu) r_{вкy}(\nu) r_{зл}(\nu) r_{см}(\nu), \quad (1.3)$$

де $r_0(\nu)$ - модуль передавальної функції (МПФ) оптичної системи тепловізора;

$r_{пр}(\nu)$ – МПФ приймальної площі ПВІ;

$r_{пр}(\nu)$ - МПФ інерційність елементів ПВІ;

$r_{син}(\nu)$ - МПФ синхронізації елементів зображення тепловізора;

$r_{в}(\nu)$ - МПФ вибірки по рядку і кадру;

$r_{ус}(\nu)$ - МПФ підсилювача сигналів ПВІ;

$r_{вкy}(\nu)$ - МПФ відеоконтрольного пристрою;

$r_{гл}(v)$ - МПФ очі оператора;

$r_{см}(v)$ - МПФ смаза в зображенні по рядку і по кадру

Максимальна дальність розпізнавання (Maximum Recognizable Range – MRR) R_r - це максимальна відстань між ТПСС і стандартним тестовим об'єктом, на якому тестовий об'єкт розпізнається на екрані дисплея з заданою вірогідністю P_r протягом необмеженого часу спостереження.

Для оптико-електронних систем важлива якість згенерованого зображення, яке суб'єктивно визначає спостерігач. Якість сприйняття одного і того ж зображення істотно відрізняється між спостерігачами, а також змінюється з часом для спостерігача. Отже, якість зображення не можна виміряти в абсолютних величинах. Існує безліч формул для оцінки якості зображення, кожна з яких виводиться емпіричним шляхом для конкретних умов перегляду. Все в тій чи іншій мірі використовують дві основні характеристики: просторову та енергетичну роздільну здатність [11].

Існують різні методики розрахунку МДВ та МДР, в основі якої лежить визначення відношення сигнал/шум на виході приймача випромінювання. Для визначення МДВ та МДР необхідно, перш за все, вказати тип об'єкти (цілі) і фону та їх характеристики, стан атмосфери, а також ймовірності виявлення та розпізнавання (рис. 1.11).

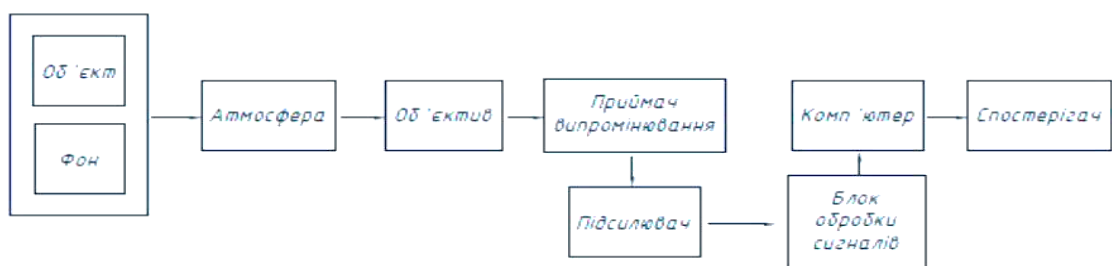


Рисунок 1.11 – Блок-схема фізико-математичної моделі

Просторова роздільна здатність - характеризує здатність системи розрізняти (розділяти) мінімальні просторові розміри об'єктів і їх елементів. У загальному випадку вона обмежена дифракцією оптичної системи (ОС), розміром чутливої області (пікселів) і кроком матричного детектора випромінювання МДВ, шириною смуги електронного тракту і дозволом монітора. Кожна з підсистем ТПСС характеризується своїм дозволом. Таким чином, дозвіл операційної системи оцінюється за допомогою критерію Релея або функції розсіювання точки (ФРТ). Дозвіл МРО визначається кутовим розміром пікселя, електронним шляхом через частоту Найквіста, відображення - розміром пікселя або кількістю телевізійних ліній.

Енергетична роздільна здатність - характеризує можливість відділення (виявлення) сигналів від великих об'єктів, розміщених на задньому плані, за рахунок наявного контрасту. Це залежить від енергетичних характеристик системи зворотного зв'язку, чутливості МРВ і шуму системи. Але це не залежить від просторового дозволу системи.

Максимальна дальність спостереження - максимальна дальність, на якій ТПСС забезпечує виявлення або розпізнавання об'єкта заданою ймовірністю. Гранична дальність спостереження залежить як від просторового так і від енергетичного розділення.

Передавальна функція $H_s(v_x, v_y)$ - характеризує поведінку ОЕСС в області просторових частот. Її визначає залишковий контраст зображення синусоїдальної міри на екрані дисплея і контраст самої міри. Модуль передавальної функції називають модуляційною передавальною функцією.

Освітленість, еквівалента шуму (Noise Equivalent Irradiance) NEI - це освітленість у площині вхідної зіниці ОС, яка створює електричний сигнал u_s на виході МРВ, еквівалентний шумовому сигналу u_n , тобто

$$NEI = E_p \frac{u_n}{u_s}, \quad (1.4)$$

де E_p - освітленість вхідної зіниці, яка створює сигнал u_s . Інакше, NEI визначає мінімальна виявляюча освітленість.

Еквівалента шуму різниця температур – це різниця температур між стандартним тест-об'єктом і фоном, що випромінюють як АЧТ, за якої відношення пікового значення сигналу на виході стандартного еталонного фільтра ТПСС, яка розглядає тест-об'єкт, до шуму дорівнює одиниці [11].

Мінімальна роздільна різниця температур – це мінімальна різниця ефективних температур між смугами (штрихами) тест-об'єкта із заданою просторовою частотою та фоном, яка дозволяє візуально на екрані дисплея розділяти (розрізняти) штрихи об'єкта.

1.4 Застосування сучасних ТС в різних галузях

На рисунку 1.12 представлені види сучасних тепловізійних систем.



Рисунок 1.12 – Види сучасних тепловізійних систем [12]

а) FLIR E4 - Тепловізійна камера для використання в сфері електричних, механічних, вентиляційних, та будівельних видів робіт. За допомогою даного тепловізора початкового рівня можна без особливих зусиль можна знаходити дефекти, які проявляють себе аномальними температурами. Даний пристрій оснащений новим детектором з роздільною здатністю 80×60 пікселів з температурною чутливістю менше $0.15 \text{ }^\circ \text{C}$, має вбудовану камеру видимого спектру і технологію MSX, яка дозволяє накладати написи та інші ключові деталі видимого зображення на тепловий знімок об'єкта в режимі реального часу. Всі отримані дані відображаються на кольоровому дисплеї з роздільною здатністю 320×240 пікселів. До особливостей даної системи відносять досить широкий кут огляду, забезпечуючий зручну зйомку, а також високу чутливість для виявлення найменших різниць температур.

б) Інфратех IT-615 - Тепловізійну систему IT-615 використовують в цілях оборони для оптичного прицілу снайперської зброї з метою виявлення цілей на дистанціях короткої та середньої відстані, у нічний час а також в поганих погодних умовах. Випробування прицілу проходили протягом чотирьох місяців в умовах підвищеної вологості повітря, сонячного випромінювання, в умовах соляного туману та екстремальних температур від -40 до $+60 \text{ }^\circ \text{C}$. Рекомендований для використання на відстань до 800/950 метрів. Система функціонує в пасивному режимі.

в) DALI S246L - Тепловізійний монокуляр DALI S246L дозволяє виявляти, розпізнати та ідентифікувати об'єкти живої та не живої природи в тепловому ІК-діапазоні. Вологозахист по стандарту IP66 дозволяє використовувати прилад і в сніг і в дощ. Основною особливістю тепловізора DALI S24 є застосування матриці із роздільною здатністю 384×288 в поєднанні з 1-кратним світосильним об'єктивом дозволяє виявляти контрастний тепловий об'єкт розміром $1,5 \text{ м} \times 0,5 \text{ м}$ на відстані 1150 метрів.

г) Guide GUDIR IR518 це монокулярний тепловізійний пристрій, призначений для цілодобової охорони, в складних метеоумовах. Тепловізійна система оснащена неохолоджуваною матрицею 384×288 , має високу роздільну

здатність, яка може показати будь-який тепловий об'єкт (тварини, людина або просто нагріте тіло), на відстані до 1300 метрів в повній темряві. Прилад може розпізнати на недалекій відстані, зброю під одягом, або залишки слідів тепла від залишених живих об'єктів. Нижче наведена таблиця 1.1 із основними характеристиками тепловізійних систем.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики тепловізійних систем [12]

Параметр	FLIR E4	Інфратех IT-615	DALI S246L	Guide GUDIR IR518
Тип приймача випромінювання	Неохолоджувана мікроболометрична матриця			
Спектральний діапазон	7,5-13 мкм	9-15 мкм	8-14 мкм	
Цифрове збільшення	2X, 3X, 4X			
Кутове поле зору	45 °С(гориз) × 34 °С (верт)	7,5 °С (гориз) × 6,9 °С (верт)	15,7 °С (гориз) × 11,8 °С (верт)	9,15 °С (гориз) × 6,87 °С (верт)
Роздільна здатність	375 × 290	384 × 288	380 × 288	
Шаг пікселя матриці	15 мкм	17 мкм	18 мкм	
Дистанція виявлення об'єкту	50 м	1700 м (для об'єкта розмір якого становить 1.7*0.5 м)	1150м × 0.5м	600м
Температурна чутливість	0,15 °С	0,14 °С	0,16 °С	0,18 °С
Частота розгортки зображення	9 Гц	30 Гц	50 Гц	
Діапазон робочих температур	Від -20 до +250 °С	Від -40°С до +60°С	Від -20 до +50 °С	Від -20 до +250 °С
Об'єктив	13 мм	14 мм		25 м

А також, на рисунку 1.13 представлено як сучасний тепловізор виглядає всередині.

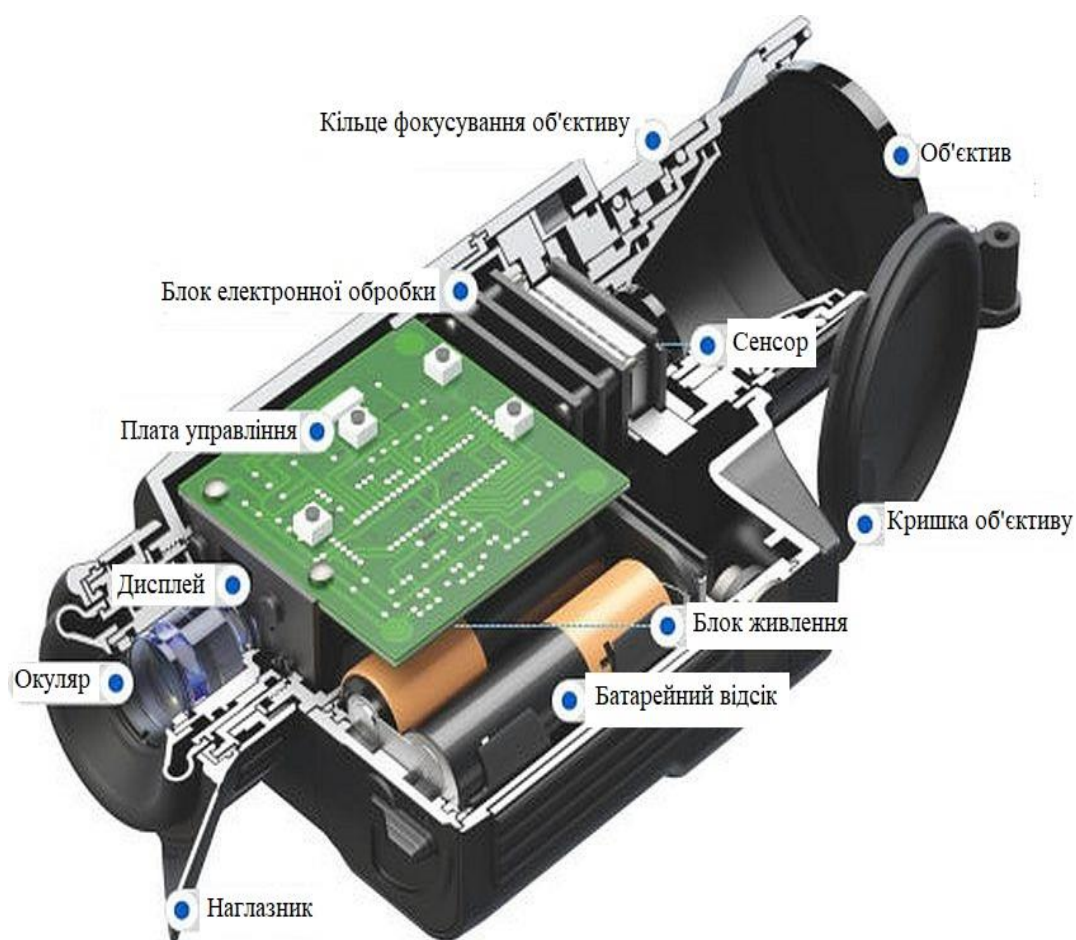


Рисунок 1.13 – Внутрішній вид ТС

1.5 Висновки

У даному розділі було розглянуто різні варіанти тепловізійних систем, одні призначені для використання у сфері електричних, механічних, вентиляційних, та будівельних видів робіт, мають невеликі розміри, інші великих розмірів – радіус дії яких складає кілька сотень метрів використовуються у військовій справі. Тепловізори із оптико-електричним скануванням порівняно із оптико-механічними тепловізорами мають такі переваги як :

- завадостійкість на 15% більше;

- дальність виявлення більше на 20%;
- розмірність: довжина 185мм, висота 75мм.

Тепловізори із оптико-механічним скануванням у порівнянні із оптико-електричними мають такі мінуси як:

- стійкість перешкод менше на 15% ;
- дальність виявлення на 20% менше;
- розмірність: 164мм×130мм×64мм;

Умовно їх можна поділити на два типи :

- стаціонарні – середній розмір 170×70×70мм, радіус дії більше 1 км,
- переносні – середній розмір 106×201×205мм, радіус дії 0-50м.

Були розглянуті методи поліпшення дальності тепловізійних систем, де перелічені існуючі методи та їх принцип, а також були розглянуті розрахункові методики аналізу тепловізійних систем.

У наступному розділі буде розглянута математична модель, та принцип роботи тепловізійної системи.

2 РОЗРАХУНОК ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ІЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОВІЗІЙНОЮ СИСТЕМОЮ

В першому розділі було розглянуто багато методів та процесів поліпшення тепловізійної системи, але всі вони мають свої недоліки. При використанні практично будь-якого методу поліпшення дальності виявлення ІЧ випромінювання об'єктів тепловізійною системою порушуються конструкторсько-технічні параметри ТС, що призводить до незручності використання та значно більшу вартість приладу. В ході дослідження з'ясувалося, що процес збільшення числа елементів дозволу найоптимальніший, не вимагає змін конструкторсько-технічних даних та вартість пристрою не підніметься більше ніж на 15%. Також процес дозволяє здійснити більш точне визначення форми об'єкту; дозволяє визначити відносно невеликий об'єкт на відносно більшій дистанції. Чим більше кількість пікселів в приймачі випромінювання, тим докладніше, детальніше і чіткіше представлені об'єкти вимірювання. Крім того збільшення числа елементів дозволу підвищує можливість помилкових спрацьовувань системи і вимагає застосування нових конструкторсько-технічних рішень. Тому, був обраний метод поліпшення оптичної системи, який дозволить збільшити дальність дії тепловізійної системи.

Поставлена задача вирішується тим, що поліпшення оптичної системи дозволить підвищувати спектральні пропусканні характеристики що призводить до пропускання тільки ІК-випромінювання, що значно знижує «помилкові засвітки» фотоматриці.

2.1 Оптична система ТС

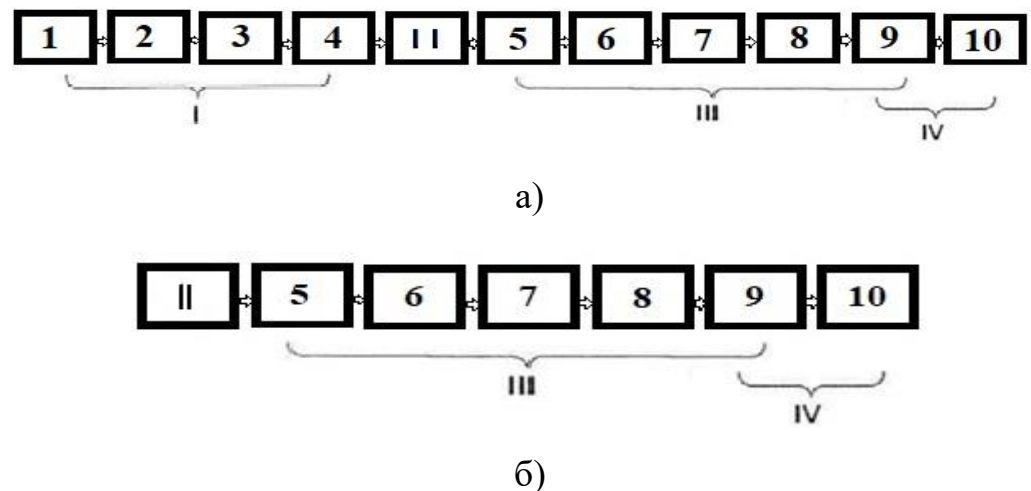
Оптична система грає важливу роль в тепловізійних системах. У більшості систем складається із одного об'єктиву, але у спеціальних системах є навіть декілька об'єктивів.

Об'єктив ТС набирає ІЧ випромінювання, а на приймачі випромінювання фокусує його [2].

Оптичні системи можуть розв'язувати наступні завдання [2] :

- забезпечення огляду тієї частини простору, де знаходиться предмет пошуку, спостережуваний об'єкт чи орієнтир;
- дослідження оптичного зображення цілі, в призначеному масштабі для того щоб в подальшому його зареєструвати.
- надавання необхідної кількості освітленості на поверхні випромінюючого приймача;
- необхідна концентрація випромінюючого потоку штучних джерел;
- розрахування координат кутових об'єктів а також дальність до них.

На рис 1.10 представлені структурні схеми оптичних і пасивних систем ЕОП.



I- передавальна система; II - Об'єкт дослідження; III – система прийому;
IV – електрична система;

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

Рисунок 2.1 – Структурні схеми оптичних(а) і пасивних(б) систем ЕОП

В середньому інфрачервоному діапазоні оптичне звичайне скло непрозоре, тому для ТС оптику виробляють за допомогою спеціальних матеріалів. В основному беруть германій, але оскільки він дорогий, тому в інших випадках можна використовувати халькогенідне скло, поліетилен чи селенід цинку. В лабораторних експериментах можна також робити оптику із солей, таких як поварена, а також звичайної прозорості при необхідних діапазонах довжини хвилі.

2.1.1 Матриця ТС. Матриця тепловізору (рис 2.2) – приймач, чи детектор випромінювання, приймаючий та перетворюючий енергію оптичного випромінювання ІК-спектру в електричний сигнал, пропорціональний потужності поглиненого ІК-випромінювання їх чутливими площадками.

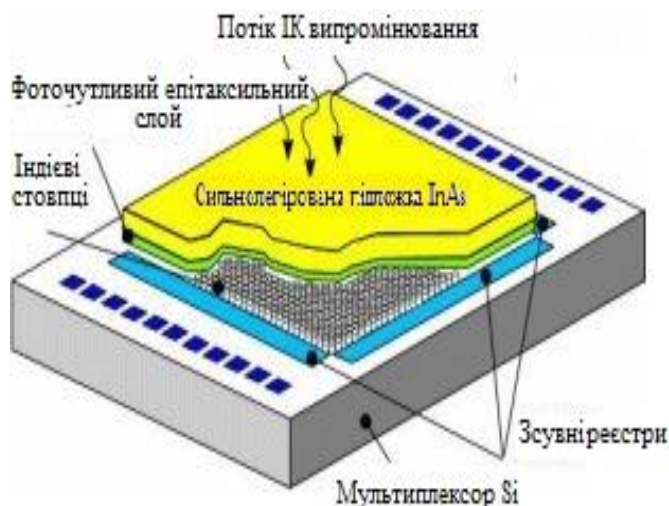


Рисунок 2.2 – Пристрій матричного ІЧ детектору

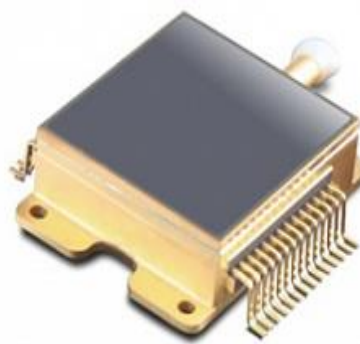
Матричні фотоприймачі, що встановлюються в фокальній площині об'єктива, складаються із безлічі чутливих елементів, розташованих по рядах і стовпцях прямокутної матриці. Таким чином, в тепловізорі кожен піксель- це вимірне значення температури в даній точці. Так, тепловізор із розмірами матриці 320×240 пікселів відображає ІК зображення, що складається із 76800 значень температури.

2.1.2 Вплив розміру матриці на результат роботи ТС. Якість зображення, або дозвіл камери, є важливим фактором. Висока роздільна здатність допомагає

розташований в нашому тепловізорі, найкраща модель для заміни є матричний сенсор DALI FPA 640 P15 (рис 2.4), (параметри в табл 2.1).



а)



б)

а) тепловізор Pulsar Axion Key XM22, б) сенсор DALI FPA 640 P15 [13]

Рисунок 2.4 – Досліджуючі пристрої

Таблиця 2.1 – Характеристики, Pulsar Axion Key і сенсору FPA 640 P15

Параметр	DALI FPA 640 P15	Pulsar Axion Key XM22
Тип приймача випромінювання	aSi	aSi
Спектральний діапазон	8-14 мкм	8-14 мкм
Шаг пікселю	25 мкм	20 мкм
Роздільна здатність	640×480	320×240
Дистанція виявлення об'єкту	1200 м	950 м
Розмір	32мм×23.5мм×7.6мм	30мм×21мм×7мм
Діапазон робочих температур	Від -40 до +60 °С	Від -40 до +50 °С

2.3 Розробка алгоритму розрахунку ТС

На рис 2.6 представлено алгоритм розрахунку дальності дії ТС

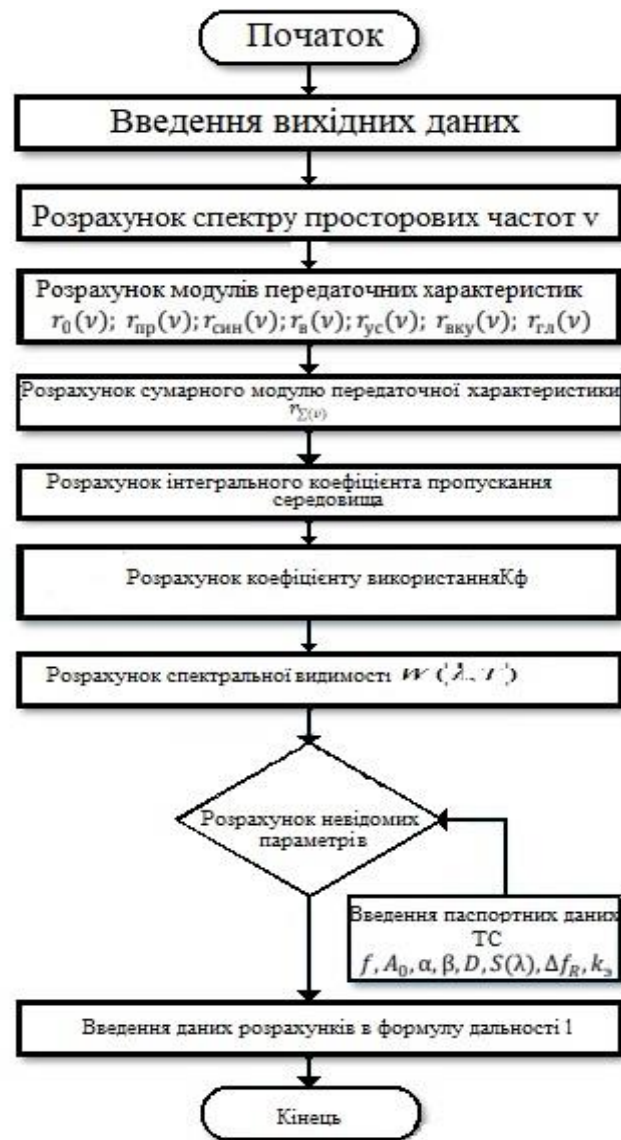


Рисунок 2.6 – Алгоритм розрахунку дальності дії ТС

2.4 Математична модель

Розбираємо формулу 1.2, знаходимо та розраховуємо кожен параметр формули. Ми вже знаємо із паспортних даних, що на стандартній оптичній системі дальність дії складає 950 м. Розрахуємо дальність виявлення тепловізору Pulsar Axion Key XM22 вже на новій установленій матриці DALI FPA 640 P15, результати порівняємо.

Знайшли та розраховували перший параметр із формули 1.2 D^* :

Питома виявляюча здатність (D^*) характеризує можливість використання фотоприймача для виявлення гранично малих сигналів. Чим більше по абсолютній величині питома виявляюча здатність, тим кращою чутливістю володіє фотоприймач [14].

$$D^* = \frac{\sqrt{A \times \Delta f_R}}{\Phi_n}, \quad (2.1)$$

де Φ_n – пороговий потік приймача випромінювання приведений до полоси пропускання.

Граничний потік приймача в ряді випадків може бути вказано в паспортних даних вже приведеним до смуги пропускання або до смуги пропускання та площини приймача випромінювання, в цьому випадку вони будуть пов'язані наступними відношеннями :

$$\Phi'_n = \frac{\Phi_n}{\sqrt{\Delta f_R}}, \quad (2.2)$$

$$\Phi''_n = \frac{\Phi_n}{\sqrt{A \times \Delta f_R}}, \quad (2.3)$$

де Φ'_n – пороговий потік приймача випромінювання, приведений до полоси пропускання;

Φ''_n – пороговий потік, приведений до полоси пропускання та площини приймача;

A – площа поверхні приймача оптичного випромінювання.

Полоса пропускання приймача випромінювання може розраховатися, виходячи із даних постійної часу приймача чи часу накоплення заряду :

$$\Delta f_R = \frac{1}{2 \times \tau_d}, \quad (2.4)$$

де τ_d – постійна часу приймача випромінювання, сек.

Знаходимо параметр $S(\lambda)$. Це реакція фотоприймача на монохроматичний потік випромінювання та звичайно виявляється виразом:

$$S(\lambda) = \frac{S_\lambda \times K_\varepsilon}{S}, \quad (2.5)$$

де S – загальне інтегральне значення;

S_λ – абсолютна спектральна чутливість.

Значення K_ε – коефіцієнт використання приймачем випромінювання еталонного джерела.

$$k_\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \times \Phi_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda}, \quad (2.6)$$

де λ_1 і λ_2 – границі спектрального діапазону досліджування, мкм;

Φ_λ – вимірюваний потік випромінювання.

Після цього розбираємо формулу 1.3, знаходимо та розраховуємо кожен параметр формули :

$$r_0(v) = 0,64e^{-1,33\left(\frac{d_a v}{f'}\right)^2} \times \arccos\left(\frac{\lambda_0 v}{d}\right) - \frac{\lambda_0 v}{d} - \left[1 - \left(\frac{\lambda_0 v}{d}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.7)$$

де d_a – це поперечний розмір плями розсіяння об'єктиву;

λ_0 – робоча довжина хвилі.

$$r_{npс}(v) = \left| \frac{\sin(\pi\delta_c v)}{\pi\delta_c v} \right|;$$

$$r_{npк}(v) = \left| \frac{\sin(\pi\delta_k v)}{\pi\delta_k v} \right|, \quad (2.8)$$

де $\delta_c = (a/f) \times 1000$, $\delta_k = (b/f) \times 1000$ – відповідно, кутовий розмір елементарного поля по рядку та кадру (мрад);

$a_{yc} = 1,25$; $r_{ин}(v) = r_{син}(v) = 1$ – для тепловізорів із матричними приймачами;

$$r_{yc}(v) = \left(1 + \frac{2v\delta_c}{a_{yc}} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2.9)$$

Значення ФПМ для ланків по рядкам :

$$r_{вс}(v) = \left| \frac{\sin(\pi v \delta_c / a_c x_c)}{(\pi v \delta_c / a_c x_c)} \right|, \quad (2.10)$$

$$r_{вкyc}(v) = e^{-(1,33v^2 \delta_c^2 / z^2 a_c^2 x_c^2)}, \quad (2.11)$$

$$r_{злс}(v) = e^{-(1,23v^2 \delta_c^2 / \delta_m^2 z^2 a_c^2 x_c^2)}, \quad (2.12)$$

$$r_{смс}(v) = \left| \frac{\sin(\pi v \delta_c / a_c x_c)}{(\pi v \delta_c / a_c x_c)} \right|, \quad (2.13)$$

Значення ФПМ по кадру :

$$r_{\theta K}(v) = \left| \frac{\sin(\pi v \delta_K / a_K x_K)}{(\pi v \delta_K / a_K x_K)} \right|, \quad (2.14)$$

$$r_{\theta K y K}(v) = e^{-(1,33 v^2 \delta_K^2 / z^2 a_K^2 x_K^2)}, \quad (2.15)$$

$$r_{2LK}(v) = e^{-(1,23 v^2 \delta_K^2 / \delta_m^2 z^2 a_K^2 x_K^2)}, \quad (2.16)$$

$$r_{CMK}(v) = \left| \frac{\sin(\pi v \delta_K / a_K x_K)}{(\pi v \delta_K / a_K x_K)} \right|, \quad (2.17)$$

де $a_c = n_c / R_c$ – коефіцієнти переналоження по рядку та кадру;

$x_c = a_c / \Delta a_c, x_k = a_k / \Delta a_k$ – коефіцієнти заповнення елементів приймача по рядку та кадру;

$\Delta a_k, \Delta a_c$ – шаг елементів приймача оптичного випромінювання.

Просторова частота v має сенс як величина, зворотна розміру об'єкту, та формулах 1.3 – 2.17 зв'язана із дальністю l :

$$v = \frac{lN}{2h \times 1000} \cdot \text{мрад}^{-1}, \quad (2.18)$$

Після розрахунку формул [1.1-2.18] і виходячи з паспортних даних, отримано значення, які потрібно підставити в формулу дальності : $h = 2,7$ м (автомобіль), $d = 160$ мм, $f = 280$ мм, $D^* = 1,2 \times 10^{11}$ см \times Гц^{1/2} Вм, $\Delta T_{\text{раз}} = 0,02^\circ$ К, $T = 293^\circ$ К (літо), $T = 263^\circ$ К (зима), $\lambda_0 = 10$ мкм, $\lambda_1 = 8$ мкм, $\lambda_2 = 12$ мкм, $a = b = 30$ мкм, $f_k = 25$ Гц, $\tau_0 = 0.9$.

2.5 Висновки

У даному розділі була поліпшена дальність виявлення ІЧ випромінювання об'єктів тепловізійною системою. Була замінена матриця старого зразку, на нову більш вдосконалену FPA 640 P15, та була розрахована дальність дії вже на новій матриці. Був складений алгоритм для розрахунків дальності тепловізійних систем, таким чином значно простили задачу, в майбутньому, коли застаріє і ця оптична система, фахівці без особливих зусиль можуть вставити в алгоритм дані нової матриці, і перевірити у скільки разів зросте дальність дії на другій оптичній системі. Був розроблений алгоритм для розрахунків дальності дії ТС.

У третьому розділі буде розглянуто результати експериментів та підведення підсумків.

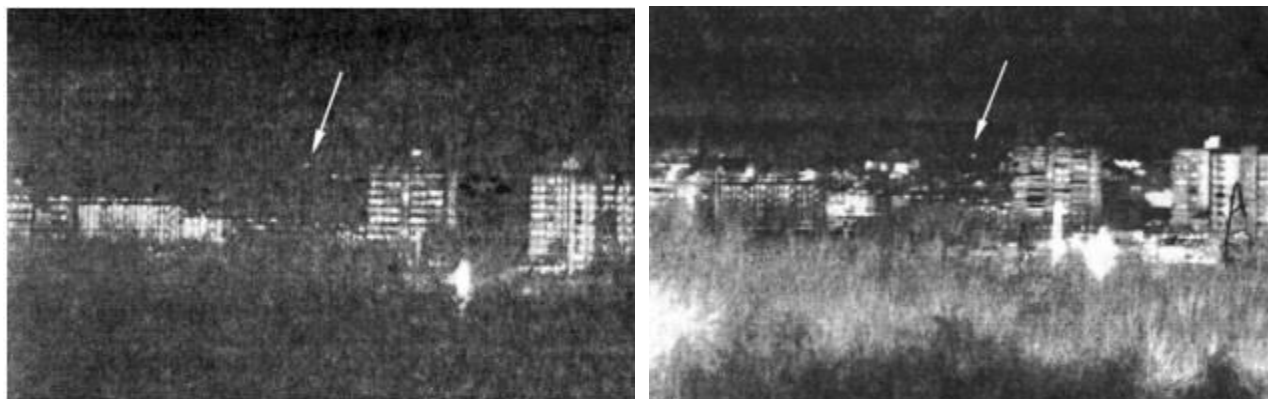
3 РЕЗУЛЬТАТ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПОЛІПШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ

В другому розділі було розроблено алгоритм, для розрахунків дальності дії ТС. Даний алгоритм дозволяє підставляти параметри досліджуваної матриці в формулу, та отримати результат, у вигляді зміни дальності дії тепловізору. В майбутньому, коли вийдуть нові, більш покращені матриці тепловізійних систем, можна із їх паспортних даних, взяти параметри та підставити у алгоритм і таким чином перевірити у скільки разів дана матриця перевершує попередню по дальності дії.

3.1 Результати розрахунку

Паспортні дані тепловізору і матриці, також дані які ми отримали при розрахунках, підставили у формулу 1.2 дальності дії ТС та виявили, що дальність дії тепловізійної системи зростає на 20%. В попередній матриці дальність дії складала 950 м, що було недостатньо для використання. Із заміною матриці дальність ТС складає 1200 м, що є істотним проривом.

Для аналізу результатів розрахунків та зіставлення із даними експерименту на рис 3.1 приведені термограми спостерігаючої сцені при виявленні автомобіля на місцевості, при $l=950$ м та $l=1200$ м. Результати експерименту показали, що робота тепловізійної системи із новою матрицею DALI FPA 640 P15 дає значно кращі показники. Істотно краща картинка на виході, збільшена дальність дії, при цьому масо-габаритні параметри ТС не змінилися, що дає право використовувати тепловізор із таким же комфортом.



а) б)
а) Робота ТС на стандартній оптичній системі;

б) Робота ТС на покращеній оптичній системі DALI FPA 640 P15

Рисунок 3.1 – Термограми спостерігаючої сцені при виявленні автомобіля на місцевості

3.2 Порівняння з аналогом

Розмір матриці (датчика) визначає роздільну здатність тепловізора. На сьогоднішній день поширені тепловізори з матрицями 160x120, 320x240 і 640x480 пікселів. Тепловізором з матрицею 160x120 елементів можна проводити контроль систем вентиляції, опалення, електротехнічного обладнання, а також обстеження огорожувальних конструкцій будівель заввишки не більше 1-2 поверхів. Камеру з такою матрицею доцільно використовувати для контролю областей з плавними перепадами температур на відносно великій площі (спостереження за охолоджуючими системами) і об'єктів з великою різницею температур, де рівномірність розподілу такої не має значення (перегрів контакту однієї з фаз струмоведучих елементів). Для обстеження більш високих об'єктів, таких, наприклад, як багатоповерхові будинки і димові труби, необхідний тепловізор з дозволом матриці 320x240 пікселів. Такий тепловізор доцільно використовувати також для контролю огорожувальних конструкцій, електричних машин і ліній електропередач (з додатковим вузькокутової об'єктивом). Камера з матрицею 640 × 480 є універсальною для різнобічних технологічних рішень і наукових досліджень. Крім того, дозволяє вести контроль

віддалених (висотних) об'єктів без застосування дорогих вузькокутових об'єктивів. На рис 3.1 представлені аналоги використовуємої матриці DALI FPA 640 P15, а саме DALI DLC384 і DALI DLC160 (параметри табл 3.1).



а)

б)

а) DALI DLC384; б) DALI DLC160

Рисунок 3.2 – Аналоги матриці

Сенсори DALI DLC384 та DALI DLC160 представляють собою двомірну фоточутливу пластину, що складається з масива р-і-п фотодіодів, що знаходяться в металевому або керамічному корпусі з підведеною системою електричних контактів та тепловідводу та використовуються в таких областях як :

- прилади нічного бачення
- камери для відео зйомки в умовах поганої видимості, в тому числі з безпілотних літальних апаратів;
- гіперспектральні камери для дистанційного зондування поверхні землі при георозвідки;
- астрономічні спостереження в умовах щільної атмосфери;
- тестування джерел лазерного випромінювання та волоконно-оптичних компонентів;
- спектроскопія поверхні напівпровідникових пластин і сонячних елементів;
- візуалізація живих тканин в біологічних і медичних дослідженнях.

Таблиця 3.1 – Характеристики, Pulsar Axion Key і сенсору FPA 640 P15

Параметр	DALI DLC384	DALI DLC160
Тип приймача випромінювання	aSi	aSi
Спектральний діапазон	8-14 мкм	8-14 мкм
Шаг пікселю	25 мкм	25
Роздільна здатність	384×288	160×120
Дистанція виявлення об'єкту	1000 м	500 м
Розмір	32мм×23.5мм×7.1мм	20мм×14мм×6,5мм
Діапазон робочих температур	Від -40 до +60 °С	Від -40 до +60 °С

Після дослідження виявилось, що сенсор DALI FPA 640 P15 в порівнянні з аналогами, має ряд переваг :

- порівняно низька споживана потужність;
- невеликі габарити, що дозволяють монтаж навіть у найменші пристрої;
- простота конструкції, що не вимагає регулярного догляду та обслуговування;
- висока чутливість і робота в широкому температурному діапазоні;
- висока роздільна здатність, забезпечення якісної картинки.

3.3 Висновки

В даному розділі були розглянуті результати розрахунків алгоритму дальності дії ТС. Було проведено аналіз та порівняння сенсору який використовується, DALI FPA 640 P15 із аналогами DALI DLC384 та DALI DLC160. Результати порівняння показали, що параметри аналогів значно нижче.

ВИСНОВКИ

Досить актуальною задачею є поліпшення дальності дії тепловізійних систем, які зручно використовувати в різних сферах діяльності. Тому і було розглянуто в даній роботі, методи поліпшення дальності виявлення ІЧ випромінювання об'єктів тепловізійною системою.

У першому розділі було розглянуто різні варіанти тепловізійних систем, одні призначені для використання у сфері електричних, механічних, вентиляційних, та будівельних видів робіт, мають невеликі розміри, інші великих розмірів – радіус дії яких складає кілька сотень метрів використовуються у військовій справі. Тепловізори із оптико-електричним скануванням порівняно із оптико-механічними тепловізорами мають такі переваги як :

- завадостійкість на 15% більше;
- дальність виявлення більше на 20%;
- розмірність: довжина 185мм, висота 75мм.

Тепловізори із оптико-механічним скануванням у порівнянні із оптико-електричними мають такі мінуси як:

- стійкість перешкод менше на 15% ;
- дальність виявлення на 20% менше;
- розмірність: 164мм×130мм×64мм;

Умовно їх можна поділити на два типи :

- Тире стаціонарні – середній розмір 170×70×70мм, радіус дії більше 1 км,
- переносні – середній розмір 106×201×205мм, радіус дії 0-50м.

Були розглянуті методи поліпшення дальності тепловізійних систем, де перелічені існуючі методи та їх принцип, а також були розглянуті розрахункові методики аналізу тепловізійних систем.

В другому розділі поліпшили дальність виявлення ІЧ випромінювання об'єктів тепловізійною системою. Була замінена матриця старого зразку, на нову більш вдосконалену FPA 640 P15, та була розрахована дальність дії вже на новій матриці. Був складений алгоритм для розрахунків дальності тепловізійних систем, таким чином значно простили задачу, в майбутньому, коли застаріє і ця оптична система, фахівці без особливих зусиль можуть вставити в алгоритм дані нової матриці, і перевірити у скільки разів зросте дальність дії на другій оптичній системі. Був розроблений алгоритм для розрахунків дальності дії ТС.

В третьому розділі були розглянуті результати розрахунків алгоритму дальності дії ТС. Було проведено аналіз та порівняння сенсору який використовується, DALI FPA 640 P15 із аналогами DALI DLC384 та DALI DLC160. Результати порівняння показали, що параметри аналогів значно нижче у порівнянні із сенсором, який було обрано для покращення системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Колобородов В., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування). К.: Політехніка, 2007. – С. 100-120,310-340.
2. Кононюк А. Е. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта кн.3, ч.4. К.: Освіта України, 2017. – С. 93–101, 371–375.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир,1978. – С. 150-165,395-416.
4. Бочаров Б. Г., Поваро-Потемкин А. Б. Цифровая оптика в ССТV // Системы безопасности. 2007. – № 4. – С. 96–99.
5. Coltman J. W. The specification of imaging properties by response to a sine-wave input // Journal of the Optical Society of America. 1954. Vol.39(1). P. 468-471.
6. Все о тепловизорах. URL: <http://teplovizorgid.ru/teplovizor-pulsar-quantum-hd38s-texnicheskie-xarakteristiki-otzyvy-i-ceny/> (Дата обращения 02.09.2020)
7. Kass M., Witkin A. and Terzopolos D. Snakes: Active Contour Models // Journal International Journal of Computer Vision. 1987. Vol. 1. P. 321-331.
8. ГОСТ Р 53466-2009. Оптика и оптические приборы. Тепловизоры медицинские. Общие технические требования. Методы измерений основных параметров.: ТКС-оптика. Москва: Гос стандарт, 2011. 32 с.
9. Дальность действия тепловизионных систем / В. М. Тимкул та ін.; за загл. Ред. Е. В. Лаптева. – Сибір, 2015. – 100 с.
10. Driggers, R. G., Webb, C., Pruchnic, S. J. et al. Laboratory measurement of sampled IR imaging system performance // Journal optical engineering . 1999. Vol. 38. P 852-861.
11. Госсорг Ж. Инфраредна термографія. Основи, техніка, застосування. М.: Мир, 1988. С 390-416.

12. Матричные фотоприемные устройства SVIR диапазона. URL: <https://www.macrogroupp.ru/catalog/partgroup/23724> (дата звернення 15.11.2020)
13. Пахомов И. И., Рожков О. В., Рождествин В. Н. Оптико-электронные квантовые приборы. М.: Радио и связь, 1982. – 456 с.
14. С.Н. Новиков, А. Н. Поликанин. Методика расчета дальности действия тепловизора на основе объединенных параметров в температурной чувствительности и разрешения // Радиотехника и связь : зб. наук. работ. Серия «информационные технологии». Сибирь, 2019. Вып. XII. С. 71-78
15. Кріксунов Л. З., Падалко Г.А. Тепловізори: Довідник. К .: Техніка, 1987. – 166 с.
16. Мірошников М. М. Теоретичні основи оптико-електронних приладів: Учеб. посібник для приладобудівних вузів. – 2-е изд., перераб. і доп. Л .: Машинобудування, 1983. – 696 с.
17. Грязін Г. Н. Оптико-електронні системи для огляду простору: Системи телебачення. – Л .: Машинобудування, 1988. – 224 с.
18. Порфирьев Л. Ф. Основи перетворення сигналів в оптико електронних системах. – Л .: Машинобудування, 1989. – 387 с.
19. Кріксунов Л. З. Довідник по основам інфрачервоної техніки. М .: Сов. Радіо, 1978. – 400 с.
20. Кріксунов Л. З. Прилади нічного ведення. К .: Техніка, 1975. – 216с.
21. Кріксунов Л. З. Рабишко В.А. Пірікони. Тепловізійна апаратура на пірокожах. Техніка кіно і телебачення. К .: Техніка, 1984. – 78с.
22. Кірєв В. А. Тепловізійна апаратура на пірокожах. Техніка кіно і телебачення. К .: Техніка, 1984. – С. 60 – 65.
23. Довідник по приймачів оптичного випромінювання // В.А. Волков, В.К. В'ялов, Л.Г. Гассанов і ін. / Под ред. Л.З. Кріксунова і Л.С. Кременчуцького. К .: Техніка, 1985. – 216 с.
24. Проектування оптичних систем. // Пер. з англ. / Под ред. Р. Шеннона і Дж. Вайанта. М .: Світ, 1983. – 432 с.